



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III – Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Informatique*

Présentée et soutenue par *Sébastien WYBO*
Le *19 Janvier 2010*

Titre :

*Aide à la conduite des systèmes à risques par la prise en compte du risque :
Exemple de l'application à la conduite automobile*

JURY

M. Jean-Pierre JESSEL – Président
M. Bernard PAVARD – Directeur de thèse
M. René AMALBERTI – Rapporteur
M. Sylvain BOUGNOUX – Membre
M. Fawzi NASHASHIBI – Membre (absent)
M. Alain MILLE – Membre (absent)

Ecole doctorale : *MITT*
Unité de recherche : *IRIT*
Directeur(s) de Thèse : *M. Bernard PAVARD*
Rapporteurs : *M. René AMALBERTI, M. Alain MILLE*

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à remercier M. Bernard Pavard, directeur de recherches à l'IRIT, qui a accepté la difficile mission de reprendre l'encadrement de ce travail de thèse pour l'amener enfin à être soutenu et qui a donc du subir tant de versions du manuscrit.

Je tiens particulièrement à remercier les personnes qui ont accepté d'être membres de mon jury de thèse et ce depuis très longtemps pour certains :

M. Jean-Pierre Jessel, responsable du groupe VORTEX à l'IRIT, qui a accepté immédiatement de faire parti du jury et m'a fait l'honneur de le présider.

M. René Amalberti, de la Haute Autorité de Santé, dont les écrits ont grandement influencé tout un pan de ce travail et qui a accepté immédiatement d'être rapporteur de ce travail et qui a accepté de relire ainsi plusieurs versions de ce manuscrit.

M. Alain Mille, responsable de l'équipe SILEX au LIRIS, qui a lui aussi accepté immédiatement d'être rapporteur de ce manuscrit et qui, par ses conseils et ses retours, m'a permis d'en améliorer grandement la qualité.

M. Fawzi Nashashibi pour son aide précieuse et son encadrement durant la première partie de cette thèse à l'École des Mines de Paris et qui a accepté naturellement d'être membre du jury, bien qu'il n'ait pu au final assister à la soutenance. Je le remercie également pour les nombreux moments de détente partagés autour d'une table de ping-pong ou du baby-foot de la cafétéria des élèves

M. Sylvain Bougnoux ancien responsable du groupe Vision à l'IMRA-Europe, pour avoir accepté de participer au jury mais aussi pour m'avoir donné l'opportunité en 2003 de rejoindre l'IMRA et d'avoir patienté jusqu'à ce jour pour assister à la soutenance de ma thèse.

Je remercie également tous ceux qui m'ont accueilli au centre de robotique de l'ENSMP et tout particulièrement Pierre Coulombeau, Bruno Steux, Alex Revue et Marc Chincholle avec qui nous avons partagé un si grand garage pendant tant d'années. Je garderai également une pensée pour les autres thésards, stagiaires et élèves de l'école qui ont fait de ces 3 ans passés dans les sous sols de Paris une expérience mémorable et tellement enrichissante.

Je remercie également tous les Cachanais qui ont rendu les 6 ans passés en région parisienne tellement agréables : SebXu, Bibouch, Jamie, Gandalf, Spike, Oli, Thémis, Vivi, Ouille, Davidor, Sheemie, Dom... et tous les autres que je n'ai pas cités.

Je remercie en particulier le premier cercle de Cachanais et assimilées qui par leur piques et leur constants rappels m'auront finalement encouragés à soutenir enfin cette thèse. Un grand merci donc à : Rémi Saïssset (mon binôme à nos débuts à Cachan qui aura probablement passé plus de temps en première année à squatter la salle de jeu qui me servait de chambre que devant ses cours) sa femme Katia et leur petite Laura, Nicolas Laverdure (qui aura finalement soutenu bien avant moi), Nicolas Roux (qui bientôt fera régner son sang chaud sur les joutes européennes de baseball), Laurant Cabaret (qui a maintenant repris le flambeau de celui qui soutiendra le plus tard) sa femme Christine et leurs adorables bambins Manon et Titouan et enfin Fabien Aeschlimann (le rugbyman anglophobe qui après un exil forcé revient enfin en France) sa femme Juliette (qui a finalement eu pitié de Fabien et qui le ramène avec elle donc) et leurs anglais d'enfants Clément et Marianne.

Je remercie enfin mes parents qui de façons différentes m'ont aidé à enfin soutenir par des rappels plus ou moins (mais plutôt plus que mons) réguliers à la nécessité de soutenir pour finir ce travail et par leur aide et leur soutien que ce soit pour cette thèse mais aussi pour toutes les années précédentes et à tous les niveaux d'études qui m'auront conduit jusqu'ici.

Je terminerai finalement ces remerciements pour Maryline sans qui ce manuscrit n'existerait pas. C'est grâce à son soutien, à sa présence, à son amour que j'ai pu trouver le courage de me remettre à la rédaction de ce manuscrit, c'est grâce à elle que j'ai gardé la motivation durant ces nombreuses années durant lesquelles elle m'a soutenu et ce malgré le temps qui nous aura ainsi été enlevé.

Je lui dédie donc ce manuscrit ainsi qu'à Gabriel qui sera finalement arrivé plus vite que cette soutenance et qui aura ainsi pu y assister. Je vous aime.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERES	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	11
PREAMBULE	17
INTRODUCTION	19
CHAPITRE I – SYSTEMES A RISQUES, EVOLUTION VERS DES SYSTEMES ULTRA-SURS	23
<i>I - 1. Systèmes à risques</i>	23
I - 1. 1. Le transport aérien	23
I - 1. 2. L'énergie nucléaire.....	26
I - 1. 3. Le transport ferroviaire.....	27
<i>I - 2. Une évolution commune des systèmes à risques?</i>	29
I - 2. 1. Phase héroïque.....	30
I - 2. 2. Phase d'espérance	30
I - 2. 3. Phase de sécurité et apparition d'un nouveau cycle.....	31
<i>I - 3. Mécanismes d'évolution des systèmes à risque</i>	31
I - 3. 1. Changements dans la gestion du système.....	31
I - 3. 2. De l'accident au retour d'expérience	32
I - 3. 3. L'accumulation des barrières – défenses en profondeur.....	33
I - 3. 4. Des influences contradictoires.....	33
I - 3. 5. Un équilibre précaire, difficile à maintenir	34
<i>I - 4. Risques résiduels</i>	35
<i>I - 5. Synthèse</i>	36
<i>I - 6. Vers plus de sécurité?.....</i>	36
<i>I - 7. Un problème insoluble ?</i>	37
CHAPITRE II – L'HUMAIN DERNIERE FRONTIERE?.....	39
<i>II - 1. Principe de raisonnement de l'être humain :</i>	39
II - 1. 1. Différents niveaux d'abstraction.....	40
II - 1. 2. Parallélisme du traitement des tâches.....	42
II - 1. 3. Conclusion.....	43
<i>II - 2. L'erreur humaine selon Reason :.....</i>	44
<i>II - 3. Causes des différents types d'erreurs humaines :</i>	46
II - 3. 1. Erreurs d'activité au niveau basé sur les automatismes :	47
II - 3. 2. Erreurs d'activité au niveau basé sur les règles :	47
II - 3. 3. Erreurs d'activité au niveau basé sur les connaissances déclaratives :	49
II - 3. 4. Violations	50
II - 3. 5. Conclusion :.....	52
<i>II - 4. La conscience de la situation selon Endsley.....</i>	52
II - 4. 1. Définition	52
II - 4. 2. Mécanismes mis en jeu	53
II - 4. 2. 1. Short term sensory store :	53
II - 4. 2. 2. L'attention.....	54
II - 4. 2. 3. La perception.....	54
II - 4. 2. 4. Schémas, scripts et automatismes	54
II - 4. 2. 5. Synthèse.....	55
II - 4. 3. Conscience de la situation et erreurs	56
II - 4. 3. 1. Erreurs au niveau perceptif.....	56
II - 4. 3. 2. Erreurs au niveau de l'intégration des données.....	56

II - 4. 3. 3. Erreurs au niveau anticipatif	57
II - 4. 4. Conclusion.....	57
II - 5. Synthèse.....	57
CHAPITRE III – LA PERCEPTION DU RISQUE, CLE DE LA SURETE?.....	61
III - 1. Une aide à la prise en compte du risque.....	61
III - 1. 1. Schématisation de la conduite des systèmes à risques.....	61
III - 1. 2. Aide à la conduite par la prise en compte du risque	62
III - 1. 2. 1. Situation générale	63
III - 1. 2. 2. Un modèle générique d'implémentation d'un cindynamètre.....	64
III - 1. 3. Synthèse	65
III - 2. La conduite automobile.....	66
III - 2. 1. Les sources d'accidents	67
III - 2. 2. Défenses existantes	68
III - 2. 2. 1. Barrières réglementaires	69
III - 2. 2. 2. Barrières technologiques	70
III - 2. 3. Conclusions.....	71
III - 3. Le raisonnement humain appliqué à la conduite automobile	71
III - 3. 1. Défaillances au niveau stratégique :	72
III - 3. 2. Défaillances au niveau tactique :	73
III - 3. 3. Défaillances au niveau opérationnel :	74
III - 3. 4. Conclusion :	75
III - 4. Le cindynamètre appliqué à la conduite automobile	75
III - 4. 1. Contexte	76
III - 4. 2. Application à la conduite automobile	76
III - 4. 3. Architecture proposée	77
III - 4. 4. Conclusions:.....	78
III - 5. Synthèse	79
CHAPITRE IV – PERCEPTION DE LA SITUATION DE CONDUITE	81
IV - 1. Capteurs véhicule.....	82
IV - 1. 1. Capteurs de pression des pneumatiques :	82
IV - 1. 2. Mesures inertielles :.....	84
IV - 1. 2. 1. Gyroscopes :.....	84
IV - 1. 2. 2. Accéléromètres :.....	85
IV - 1. 2. 3. Centrale inertielle:.....	85
IV - 1. 3. Positionnement par satellite :.....	86
IV - 1. 4. Synthèse :.....	87
IV - 2. Capteurs de comportement :.....	88
IV - 2. 1. Capteurs de vigilance :.....	88
IV - 2. 1. 1. Capteurs de pression :	89
IV - 2. 1. 2. Caméra:.....	89
IV - 2. 2. Capteurs de comportement :	90
IV - 2. 2. 1. Capteur de vitesse :	90
IV - 2. 2. 2. Capteur d'angle volant :.....	90
IV - 2. 2. 3. Capteurs de course pédalier :	91
IV - 2. 2. 4. Autres capteurs :	92
IV - 2. 3. Synthèse.....	92
IV - 3. Capteurs "environnementaux".....	93
IV - 3. 1. Télémètres :	93
IV - 3. 1. 1. Télémètres à ultrasons :.....	93
IV - 3. 1. 2. Télémètres infrarouges :	93

IV - 3. 1. 3. Télémètres laser :	94
IV - 3. 1. 4. Radar :	95
IV - 3. 2. Autres détecteurs d'obstacles :	96
IV - 3. 2. 1. Caméras :	96
IV - 3. 2. 2. Caméras proche infrarouge :	96
IV - 3. 2. 3. Capteurs thermiques :	97
IV - 3. 3. Détection de la route et de la signalisation	98
IV - 3. 3. 1. Systèmes de navigation :	98
IV - 3. 3. 2. Systèmes optiques :	100
IV - 3. 3. 3. Synthèse.....	101
IV - 3. 4. Capteurs météorologiques :	101
IV - 3. 4. 1. Capteurs de pluie :	101
IV - 3. 4. 2. Capteurs de visibilité :	102
IV - 3. 4. 3. Caméras :	103
IV - 3. 5. Evaluation de l'état de surface de la route	104
IV - 3. 5. 1. Capteurs infrarouges actifs :	105
IV - 3. 5. 2. Capteurs infrarouges passifs :	106
IV - 3. 5. 3. Autres approches :	107
IV - 3. 6. Synthèse :	108
IV - 4. Communications avec l'environnement.....	108
IV - 4. 1. Communications avec l'infrastructure	109
IV - 4. 2. Communications inter véhiculaires	109
IV - 4. 3. Synthèse.....	110
IV - 5. Conclusions :.....	110
CHAPITRE V – COMPREHENSION DE LA SITUATION DE CONDUITE	113
V - 1. Evaluation des conditions météorologiques	114
V - 1. 1. Détection des conditions climatiques difficiles	115
V - 1. 2. Evaluation des conditions locales d'adhérence	115
V - 1. 3. Synthèse	116
V - 2. Evaluation de l'attention du conducteur et de sa vigilance	117
V - 3. Evaluation de la position du véhicule.....	119
V - 3. 1. Calcul de la position absolue par hybridation :	120
V - 3. 2. Map-matching :	123
V - 3. 3. Synthèse	124
V - 4. Détection d'obstacles	125
V - 4. 1. Détection d'obstacles par la vision	126
V - 4. 1. 1. Détection d'obstacles proches du véhicule.....	126
V - 4. 1. 2. Détection d'obstacles à distance moyenne à longue	140
V - 4. 2. Fusion des données issues du télémètre et de la vision.....	157
V - 4. 3. Synthèse	159
V - 5. Détection de la route.....	161
V - 5. 1. Les données du problème :	161
V - 5. 1. 1. Repères utilisés :	161
V - 5. 1. 2. Variables utilisées dans nos modèles :	162
V - 5. 1. 3. Equations de projection :	164
V - 5. 2. Algorithme de détection de la route :	165
V - 5. 2. 1. Différentes méthodes de détection de la route :	166
V - 5. 2. 2. Filtre de convolution :	166
V - 5. 2. 3. Extraction des marquages :	173
V - 5. 3. Reconstruction tridimensionnelle de la route :	177

V - 5. 3. 1. Contexte :	177
V - 5. 3. 2. Modèle ruban de Dementhon :	178
V - 5. 3. 3. Modèle de route à largeur constante :	180
V - 5. 3. 4. Validation sur données simulées :	182
V - 5. 3. 5. Conclusions	195
V - 5. 4. Estimation des angles du repère caméra :	195
V - 5. 4. 1. Calcul du roulis :	195
V - 5. 4. 2. Calcul des angles de lacet et de tangage :	199
V - 5. 4. 3. Détermination du point de fuite :	199
V - 5. 4. 4. Estimation de l'erreur commise sur la valeur des angles :	200
V - 5. 4. 5. Conclusion :	200
V - 5. 5. Conclusions :	200
V - 6. Synthèse :	202
CHAPITRE VI – PERCEPTION DES RISQUES	205
VI - 1. Prédiction de la trajectoire des obstacles	205
VI - 1. 1. Contexte :	205
VI - 1. 2. Problèmes des méthodes classiques :	206
VI - 1. 2. 1. Approches liées au calcul du TLC	206
VI - 1. 2. 2. Approches liées à la détection du changement de voies	206
VI - 1. 2. 3. Autres approches	207
VI - 1. 2. 4. Synthèse	207
VI - 1. 3. Le moteur de prédiction de trajectoire :	208
VI - 1. 3. 1. Principes généraux de fonctionnement de l'algorithme :	208
VI - 1. 3. 2. La fuzzification de la trajectoire :	210
VI - 1. 3. 3. Fuzzification de la distance à l'intersection :	212
VI - 1. 3. 4. Le réseau d'inférence probabiliste :	213
VI - 1. 3. 5. Quantification de la trajectoire :	215
VI - 1. 3. 6. Calcul de la densité de probabilité de présence dans l'espace :	217
VI - 1. 4. Optimisations de l'algorithme de prédiction :	223
VI - 1. 4. 1. Algorithme récursif et problèmes de mémoires	223
VI - 1. 4. 2. Parallélisme du traitement des obstacles :	223
VI - 1. 4. 3. Parallélisme de l'algorithme :	224
VI - 2. Prédiction de la trajectoire du véhicule	224
VI - 2. 1. Différences entre algorithmes de prédiction de trajectoires	225
VI - 2. 1. 1. Différences dans l'étape de fuzzification :	225
VI - 2. 1. 2. Différences dans le réseau d'inférence probabiliste :	225
VI - 2. 1. 3. Différences dans la quantification des trajectoires prédites :	226
VI - 2. 2. Différences de programmation	226
VI - 3. Calcul du risque de collision	227
VI - 3. 1. Principe du calcul du risque de collision :	228
VI - 3. 1. 1. Calcul de la probabilité de présence dans une zone donnée	229
VI - 3. 1. 2. Détermination de la zone de collision S :	229
VI - 3. 1. 3. Calcul du risque instantané de collision :	230
VI - 3. 1. 4. Evolution du risque de collision au cours du temps :	230
VI - 3. 2. Prise en compte de la taille des véhicules :	231
VI - 3. 2. 1. Principe :	231
VI - 3. 2. 2. Détermination de la surface au sol du véhicule :	232
VI - 3. 3. Calcul final du risque de collision :	233
VI - 3. 4. Exemple d'application	235
VI - 4. Calcul du risque de perte de contrôle du véhicule	237

<i>VI - 5. Evaluation du respect de la réglementation.....</i>	239
<i>VI - 6. Conclusions:.....</i>	240
CHAPITRE VII – L'INFORMATION AU CONDUCTEUR.....	243
<i>VII - 1. Contraintes de réalisation :.....</i>	243
<i>VII - 2. Prise en compte de l'attention du conducteur :.....</i>	244
<i>VII - 3. Choix technologiques :.....</i>	245
VII - 3. 1. Interfaces haptiques.....	245
VII - 3. 2. Interfaces auditives :.....	246
VII - 3. 3. Interfaces visuelles :.....	246
VII - 3. 4. Synthèse :.....	247
<i>VII - 4. Réalisation technique proposée.....</i>	248
VII - 4. 1. Interface sonore :.....	248
VII - 4. 2. Interface graphique.....	249
<i>VII - 5. Contrôle par le conducteur :.....</i>	250
<i>VII - 6. Synthèse :.....</i>	250
CHAPITRE VIII – CONCLUSIONS, CRITIQUES ET PERSPECTIVES.....	253
<i>VIII - 1. Synthèse :.....</i>	253
<i>VIII - 2. Premières applications :.....</i>	258
VIII - 2. 1. Bande de roulement virtuelle :.....	258
VIII - 2. 1. 1. Principe de fonctionnement.....	258
VIII - 2. 1. 2. Alerte.....	259
VIII - 2. 1. 3. Avantages attendus.....	260
VIII - 2. 2. Compréhension des voies de circulation.....	260
VIII - 2. 2. 1. Problématique.....	260
VIII - 2. 2. 2. Solution envisagée.....	261
VIII - 2. 2. 3. Mise en œuvre.....	262
VIII - 2. 3. Synthèse :.....	264
<i>VIII - 3. Analyses et critiques :.....</i>	264
VIII - 3. 1. Détection d'obstacles :.....	264
VIII - 3. 2. Détection et reconstruction de la forme de la route :.....	265
VIII - 3. 3. Prédiction des trajectoires :.....	266
VIII - 3. 4. Calcul des risques :.....	267
VIII - 3. 5. Prise en compte du comportement du conducteur :.....	267
VIII - 3. 6. Analyse générale :.....	268
<i>VIII - 4. Perspectives :.....</i>	268
VIII - 4. 1. A court terme :.....	268
VIII - 4. 2. A moyen terme :.....	269
VIII - 4. 3. A long terme :.....	270
VIII - 4. 4. Hors du domaine automobile :.....	270
BIBLIOGRAPHIE.....	273
ANNEXE A – CATASTROPHE DE THREE MILES ISLAND.....	281
<i>A - 1. La centrale de Three Miles Island.....</i>	281
<i>A - 2. Séquence des évènements [NRC][TMI-2 a].....</i>	282
<i>A - 3. Les conséquences écologiques de l'accident.....</i>	283
<i>A - 4. L'impact de l'accident sur l'industrie nucléaire.....</i>	284
<i>A - 5. Analyse de l'accident.....</i>	285
ANNEXE B – CATASTROPHE DE TENERIFE.....	287
<i>B - 1. Situation de la catastrophe.....</i>	287
<i>B - 2. Séquence des évènements [Tenerife] [PanAm].....</i>	287
<i>B - 3. Les causes de l'accident.....</i>	289

<i>B - 4. Conséquences de la catastrophe sur l'aviation civile</i>	289
<i>B - 5. Analyse de l'accident</i>	290
ANNEXE C – FORMULES DE RECONSTRUCTION 3D	293

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Photo du premier vol du Wright Flyer I par John T. Daniels	24
Figure 2 : Louis Blériot à bord du Blériot XI ayant survolé la manche	25
Figure 3 : Evolution du taux d'accidents mortels dans le transport aérien en Amérique du Nord et dans le monde de 1959 à 2007 (d'après [Boeing 08]).	26
Figure 4 : Schéma de la "Steam Horse" de Brunton (d'après [SteamHorse]).....	28
Figure 5 : Schéma générique de l'évolution des systèmes à risques, d'après [Amalberti 06].	30
Figure 6 : Barrières à la sécurité et niveau de risque des systèmes d'après [Amalberti 05]....	32
Figure 7 : L'équilibre précaire des systèmes à risques ([Hale 06] d'après [Rasmussen 97]) ...	34
Figure 8 : Modèle de prise de décision [Reason 93] d'après [Rasmussen 86].....	41
Figure 9 : Illustration du parallélisme de traitement et de la limitation de charge cognitive...	42
Figure 10 : Le GEMS dans ses grandes lignes [Reason 93]	45
Tableau 1 : Résumé des distinctions entre les différents types d'erreurs de bases	46
Tableau 2 : Résumé des principales catégories de modes de défaillance	50
Figure 11 : Pourcentage d'accidents fatals et non fatals dans l'aviation générale suivant le type d'erreur source ([Wiegmann 05] page 8).....	51
Figure 12 : La Conscience de la Situation dans la prise de décision dynamique [Endsley 95]	53
Figure 13 : Mécanismes de la conscience de la situation d'après [Endsley 88]	54
Figure 14 : Interactions entre Conscience de la situation et buts ([Endsley 00], page 11)	55
Figure 15 : Conscience de la situation et charge cognitive selon Endsley ([Endsley 93])	57
Figure 16 : Vue d'ensemble de la situation de pilotage d'un système à risques	62
Figure 17 : Schéma d'insertion d'un cindynamètre dans une situation de conduite d'un système à risques.....	64
Figure 18 : Schéma générique de l'architecture d'un cindynamètre.....	65
Figure 19 : Nombre de victimes (tués et blessés) en fonction de la classe d'âge	67
Figure 20 : Répartition des causes principales retenues des accidents mortels sur autoroutes	68
Figure 21 : Répartition du nombre de véhicules impliqués dans les accidents corporels sur autoroute entre 1998 et 2000	68
Tableau 3 : Bilan statistique de la sécurité routière depuis 1987 (d'après [Sécurité 07])	70
Figure 22 : Décomposition de l'activité de conduite en niveaux hiérarchiques	72
Figure 23 : Représentation de la relation tripartite appliquée à la conduite automobile.....	76
Figure 24 : Tâche de conduite améliorée par ajout du cindynamètre	77
Figure 25 : Schéma générique de l'implémentation du cindynamètre.....	78
Figure 26: Schématisation de la couche "perception" du cindynamètre.....	82
Figure 27 : Schéma de principe d'un capteur pneumatique embarqué.....	83
Figure 28 : Schéma interne du capteur de pression (tiré du brevet FR2794065).....	83
Figure 29 : Schéma de principe d'un F.O.G.	84
Figure 30 : Schéma de principe d'un gyroscope basé sur l'effet Coriolis.....	85
Figure 31 : Principe d'un "MEMS Strain-Sensing Accelerometer"	85
Figure 32 : Principe du positionnement absolu par GPS (d'après [NOAA-NGS])	86
Figure 33 : Principe de la localisation différentielle par DGPS (d'après [NOAA-NGS]).....	86
Figure 34 : Récapitulatif des capteurs véhicules	88
Figure 35 : Exemple de mesure du capteur vidéo de vigilance.....	89
Figure 36 : Schéma descriptif de l'implantation d'un capteur de course sur une pédale d'accélérateur (issu du brevet n° EP1101646).....	91
Figure 37 : Récapitulatif des capteurs "humains" proposés	92
Figure 38 : Principe du télémètre infrarouge	94
Figure 39 : Schéma de principe du télémètre laser à balayage	95

Figure 40 : exemple d'implémentation d'une aide à la conduite de nuit par caméra thermique	97
Figure 41 : Images thermiques capturées à différents jours et différentes heures [Davis 05] .	98
Figure 42 : Schéma de principe de la signalétique embarquée	99
Figure 43 : Exemple de détection de marquage au sol à partir d'une image vidéo	100
Figure 44 : Schéma de principe d'un capteur de visibilité de type "forward-scattering"	102
Figure 45 : Images obtenues par temps clair et par brouillard	103
Figure 46 : Images après traitement par ondelettes.....	103
Figure 47 : Courbe d'absorption de l'eau dans le proche IR.....	104
Figure 48 : Courbe d'absorption de la glace dans le proche IR.....	105
Figure 49 : Schéma de principe d'un capteur infrarouge actif.....	105
Figure 50 : Exemple d'utilisation de capteurs IR actifs par BMW	106
Figure 51 : Exemple de détection de verglas par une caméra infrarouge passive	106
Figure 52 : Récapitulatif des capteurs environnementaux	108
Figure 53 : Exemple d'utilisation de la communication inter véhicules pour éviter les sur-accidents (d'après [CAR2CAR])	109
Figure 54 : Schéma générique de l'implémentation du cindynamètre.....	113
Figure 55 : Schéma de principe de l'évaluation des conditions météorologiques	116
Figure 56 : Détermination des conditions météorologiques dans le cindynamètre	117
Figure 57 : Principe du module d'évaluation du conducteur	118
Figure 58 : Modules nécessaires à l'évaluation du comportement du conducteur	119
Figure 59 : Erreur de positionnement horizontal [Hein 00]	120
Figure 60 : Trajectoire en milieu urbain obtenue avec un DGPS seul.....	121
Figure 61 : Vue aérienne de la rue Soufflot à Paris (d'après Google Maps).....	121
Figure 62 : Principe de fonctionnement du module d'hybridation [Gamme 01].....	122
Figure 63 : Comparaison de la trajectoire avec DGPS seul (en rouge) et après Hybridation	122
Figure 64 : Comparaison des deux méthodes de Map-matching	123
Figure 65 : Schéma de principe du module de Map-matching	124
Figure 66 : Modules nécessaires à l'évaluation de la trajectoire du véhicule.....	125
Figure 67 : Problèmes de reconstruction tridimensionnelle causés par la présence d'obstacles en mouvement. A gauche vue de dessus, à droite image correspondante (d'après [Wybo 06])	128
Figure 68: Exemple de résultats obtenus (d'après [Fintzel 04]).....	129
Figure 69: Illustration de la transformation perspective inverse GPT [Wybo 07].....	131
Figure 70 : Compensation du mouvement du véhicule sur une séquence de 45 images [Wybo 07].....	131
Figure 71 : Exemple de déformation des objets par transformation perspective inverse [Wybo 07].....	132
Figure 72 : Schématisation de l'algorithme de détection du mouvement [Wybo 07]	134
Figure 73 : Illustration du masquage des obstacles statiques.....	135
Figure 74 : Principe (gauche) et exemple (droite) de la détection de la route	136
Figure 75 : Illustration du filtrage des hypothèses de mouvement [Wybo 07]	138
Figure 76 : Exemples des résultats de détection du mouvement obtenus [Wybo 07].....	139
Figure 77 : Résultat de détection d'ombres sur une image réelle [Steux 01]	141
Figure 78 : Masque associé au filtre de Sobel horizontal 3x3	143
Figure 79 : Masque associé au filtre gaussien 3x3.....	143
Figure 80 : Lignes horizontales dans une image réelle [Wybo 00].....	144
Figure 81 : Résultat du suivi de cibles dans une séquence réelle [Wybo 00]	145
Figure 82 : Masque associé au filtre de Sobel vertical 3x3.....	146
Figure 83 : Extraction de lignes verticales dans une image réelle [Wybo 00].....	146

Figure 84 : Résultat du suivi par extraction des lignes horizontales et verticales sur une image réelle [Wybo 00].....	147
Figure 85 : Extraction des lignes horizontales lors du suivi par extraction combinée des lignes horizontales et verticales [Wybo 00].....	148
Figure 86 : Coefficient de corrélation normalisé	149
Figure 87 : Forme de la fonction d'évaluation du ratio largeur/hauteur.....	150
Figure 88 : Exemple de notation de cibles par ratio.....	150
Figure 89 : Evolution du coefficient de pondération en fonction de la taille de la cible	152
Figure 90 : Exemple d'évaluation combinée d'une cible proche (la cible fait ici plus de 70 pixels de large)	153
Figure 91 : Exemple de validation combinée de plusieurs cibles [Wybo 00].....	154
Figure 92 : Schéma de principe de l'algorithme de mesure de distance [Wybo 00]	155
Figure 93 : Principe de comparaison de la mesure de distance [Wybo 00]	156
Figure 94 : Principe de fonctionnement du module de détection d'obstacles	158
Figure 95 : Comparaison de la détection d'obstacles par radar seul (à gauche) et après fusion (à droite) [Steux 01]	158
Figure 96 : Exemple de fusion lidar / vidéo, les obstacles sont détectés par le lidar seulement	159
Figure 97 : Détection d'obstacles et de signalisation dans le cindynamètre	160
Figure 98 : Les repères caractéristiques de la détection de route.....	162
Figure 99 : Vue caméra d'une route de campagne.....	166
Figure 100 : Exemple de tracé de $I_v(u)$ pour une ligne blanche sur bitume foncé.....	167
Figure 101 : Résultats du filtrage de convolution pour plusieurs valeurs de la taille L	169
Figure 102 : Illustration de l'influence de la taille du filtre de convolution sur le signal filtré	169
Figure 103 : Tracé de la largeur d'un marquage en fonction de l'ordonnée dans l'image (unité=pixel, mesures issues d'images réelles).	171
Figure 104 : Principe d'application du filtre adaptatif.....	172
Figure 105 : Comparaison des effets du filtre adaptatif et du filtre de largeur constante	173
Figure 106 : Elaboration d'une mesure de confiance.	174
Figure 107 : Critère de surface pour des points oscillants autour d'une droite ; la courbe sera approchée par une droite.	175
Figure 108 : Critère de surface pour des points qui suivent un arc de courbure de même signe la courbe sera séparée en plusieurs segments.....	176
Figure 109 : Deux segmentations du même ensemble de points à seuils de surface différents	176
Figure 110 : Exemple de regroupement de 2 segments proches.....	177
Figure 111 : Illustration des variables du modèle de Dementhon (d'après [DeMenthon 90])	178
Figure 112 : Paramètres représentant la route	180
Figure 113 : Résultats de simulation à roulis, tangage et lacet nuls (cas 1).....	183
Figure 114 : Erreurs de reconstruction sans échantillonnage.....	183
Figure 115 : Erreurs de reconstruction avec échantillonnage	184
Figure 116 : Résultats de simulation avec les paramètres du cas 2.....	185
Figure 117 : Erreurs de reconstruction sans échantillonnage (cas 2).....	185
Figure 118 : Erreurs de reconstruction avec échantillonnage (cas 2)	186
Figure 119 : Résultats de simulation avec les paramètres du cas 3.....	187
Figure 120 : Erreurs de reconstruction sans échantillonnage (cas 3).....	187
Figure 121 : Erreurs de reconstruction avec échantillonnage (cas 3)	188
Figure 122 : Erreur de 5%	189
Figure 123 : Erreur de 10%	189

Figure 124 : Erreur de 20%	190
Figure 125 : Erreur de 50%	190
Figure 126 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement (cas 1)	191
Figure 127 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement (cas 2)	192
Figure 128 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement (cas 3)	192
Figure 129 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (5%)	193
Figure 130 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (10%)	193
Figure 131 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (20%)	194
Figure 132 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (50%)	194
Figure 133 : Changement d'orientation des droites de traverse avec roulis	196
Figure 134 : Route à roulis nul et courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ superposées	197
Figure 135 : Route non nul (0.5°) et courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ superposées	197
Figure 136 : Route à roulis non nul (1°) et courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ superposées	198
Figure 137 : Route avec $\Theta=5^\circ$ et superposition de la courbe $\Delta u_{\alpha=5^\circ}$ ($k_u=k_v$)	198
Figure 138 : Illustration de la méthode de détermination du point de fuite	199
Figure 139 : Modules nécessaires à l'obtention de la forme de la route par le cindynamètre	201
Figure 140 : Niveau perception et compréhension du cindynamètre	202
Figure 141 : Architecture de l'algorithme de prédiction de trajectoires	209
Figure 142 : Fonctions d'appartenance liées à l'accélération du véhicule	210
Figure 143 : Fonctions d'appartenance liées au rayon de courbure de la trajectoire	211
Figure 144 : Possibilité de changement de route à une intersection	213
Figure 145 : Schéma représentatif du réseau d'inférence	214
Figure 146 : Illustration des trajectoires possibles pour un virage à droite	216
Figure 147 : Représentation 3D d'une densité D_{p_i}	218
Figure 148 : Densité de probabilité totale en (a, ρ) calculée pour la Figure 146	219
Figure 149 : Géométrie utilisée pour passer de (a, ρ) à (x, y)	220
Figure 150 : Densité de probabilité de présence à $t=t_0+0.1s$ appliqué à la Figure 146	221
Figure 151 : Densité de probabilité de présence à $t=t_0+1s$ appliqué à la Figure 146	221
Figure 152 : Principe de la prise en compte des prédictions précédentes	222
Figure 153 : Exemple de trajectoires présentant un risque de collision	228
Figure 154 : Principe de la prise en compte de la taille de l'obstacle	231
Figure 155 : Schéma du principe de création des cartes annexes de direction	233
Figure 156 : Schéma de principe du calcul du risque de collision au cours du temps	233
Figure 157 : Module de calcul du risque dans le cindynamètre	234
Figure 158 : Plan et évolution de la situation d'accident (d'après [Van Elslande 92])	235
Figure 159 : Simulation de la situation d'accident	236
Figure 160 : Calcul du risque de perte de contrôle par perte d'adhérence	237
Figure 161 : Calcul du risque de sortie de route	237
Figure 162 : Module de calcul du risque de sortie de route dans le cindynamètre	238
Figure 163 : Schéma de principe du fonctionnement du module d'alerte de trajectoire illégale	239
Figure 164 : module de contrôle du respect de la réglementation dans le cindynamètre	240
Figure 165 : Implantation de l'IHM dans le cindynamètre	243
Figure 166 : Exemple d'affichage de l'IHM du cindynamètre	250
Figure 167 : Rappel de l'architecture générique d'un cindynamètre	254
Figure 168 : Rappel des statistiques d'accidents de la route de 1987 à 2007	254
Figure 169 : Rappel de l'architecture détaillée du cindynamètre appliqué à l'automobile	255
Figure 170 : Rappel du principe du calcul du risque de collision avec un obstacle	256
Figure 171 : Rappel de l'interface visuelle proposée pour le cindynamètre	257
Figure 172 : Principe de calcul du TLC	259

Figure 173 : Situation typique posant problème pour le calcul de distance.....	261
Figure 174 : Architecture logique de la détection d'obstacles avancée	261
Figure 175 : Illustration des mécanismes additionnels de filtrage des obstacles	262
Figure 176 : Principe d'attribution de voie aux obstacles	262
Figure 177 : Exemple d'attribution des voies de circulation (véhicule dans la voie).....	263
Figure 178 : Exemple de l'attribution des voies de circulations (voie de circulation libre)...	263
Figure 179 : Détermination des marges de distance latérale grâce à la détection de la route	265
Figure 180 : Illustration de l'échelle INES [ASN].....	281
Figure 181 : Schéma du réacteur TMI-2 [NRC]	282
Figure 182 : Vue de situation des îles Canaries	287
Figure 183 : Plan de situation de l'aéroport de Los Rodeos et trajectoire des deux appareils.	288

PREAMBULE

Le travail présenté dans ce document a été réalisé en grande partie entre 2000 et 2003 au sein du centre de Robotique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris dans le cadre d'un contrat de collaboration ARMINES – Fondation MAIF portant sur la conception d'un système d'aide à la conduite automobile par mesure du risque.

Durant cette période j'ai aussi été amené à collaborer aux sujets de thèse de nombreux doctorants, principalement Bruno Steux (détection de véhicule par approche multi capteurs – thèse soutenue en 2001), Pierre Coulombeau (détection des marquages routiers pour la reconstruction tridimensionnelle de la route – thèse non soutenue) et Alexandre Revue (utilisation des systèmes d'information géographique pour l'amélioration de la sécurité routière – thèse soutenue en 2003). Le manuscrit présenté ici utilise donc certains résultats obtenus au travers de ces collaborations.

Je continue depuis mon travail de recherche dans le domaine de la sécurité automobile sur des sujets connexes au sein du département ITS (Systèmes de Transports Intelligents) de la société IMRA Europe SAS. Ce travail a donné lieu à de nombreuses publications (cités dans le manuscrit) et brevets sur des sujets proches du sujet de ce manuscrit. Ainsi, certains des résultats présentés ici proviennent-ils des travaux réalisés depuis 2003.

Le concept d'aide à la conduite de systèmes à risques proposé dans ce manuscrit s'appuie sur la compréhension par le système d'aide de l'état actuel du système conduit, de son environnement et de son conducteur. Sa réalisation présente ainsi comme nous le verrons par la suite de très nombreuses difficultés technologiques qu'il est nécessaire de surmonter :

- Comment comprendre l'état de l'environnement du système et son influence sur le conducteur et le système lui-même?
- Comment comprendre l'état d'esprit d'un conducteur de systèmes à risques?
- Comment prédire l'évolution de l'état du système à suffisamment long terme pour permettre l'évitement d'accidents?
- Comment amener le conducteur à effectuer les manœuvres d'urgence requises?

Le manuscrit offre des réponses à certaines de ces difficultés et propose des solutions plus ou moins évoluées pour les autres mais ceci ne nous a malheureusement pas permis de vérifier la véracité de notre proposition initiale : "il est possible de réduire le risque d'accident d'un système à risques en donnant au conducteur une information sur les risques encourus à tout moment en fonction de l'état du système, de son environnement et des actions du conducteur".

Ce manuscrit s'apparente donc à la première partie de la réalisation du système en présentant tout d'abord les raisons de la nécessité d'un tel système, les fondements théoriques de celui-ci puis un plan pour la réalisation du système dont certains composants sont déjà développés et présenté ici. Il pourra donc être utilisé comme un guide pour la réalisation finale du système.

INTRODUCTION

Chaque activité humaine se base sur une prise de risques a priori maîtrisés pour parvenir à un haut niveau de performances en relative sécurité. Cet attrait pour la performance au prix d'une certaine prise de risques apparaît évidente au travers d'activités aussi variées que l'énergie nucléaire (qui nécessite rappelons-le de maîtriser la réaction de fission nucléaire à l'origine des bombes d'Hiroshima et de Nagasaki), le transport aérien (consistant à faire voler des personnes et des marchandises dans des mobiles plus lourds que l'air) ou encore, plus près de nos préoccupations quotidiennes, dans la conduite automobile.

Ces systèmes que l'on appelle "à risques" jouent un rôle fondamental dans notre vie quotidienne. Qui serait en effet prêt à se passer aujourd'hui de la possibilité de franchir les océans en quelques heures à peine grâce à l'avion. De même, pourrions-nous nous passer de la disponibilité d'une électricité peu chère et abondante alors même que les énergies fossiles s'épuisent, que leur rôle dans l'augmentation de l'effet de serre est dénoncé de plus en plus et que les autres énergies dites "renouvelables" n'offrent pas encore une disponibilité suffisante. Enfin, pourrions-nous nous passer de la voiture, ce mode de transport si pratique nous permettant de nous rendre à peu près n'importe où chaque fois que le cœur nous en dit. Si ces systèmes ont pu prendre une telle importance dans nos vies, c'est qu'ils sont désormais suffisamment sûrs pour être acceptables par la majorité. On imagine en effet assez mal l'opinion publique accepter de payer le prix de l'énergie nucléaire si celui-ci impliquait de subir une catastrophe comparable à Tchernobyl ou Three Miles Island chaque mois. De même, très peu de personnes se risqueraient à prendre l'avion si la catastrophe de Tenerife se reproduisait chaque année. Qu'en serait-il alors de la conduite automobile si prendre la voiture était aussi risqué que d'escalader le mont Everest?

La sécurisation des systèmes à risques s'est faite progressivement, à mesure que la technologie progressait et que les réglementations et les organisations s'amélioraient pour limiter au maximum le risque résiduel de ces activités. Ces améliorations se sont faites, outre par les améliorations des technologies et de l'ingénierie des systèmes, par la recherche en sécurité et l'analyse des accidents passés.

Les systèmes à risques ont ainsi atteint des niveaux de performances et de sécurité inégalés permettant leur opération à grande échelle hors du contexte recherche/inventeur. Cependant, ces systèmes restent toujours dangereux comme l'ont prouvé les récents accidents d'avion (Crash du vol AF358 à Toronto en 2005 ou plus récemment crash du vol BA38 à Londres en Janvier 2008 ou du vol Spanair à Madrid fin Août), les incidents sur des centrales nucléaires (comme la série d'incidents sur le site nucléaire de Tricastin décelés en Juillet 2008 ayant conduit au rejet de plusieurs dizaines de kilos de matières radioactives dans l'environnement) ou les nombreux accidents de voitures dont les plus graves nous parviennent par le biais des médias.

Au travers de l'analyse de ces accidents, incidents et presque accidents, les chercheurs en sécurité des systèmes ont mis en exergue le rôle prépondérant que joue l'opérateur humain dans ces accidents. L'erreur humaine (prise au sens d'une décision prise par un opérateur humain ayant eu un impact négatif sur la survenue d'un accident) est ainsi identifiée dans la plupart des accidents comme cause principale ou aggravante.

Face à ce constat nous proposons dans ce manuscrit d'aider à réduire encore davantage les risques de ces systèmes (tout en gardant à l'esprit que le risque zéro n'existe pas et n'est pas atteignable) en aidant leurs opérateurs à mieux percevoir et comprendre les risques encourus et leurs origines en fonction de leurs actions. Cette aide nous paraît pertinente car elle permettrait à l'opérateur de s'apercevoir d'une erreur avant que celle-ci ne le mette lui ou le système en danger. Elle permettrait de plus à l'opérateur de s'apercevoir qu'une combinaison de petits écarts à la norme effectués par habitude (et qui pris indépendamment ne présentent aucun risques) peut avoir de lourdes conséquences s'ils ne sont pas corrigés à temps. Enfin, on peut concevoir qu'une telle aide permettrait d'améliorer la formation initiale des opérateurs en les aidant à détecter des erreurs potentiellement graves jamais rencontrées auparavant.

Nous proposons ainsi une sorte de copilote dont nous proposons une architecture générique applicable pour la plupart des systèmes à risques. Afin de rendre ce système plus concret qu'un simple concept générique, nous explicitons ensuite ce système dans le cadre de la conduite automobile. Le choix de cette activité comme domaine d'application nous est apparu comme le plus prometteur compte tenu de l'impact beaucoup plus visible à court terme qu'un tel système pourrait avoir (la conduite automobile présente en effet un risque d'accident beaucoup plus important que le domaine nucléaire civil ou l'aviation commerciale et est utilisée par beaucoup plus d'opérateurs).

Dans le Chapitre I nous présenterons tout d'abord ce qu'est un système à risques et comment un tel système tend à évoluer "naturellement" vers un système dit "ultra-sûr" (tout en restant toujours un système à risques) au travers des exemples de l'énergie nucléaire, de l'aviation commerciale et du transport ferroviaire. Nous verrons également dans l'exemple de la conduite automobile le cas d'un système à risques n'ayant pas encore atteint le stade "ultra-sûr". Au travers de cette évolution et d'exemples d'accidents et de catastrophes ayant touché ces systèmes, nous verrons apparaître le rôle joué par l'homme dans l'apparition de ceux-ci, même dans des systèmes "ultra-sûrs".

Nous nous intéresserons alors dans le Chapitre II aux mécanismes cognitifs amenant l'opérateur humain à provoquer involontairement ces accidents par ses erreurs ou ses tolérances à des écarts aux normes de conduite en place afin de simplifier sa tâche ou d'augmenter la productivité du système. Nous nous baserons pour ce faire sur les travaux de Reason, Hollnagell, Amalberti, Endsley...

Ces deux premiers chapitres nous conduiront alors naturellement à formuler dans le Chapitre III l'hypothèse selon laquelle la perception correcte et réaliste du risque par l'opérateur est la clé de la sécurité des systèmes à risques. Nous proposerons ainsi un système d'aide au pilotage de ces systèmes basé sur l'information aux opérateurs du niveau de risque courant et de ses sources afin d'inciter l'opérateur à corriger de lui-même la conduite du système pour supprimer ces risques. Nous baptiserons ce système cindynomètre pour montrer le rôle premier de ce système visant à mesurer le danger d'une situation. Nous présenterons ensuite l'architecture d'un tel système appliqué à la conduite automobile.

Dans les Chapitres IV à VI nous présenterons plus en détail l'architecture de ce système d'aide à la conduite dans le contexte automobile. Le Chapitre IV sera consacré à une étude des capteurs et prétraitements associés nécessaires à la perception de la situation de conduite. Dans le Chapitre V nous nous intéresserons à la compréhension de la situation de conduite au travers des traitements effectués sur les données captées afin d'en extraire les informations utiles sur l'état du véhicule, le comportement du conducteur ou l'environnement proche du véhicule. Enfin le Chapitre VI présentera la façon dont sont utilisées ces informations pour prédire et calculer les risques encourus par le conducteur et son véhicule.

Le Chapitre VII s'attachera à montrer le besoin d'une interface homme machine pour ce système de manière à pouvoir informer le mieux possible le conducteur mais aussi à lui laisser la possibilité d'adapter le niveau d'alerte du système à son propre ressenti de la situation. On étudiera alors les contraintes de réalisation qui y sont associées ainsi que les options offertes pour sa réalisation.

Nous concluons enfin ce manuscrit en présentant les premières applications réalisées en rapport avec le cindynomètre dans l'automobile, les développements restants pour réaliser un système complet dans l'automobile puis nous verrons quelles perspectives s'ouvrent au système aussi bien dans le domaine automobile que pour d'autres domaines et systèmes ultra-sûrs.

CHAPITRE I – SYSTEMES A RISQUES, EVOLUTION VERS DES SYSTEMES ULTRA-SURS

L'histoire de l'humanité est ponctuée de catastrophes ayant marqué les esprits et la conscience populaire. Avant l'ère industrielle, ces catastrophes étaient principalement dues à des causes naturelles. Ainsi, l'explosion du Vésuve en l'an 79 conduisit à la destruction des villes de Pompéi et Herculaneum alors que le grand tremblement de terre de 1755, décrit par Voltaire dans *Candide*, détruisit la ville de Lisbonne à plus de 85%. Ces catastrophes d'origine naturelles n'étaient pas contrôlables par l'homme et furent souvent considérées comme des punitions divines. De telles catastrophes surviennent encore à ce jour (tsunami du 26 Décembre 2004 dans le Sud Est asiatique, tremblement de Terre du 8 Octobre 2005 au Cachemire, ...) et coûtent encore plusieurs milliers de vies chaque année. Malgré les avancées scientifiques et technologiques, ces catastrophes restent toujours difficilement prévisibles et entraînent inmanquablement leur lot de destructions et de morts, d'autant que les populations se sont densifiées avec l'accroissement régulier de la population dans des zones soumises à de tels risques. Néanmoins, depuis l'avènement de l'ère industrielle, un nouveau type de catastrophes s'est rajouté à ces événements naturels.

En effet, depuis l'apparition des systèmes industriels (notamment les mines et les usines chimiques) et du transport mécanisé, de très nombreux accidents aux conséquences plus ou moins dramatiques ont eu lieu. Ces accidents, parfois catastrophiques, coûtent encore à ce jour plus de vies annuellement que toutes les catastrophes naturelles à l'échelle mondiale même si leur impact psychologique est souvent moindre. On se réfère ainsi à ces systèmes humains qui présentent des risques pour leurs opérateurs et leurs environnements comme des "**systèmes à risques**".

I - 1. Systèmes à risques

Les systèmes à risques sont comme nous l'avons dit liés à des activités humaines présentant un risque direct pour leurs opérateurs ou leurs environnements. Une telle définition permet d'englober à la fois les pratiques sportives dites extrêmes (escalade, parapente...), les activités industrielles (industrie chimique et pétrolière, mines, industrie nucléaire...), les pratiques médicales (chirurgie, anesthésie...) ainsi que les activités de transports (aviation civile, transport aérien, automobile...). Chacune de ces activités présente des risques divers ainsi que des causes d'accidents variées mais toutes présentent des risques forts. L'existence de ces risques a conduit ces systèmes à évoluer "naturellement" vers plus de sûreté comme le montre les exemples suivants des transports aérien et ferroviaire et de l'énergie nucléaire.

I - 1. 1. Le transport aérien

Le 17 Décembre 1903, à Kitty Hawk en Caroline du Nord, les frères Wright volaient pour la première fois un engin motorisé plus lourd que l'air et piloté par un homme, le Wright Flyer I. Ce premier vol de seulement 12 secondes et quelques dizaines de mètres à bord d'un appareil tenant plus du planeur que de l'avion tel que nous le concevons aujourd'hui (voir Figure 1) inaugurait l'air de l'aviation.

Un peu moins de 5 ans plus tard, le premier accident d'avion mortel de l'histoire survenait lorsque le Wright Flyer III s'écrasait au sol suite à une défaillance mécanique coûtant la vie au Lieutenant Thomas E. Selfridge lors d'une démonstration à l'armée américaine. Cette accident, dû à la rupture d'une des pales d'une hélice de l'avion montre à quel point la fiabilité de ces premiers appareils en limitait l'utilisation à quelques pionniers n'hésitant pas à risquer leur vie pour réaliser d'improbables exploits. Ainsi moins d'un an plus tard, le 25 Juillet 1909, Louis Blériot réalisait la première traversée de la Manche à bord d'un Blériot XI (Figure 2).

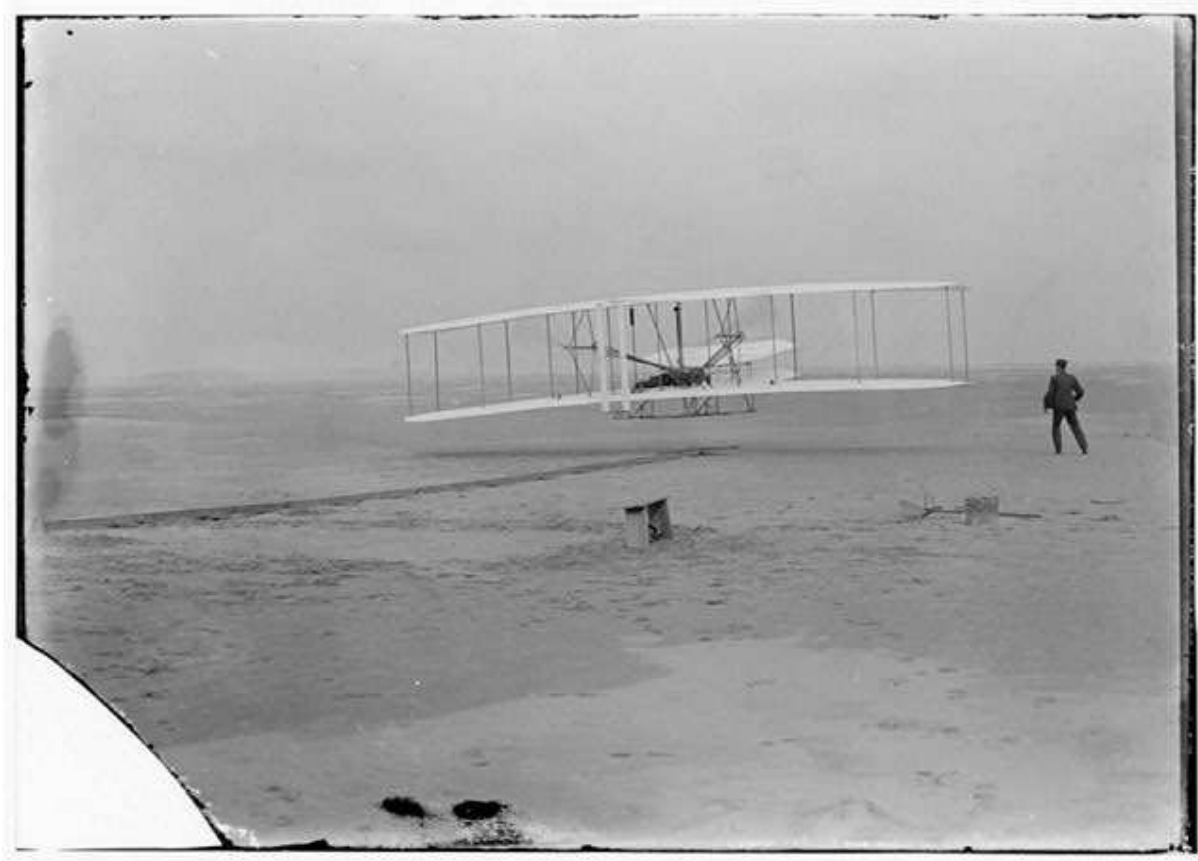


Figure 1 : Photo du premier vol du Wright Flyer I par John T. Daniels

Les progrès tant dans la conception des avions que dans la puissance et la fiabilité de leur moteur entraînaient un développement considérable de l'aviation qui connaissait ses premières heures de gloire lors de la Première Guerre Mondiale durant laquelle les exploits des pilotes jouaient un rôle autant stratégique (reconnaissance des positions ennemies et attaques derrière les lignes) que patriotique (permettant à la presse de faire oublier le coût des opérations terrestres). A l'issue de cette guerre, profitant de la disponibilité de nombreux avions ainsi que de leur expérience, de nombreux pilotes se lançaient à la poursuite d'exploits tels que la traversée de l'Atlantique ou en 1919 la jonction aérienne entre l'Angleterre et l'Australie démontrant ainsi les possibilités de l'avion pour les voyages longues distances.

Dès lors les premières compagnies aériennes furent créées afin de transporter les premiers passagers mais surtout le courrier, beaucoup plus rentable à l'époque. L'entre deux guerres voit alors l'explosion du transport aérien dans le monde grâce à la création d'avions plus gros, plus rapides et capables de transporter plus de fret et de passagers. Cependant, la sécurité aérienne n'est pas encore la priorité et l'on recense de nombreux accidents mortels chaque année à mesure que le transport aérien augmente.

La Seconde Guerre Mondiale marque l'avènement de l'avion comme arme de supériorité sur tous les fronts (avancée militaire allemande en 39-40 grâce à la supériorité de la Luftwaffe, attaque de Pearl Harbour et bataille de Midway sur le front naval). Elle confirme aussi l'utilité de l'avion pour transporter personnels et matériels rapidement sur de longues distances, ouvrant ainsi la voie au transport de masse de passagers. Elle amène aussi de nouvelles avancées technologiques (comme le radar par exemple) qui permettront par la suite des vols plus sûrs en toutes conditions météo.

En Novembre 1944, lors de la convention de Chicago, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale est créée "*pour promouvoir la coopération internationale et le maximum d'uniformité dans les réglementations et les normes, ainsi que les procédures et les structures de l'aviation civile*" [OACI]. Au cours de cette conférence étaient posées les bases de la navigation aérienne qui contribuerait grandement à l'amélioration de la sécurité aérienne.

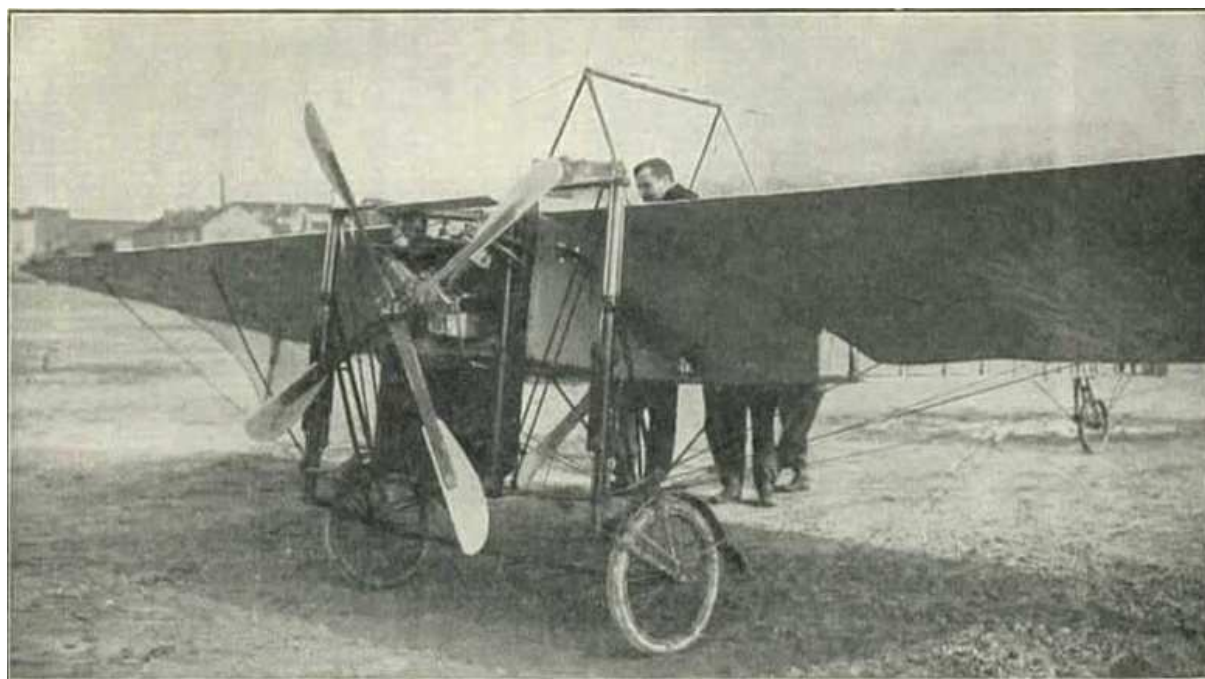


Figure 2 : Louis Blériot à bord du Blériot XI ayant survolé la manche

A partir de cette conférence, l'aviation civile se trouvait contrôlée par un organisme central permettant l'homogénéisation des comportements, des procédures et des contrôles. L'augmentation parallèle de la capacité d'emport des avions et la démocratisation de ce moyen de transport amenaient alors à une augmentation de la sécurité en réponse à l'inquiétude croissante du public face aux accidents et à leurs conséquences. Cette amélioration de la sécurité était obtenue par l'analyse fine des différents accidents permettant ainsi d'améliorer la sécurité des vols en permettant d'identifier les causes des accidents et d'en extraire des contre-mesures efficaces pour l'ensemble des autres vols qui pourraient en profiter.

Le De Havilland Comet [Comet], premier avion de ligne à turbo-réacteurs, mis en service pour la première fois en 1952 fut ainsi tristement célèbre à cause d'une série d'explosions en plein vol entre 1952 et 1954 qui conduisirent à la suspension de l'autorisation de vol de toute la flotte de ces modèles. Une enquête minutieuse à la suite du dernier crash détermina ainsi que la cause la plus probable de ces accidents était due à la conception de l'avion et en particulier à la forme rectangulaire des hublots. Les contractions et dilatations dues aux changements de pression très importants subis par la carlingue au cours d'un vol entraînaient ainsi une fatigue du fuselage beaucoup plus rapide que prévue au niveau des coins des hublots. Cette usure prématurée pouvait ainsi entraîner une rupture du fuselage menant à une décompression explosive et à la perte totale de l'appareil. Cette série de crashes aériens permit ainsi aux constructeurs de mieux appréhender les problèmes liés aux contraintes subies par la structure de l'appareil au cours des vols et ainsi de mieux concevoir leurs appareils. Cette catastrophe vit aussi l'adoption généralisée des hublots ronds ou ovales dans la conception des fuselages afin de limiter les contraintes.

L'exemple du Comet montre ainsi comment des améliorations techniques sont nées d'accidents aériens et ont permis aux constructeurs aéronautiques d'améliorer la conception de leurs avions. Néanmoins, l'amélioration de la sécurité du transport aérien ne s'est pas faite uniquement grâce à de tels progrès techniques. Le retour d'expérience obtenu par l'analyse des accidents a ainsi contribué à l'amélioration et à l'uniformisation des procédures régissant le monde aéronautique. La catastrophe de Tenerife en 1977 a ainsi conduit, après analyse des causes de l'accident (voir Annexe B), à revoir en profondeur les procédures de communications avec le contrôle aérien ainsi qu'entre les différents membres d'équipage.

Cette mise en commun du retour d'expérience couplée à l'amélioration continue des techniques de construction et de la fiabilité des composants a amené l'aviation commerciale à être le moyen de transport le plus sûr au monde aujourd'hui (du moins dans les pays occidentaux et le Japon). La Figure 3 montre ainsi cette amélioration de la sécurité au travers de l'évolution du taux d'accidents mortels en Amérique du Nord et dans le reste du monde depuis 1959. Le taux d'accidents mortels est ainsi actuellement proche de 1 pour 10 millions de départs en Amérique du Nord (niveau comparable au niveau en Europe de l'Ouest).

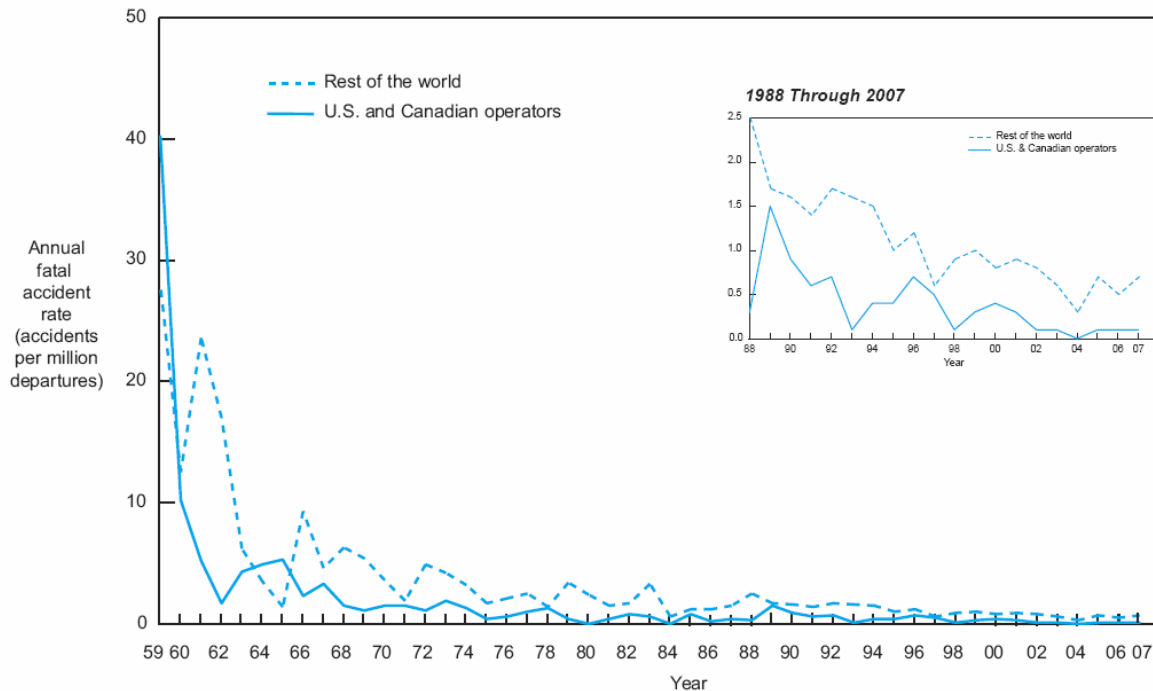


Figure 3 : Evolution du taux d'accidents mortels dans le transport aérien en Amérique du Nord et dans le monde de 1959 à 2007 (d'après [Boeing 08]).

I - 1. 2. L'énergie nucléaire

La découverte en 1896 par Becquerel du phénomène de la radioactivité allait permettre très rapidement la découverte de l'une des sources d'énergies les plus puissantes disponibles. Confinées aux laboratoires de physiques au cours du début du XX^e siècle, les recherches sur les utilisations de l'énergie nucléaire allaient bénéficier de la Seconde Guerre Mondiale pour prospérer. La découverte par Fermi en 1934 de la fission nucléaire puis les expériences de scientifiques Allemands en 1938 prouvant la possibilité de créer une réaction de fission par un bombardement de neutrons conduirent de nombreux scientifiques dans le monde à entrevoir la possibilité d'exploiter cette énergie.

La fuite de nombreux physiciens et chimistes européens en Angleterre et aux Etats-Unis devant la politique nazie ainsi que leur inquiétude face à la possibilité qu'Hitler utilise cette puissance à des fins militaires (exposée dans la fameuse lettre commune d'Einstein et Szilard au président Roosevelt du 11 Octobre 1939) conduisit à la mise en place aux Etats-Unis du projet Manhattan qui mènerait par la suite à la création des premières armes atomiques mais aussi aux premières piles nucléaires, ancêtres des réacteurs nucléaires actuels. Dans le même temps l'Allemagne développait elle aussi son propre programme nucléaire.

Alors que CP-1¹, la première pile nucléaire, ancêtre des réacteurs nucléaires actuels, développée dans le cadre du projet Manhattan atteint la criticité en Décembre 1942, le premier accident nucléaire de l'histoire eu lieu à Leipzig lors de l'incendie et de l'explosion de la pile atomique expérimentale Leipzig L-IV. D'autres accidents liés à des erreurs de manipulations et à la création accidentelle de masses super critiques eurent encore lieu dans les années 40. Cependant ces accidents n'eurent pas de conséquences hors du cadre des laboratoires.

¹ Chicago Pile-1, nom de la première pile nucléaire à avoir généré une réaction de fission nucléaire auto entretenue le 2 Décembre 1942 à Chicago.

L'explosion, en 1952, de la centrale expérimentale NRX de Chalk River au Canada détruisit l'enceinte de confinement du réacteur et contamina l'environnement proche. Elle devint ainsi la première centrale nucléaire à subir un accident majeur. L'explosion d'une usine de retraitement dans le complexe nucléaire de Kyshtym en URSS (classée 6 sur l'échelle INES [ASN]) et l'incendie de la centrale de Sellafied en Grande-Bretagne (classé 5 sur l'échelle INES) en 1957 entraînèrent de graves rejets de matières radioactives qui contaminèrent les populations alentours. Ces accidents démontraient ainsi le risque pour les populations alentour de l'industrie nucléaire.

Les améliorations technologiques et les nouvelles générations de réacteur entraînaient l'amélioration de la sécurité dans les centrales. L'apparition du concept de défenses en profondeur destinées à contenir les effets d'un accident par le biais de la multiplication des systèmes de sécurité. Dans le même temps des changements institutionnels, tels que le remplacement en 1974 aux Etats-Unis de l'AEC (agence originellement destinée à promouvoir l'industrie nucléaire tout en la contrôlant provoquant ainsi d'évidents conflits d'intérêts) par la NRC (organisme destiné au seul contrôle des installations nucléaires et à l'établissement des règles de sécurité), amenaient à un plus grand contrôle des installations nucléaires.

L'accident de la centrale de Three Miles Island aux Etats Unis le 28 Mars 1979 rendit le risque nucléaire beaucoup plus réel pour le public bien que cet accident n'ait pas eu de retombées majeures à l'extérieur de la centrale. L'analyse de cet accident (résumé en Annexe A) permit d'identifier le rôle majeur joué par l'opérateur humain et amena ainsi à de nombreux changements (voir section A - 4) dans la politique de sécurité des centrales nucléaires aux Etats-Unis mais aussi en Europe. La catastrophe de Tchernobyl qui a touché une grande partie de l'Europe par ses retombées radioactives a depuis considérablement amplifié la pression de l'opinion publique sur les autorités pour contrôler la sécurité nucléaire dans le monde, menant même par endroit à l'abandon progressif de cette source d'énergie.

Cette pression s'exprime aujourd'hui par le rejet de l'installation de nouvelles centrales nucléaires. Cependant l'industrie nucléaire reste aujourd'hui l'une des plus sûres au monde et n'a connu finalement que très peu d'accidents graves. Aujourd'hui, on estime que la probabilité d'un accident grave entraînant l'endommagement du cœur d'un réacteur est de l'ordre de 5.10^{-5} par année de fonctionnement et par réacteur ([Leurs 03] page 141).

I - 1. 3. Le transport ferroviaire

De la première locomotive à vapeur créée en 1804 aux trains à grande vitesse actuels tels le TGV, le Shinkansen ou le MagLev, le transport ferroviaire a connu en l'espace de deux siècles de profondes transformations. Ici encore, comme pour l'aviation commerciale, d'immenses progrès ont été faits en matière d'efficacité, de vitesse et de sécurité au cours de cette évolution.

A l'origine mu par des chevaux et destiné aux transports de matières premières entre les gisements et les ports ou villes, le transport ferroviaire prit véritablement son essor avec l'invention du moteur à vapeur haute pression et son application aux premières locomotives dès 1804 par Trevithick. Cette invention démontra en effet qu'il était possible grâce à elle de déplacer de façon autonome un nombre important de wagons. Ainsi, le 21 Février 1804, la première locomotive à vapeur de l'histoire transporta-t-elle 10 tons de fer, 5 wagons et 70 personnes entre Penydarren et Abercynon (Royaume-Uni), soit environ 16 km, en un peu plus de 4 heures [Trevithick].

De nombreux inventeurs, ayant perçus tout l'intérêt de ce nouveau mode de transport, allaient alors proposer leur propre prototype de locomotives à vapeur et en faire la démonstration. Le "Steam Horse" de Brunton, construit en 1813, proposait ainsi une locomotive dotée de "pieds" qui poussaient la locomotive comme le montre la Figure 4. Cette locomotive de conception originale reste cependant plus connue comme ayant subi le premier accident majeur du transport ferroviaire puisque l'explosion de sa chaudière au cours d'une démonstration entraîna la mort de 16 personnes (pour la plupart des spectateurs) en 1815 [SteamHorse].

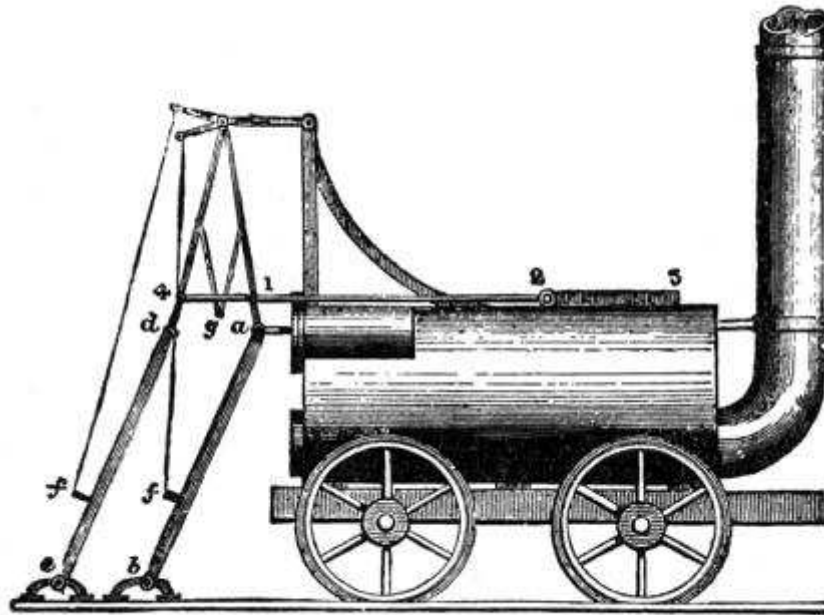


FIG. 1. BRUNTON'S TRAVELLER, 1813.

Figure 4 : Schéma de la "Steam Horse" de Brunton (d'après [SteamHorse])

Ce premier accident mortel été lié à la jeunesse de la technologie du moteur à vapeur haute pression et au manque d'expérience des concepteurs quant à la résistance des matériaux à ces hautes pressions. D'autres accidents similaires (mais néanmoins moins graves) allaient ainsi survenir dans les années suivantes sur d'autres prototypes de locomotives. Ces accidents allaient amener l'introduction des soupapes de sécurité dans les nouveaux modèles de locomotives les rendant ainsi plus sûres.

Dans le même temps la conception des moteurs allait progresser afin de rendre les locomotives plus puissantes et plus rapides. Ainsi, la "Rocket" de Stephenson, connue comme la première locomotive moderne, réussit-elle à tracter 13 tonnes sur 80 kilomètres à une moyenne de 19 km/h en 1829 [Rocket]. Cette locomotive allait alors entrer en service sur la ligne ferroviaire entre Manchester et Liverpool, première ligne ferroviaire dédiée au transport de passagers entre 2 villes. L'inauguration de cette ligne le 15 Septembre 1830 allait de plus connaître l'un des premiers incidents voyageurs lorsque la "Rocket" percuta un passager d'une autre rame descendu sur la voie pour la voir passer.

De nombreux autres accidents allaient suivre, à mesure que le train se développait dans le monde, du fait du manque de fiabilité des mécaniques ou d'un manque de réglementation. Ainsi, le 11 Août 1837, eu lieu la première collision frontale entre deux trains à Suffolk, Etats-Unis. 5 ans plus tard, la catastrophe de Meudon coûtait la vie à 55 personnes lors du déraillement et l'embrasement des wagons qui s'en suivit. Cette catastrophe mit fin à la pratique alors généralisée en France de verrouiller les wagons passagers.

L'histoire du transport ferroviaire est ainsi jalonnée de nombreux accidents mortels tout au long du XIX^e et du début du XX^e siècle. La conception des premiers wagons en bois n'offre alors qu'une protection contre les mauvaises conditions météo mais se révèle particulièrement meurtrière en cas de collision (le bois éclatant se comportant comme du shrapnel comme l'a montré la catastrophe de Lagny-Pomponne en 1933) ou d'incendie. Le remplacement progressif au début du XX^e siècle de ces wagons par des wagons métalliques beaucoup plus résistants allait alors introduire d'autres problèmes comme le chevauchement (le wagon précédent passant au dessus du suivant et l'écrasant) ou la mise en portefeuille (les wagons s'écartent latéralement de l'axe du train en formant une sorte d'accordéon). Divers développements comme les systèmes anti-chevauchement ou la mise en place de zones de déformations contrôlées à l'extrémité des wagons allaient permettre de réduire l'impact des accidents entre trains.

Dans le même temps la réglementation et la gestion du trafic allaient progresser. Alors que dans les premiers temps le trafic était géré par les conducteurs eux-mêmes (en fonction de leur horaire et par le biais d'indicateurs lumineux installés aux extrémités des trains), l'augmentation de la masse et de la vitesse des trains (ainsi que de nombreux accidents dus à un oubli de signalisation) rendait progressivement cette méthode inutile. Une signalisation sur la voie était alors mise en place. Tout d'abord contrôlée manuellement, cette signalisation était rendue automatique dans la seconde moitié du XX^e siècle afin de la rendre moins sensible aux erreurs humaines. Les systèmes actuels tels que ceux équipant le TGV transmettent ainsi la signalisation dans la cabine afin de réduire le risque de non prise en compte des signalisations sur la voie (à 350 km/h le conducteur aurait d'ailleurs du mal à lire la signalisation) et un calculateur de bord ralentit ou arrête le train en cas de non prise en compte de la signalisation.

Aujourd'hui, dans les pays développés, le trafic ferroviaire est donc fortement automatisé. Il est de plus régulé de façon à ce que chaque train évolue dans une enveloppe de sécurité dans laquelle aucun autre train ne doit se trouver. Ce système conservateur permet d'éviter, sauf défaillance technique ou humaine, les collisions entre trains. De plus, les trains de conception récente tels que les TGV par exemple, sont conçus de façon à limiter au maximum les effets sur les passagers d'un déraillement ou d'une collision comme l'ont prouvé les déraillements de TGV ces dernières années².

On doit cependant rappeler que le risque lié au déplacement à très grande vitesse d'un train de plusieurs centaines de tonnes ne saurait être nul comme l'a prouvé la catastrophe d'Eschede en Allemagne le 3 Juin 1998. La rupture du bandage d'une roue entraîna le déraillement et la mise en portefeuille du train qui s'encadra sous un pont routier provoquant la mort de 101 personnes.

Enfin, les passages à niveaux continuent à représenter le risque majeur lié au transport ferroviaire comme l'ont montré les exemples récents de collision entre un train et un véhicule. La distance d'arrêt d'un train lancé à pleine vitesse se compte en effet en kilomètre soit bien plus que la distance de visibilité sur la voie dans la plupart des cas. La tendance est donc à la construction de lignes protégées (comme les lignes à grande vitesse du TGV ou les lignes utilisées par les trains à sustentation magnétique) et à la suppression des passages à niveaux restants sur l'infrastructure plus ancienne.

Malgré ces risques les trains modernes transportent plusieurs millions de voyageurs chaque année avec très peu d'accidents mortels par rapport au nombre de kilomètres parcourus. Le taux d'accidents par million de km relevé par l'EPSF en 2007 [EPSF 08] s'établit ainsi à 0.78 en comptabilisant collisions, déraillements, accidents à passages à niveaux... Le nombre de morts par million de km s'établit quand à lui à 0.16 et à 0.114 par milliards de voyageurs. Le train est ainsi en France l'un des moyens de locomotion les plus sûrs malgré les points noirs constitués par les passages à niveaux restants sur le réseau.

I - 2. Une évolution commune des systèmes à risques?

A travers les exemples précédents de systèmes à risques, on voit apparaître un schéma conducteur similaire de leur évolution depuis des systèmes peu performants, très peu sûrs et limités à quelques pionniers vers des systèmes extrêmement sûrs, bénéficiant de hautes performances et disponibles au plus grand nombre. Amalberti, [Amalberti 06], décrit ainsi une évolution en 3 phases des systèmes à risques, de leurs premiers prototypes jusqu'à l'état "final" de leur développement. On reprend ici cette décomposition résumée par la Figure 5.

² Quelques blessés légers uniquement ont été déplorés lors des déraillements à grande vitesse – jusqu'à 300 km/h – connus en 1992, 1993 et 2000. Il n'y a eu aucune mort recensée à bord d'un TGV lors d'une collision depuis 1988 et la collision entre un TGV et un camion sur un passage à niveau qui tua 2 personnes dans le train.

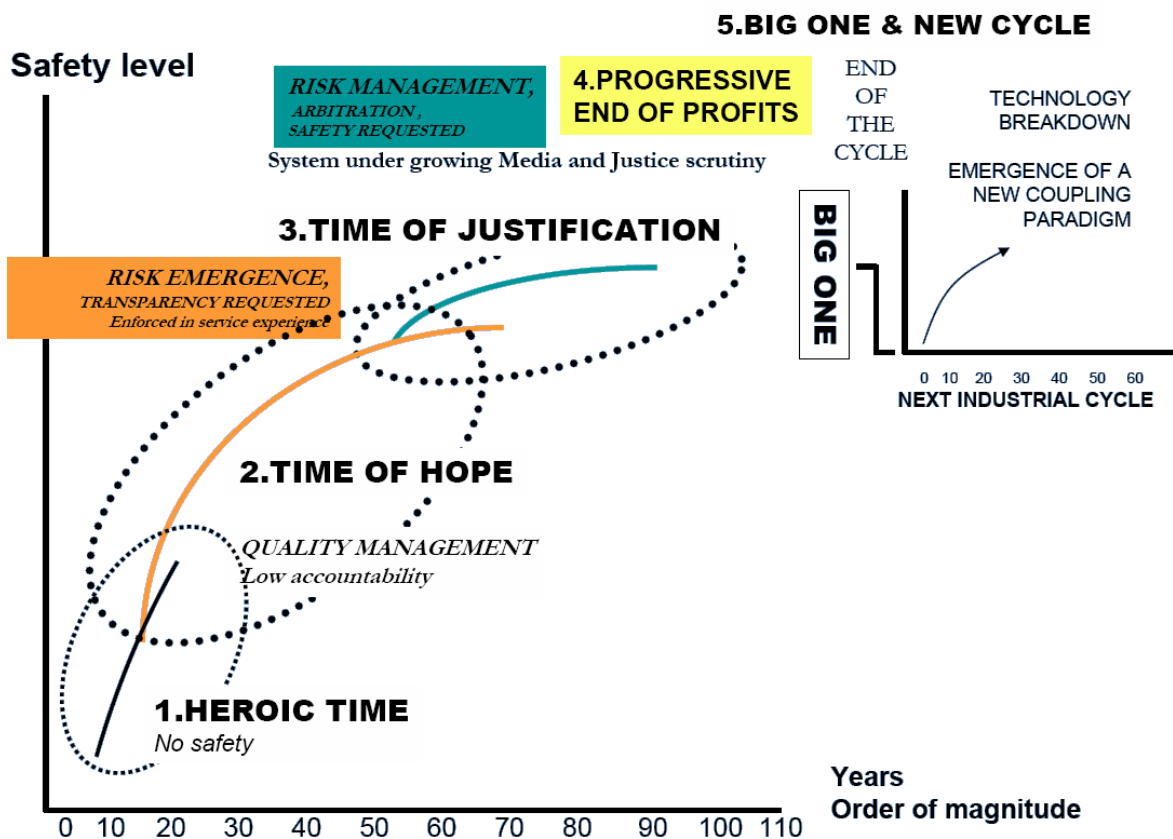


Figure 5 : Schéma générique de l'évolution des systèmes à risques, d'après [Amalberti 06]

I - 2. 1. Phase héroïque

Dans cette première phase menée par quelques pionniers, l'obtention de la fonction (se déplacer sans l'aide du vent ou d'animaux dans le cas du transport ferroviaire, voler pour l'avion ou générer de l'énergie contrôlée pour le nucléaire par exemple) est la principale motivation et la source de tous les progrès au détriment des risques encourus comme en témoigne les premiers accidents dramatiques subis par les pionniers de l'aviation. Au cours de cette phase la performance de ces systèmes augmente de façon quasi exponentielle grâce à de nombreux progrès techniques et à la multiplication des concepteurs de tels systèmes. La sécurité n'est alors que rarement considérée et les rares améliorations de sécurité sont plus souvent des effets secondaires bénéfiques de progrès techniques que des progrès véritablement recherchés. Cette phase entraîne la découverte par le grand public des possibilités de ces nouveaux systèmes et donc une forte demande.

I - 2. 2. Phase d'espérance

Cette deuxième phase du développement des systèmes à risques correspond à la période d'optimisation des systèmes. Cette phase, beaucoup plus longue que la phase héroïque, est liée aux besoins du public de bénéficier de ces systèmes à tout prix. On cherche alors à multiplier les performances et à rendre rentable ces systèmes. Le système à risque pénètre peu à peu dans la vie quotidienne du public. L'opinion publique, la presse et la justice sont alors désireuse de bénéficier de ces progrès et en acceptent le prix élevé en termes d'accidents en considérant que les prochains développements technologiques résoudront ces problèmes de sécurité. La performance des systèmes augmente alors toujours très rapidement alors que la sécurité progresse avec les nouvelles générations de systèmes et les nouveaux progrès techniques. Néanmoins, à mesure que le système devient plus sûr les exigences du public en termes de sécurité se font plus pressantes.

I - 2. 3. Phase de sécurité et apparition d'un nouveau cycle

Cette phase finale du développement du système découle de la demande croissante du public pour plus de sécurité. L'opinion publique a alors pris conscience de la dangerosité du système, souvent à la suite de nombreux accidents ou grandes catastrophes, et réclame des améliorations de sécurité. La justice et la presse s'emparent alors de chaque nouvel accident entraînant une forte pression sur les concepteurs pour améliorer la sécurité des systèmes. Ces améliorations passent alors à la fois par des améliorations techniques (zones de déformation dans les wagons de train pour réduire les conséquences d'une collision par exemple) ainsi que par une meilleure formation des utilisateurs/conducteurs des systèmes (formation des pilotes à la gestion d'événements rares comme les pannes moteurs) et par la multiplication de contraintes réglementaires (contrôles réguliers des pièces mécaniques d'un avion par exemple).

Cette dernière phase amène les systèmes à risques à devenir des systèmes extrêmement sûrs jusqu'à être dits "ultra-sûrs", tant l'accumulation de ces règles et dispositifs de sécurité réduit le risque lié à ces systèmes. Cependant l'accumulation de ces dispositifs de sécurité et de règles toujours plus strictes entraîne un ralentissement extrême de l'augmentation des performances de ces systèmes. On rentre alors dans un régime asymptotique dans lequel la performance des systèmes n'évolue quasiment plus. Le risque d'accidents extrêmement faible est néanmoins inacceptable aux yeux de l'opinion publique qui réclame réparation à chaque nouvel accident. Paradoxalement, cette pression légale paralyse les développements technologiques (étant donné que le concepteur d'une amélioration technique risque d'être attaqué si celle-ci mène à un accident). Le système ne peut alors plus véritablement évoluer sans une rupture technologique qui entraînera l'apparition d'un nouveau cycle. Le développement de la technologie de fusion nucléaire contrôlée au travers du projet ITER pourrait ainsi être le début d'un nouveau cycle de développement pour l'industrie nucléaire (bien qu'il soit probable que le public n'accepte que très peu d'accidents pour cette nouvelle technologie comme il l'a fait avec les réacteurs à neutrons rapides comme Super Phoenix).

I - 3. Mécanismes d'évolution des systèmes à risque

Les systèmes à risques progressent donc au cours de leur cycle de vie vers un équilibre entre performances et sécurité. La meilleure compréhension des mécanismes scientifiques mis en œuvre par le système (tels que les lois de la mécanique des fluides responsables de l'effet de portance par exemple), le développement de nouvelles technologies et leurs mises en œuvre pour le système (l'application du radar dans les avions par exemple) ainsi que la fiabilisation des pièces peuvent expliquer l'augmentation des performances des systèmes ainsi qu'une partie de leur évolution vers plus de sûreté (la réduction des défaillances mécaniques réduisant automatiquement le nombre d'accidents liés). Il existe cependant d'autres mécanismes qui mènent à cet équilibre entre performances et sécurité.

I - 3. 1. Changements dans la gestion du système

L'un des premiers mécanismes menant l'évolution des systèmes à risques provient des changements dans la façon de gérer ces systèmes. Amalberti, dans [Amalberti 05], propose ainsi 5 barrières organisationnelles à l'obtention d'une meilleure sécurité pour les systèmes à risques. Ces 5 barrières présentées dans la Figure 6 sont ainsi :

- **L'absence de limitations de performance** qui caractérise la phase héroïque des systèmes durant laquelle les acteurs des systèmes visent la performance maximale quelque en soit le prix. Cette barrière est franchie lorsque les acteurs acceptent d'augmenter les marges de sécurité et de limiter les performances du système en conséquence.
- **L'autonomie excessive des acteurs** qui caractérise là encore les premières phases des systèmes à risques. Les acteurs développent chacun leur propre prototype et ne partagent pas leur connaissances. Le rejet de cet individualisme permet de franchir cette barrière et d'augmenter encore la sécurité.
- **L'attitude d'artisan des acteurs** qui se considèrent uniques et meilleurs que les concurrents. Cette barrière ne peut être franchie sans accepter que les acteurs soient équivalents.
- **Protections ego centrées du système.** Chaque acteur du système se protège lui-même et rejette le risque résiduel sur les autres. L'acceptation de ce risque résiduel permet de franchir cette barrière.

- **Perte de visibilité du risque.** Cette dernière barrière caractérise les systèmes très sûrs dans lesquels le risque n'est plus tangible tant le risque d'accident est faible. Il convient alors de savoir remettre en question les succès obtenus en termes de sécurité et d'accepter de changer les stratégies utilisées pour atteindre plus de sécurité. On peut envisager cette barrière comme un minimum local du niveau de risque obtenu par certaines stratégies. Les acteurs peuvent alors choisir de ne rien remettre en cause et de conserver ce niveau de risque ou au contraire de remettre en cause leurs résultats courants pour atteindre un niveau plus bas de risque.

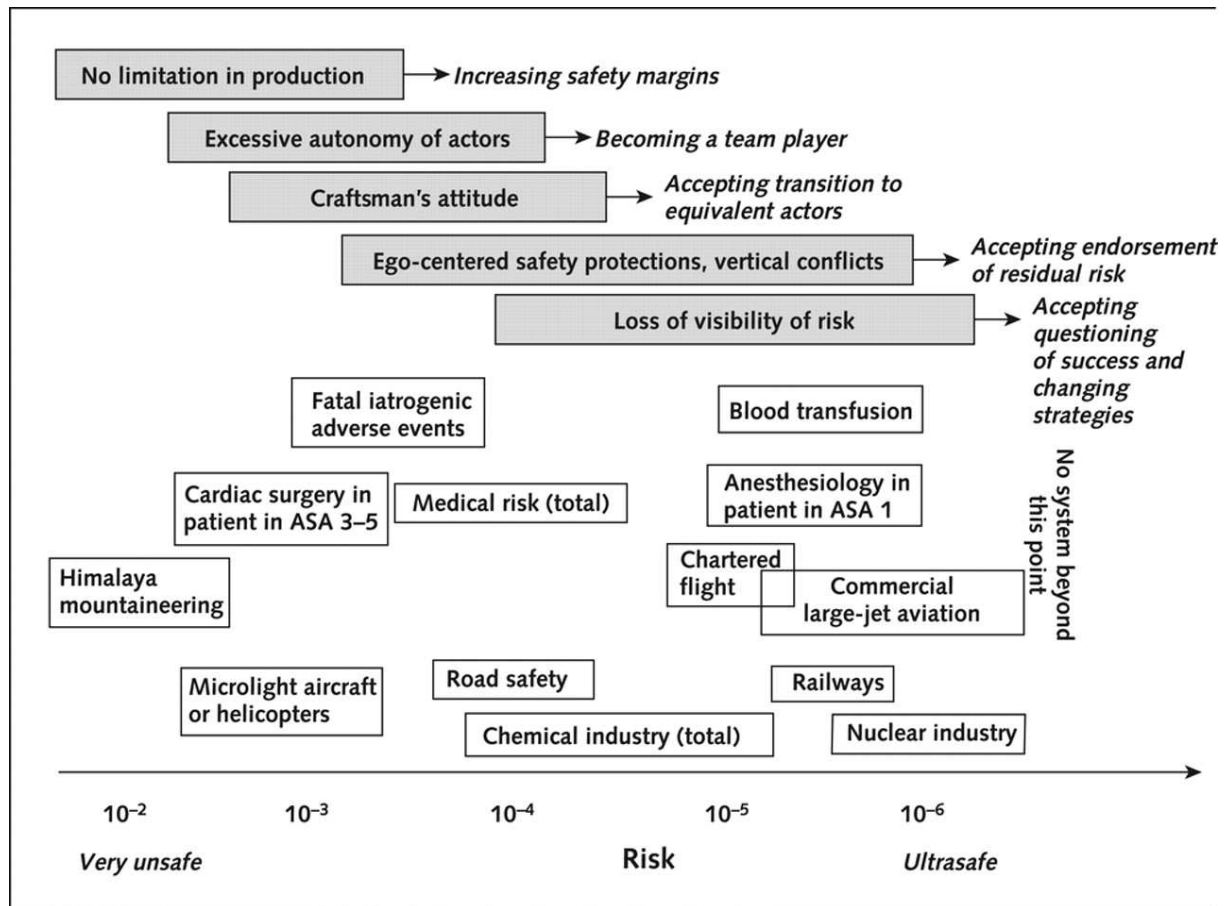


Figure 6 : Barrières à la sécurité et niveau de risque des systèmes d'après [Amalberti 05]

I - 3. 2. De l'accident au retour d'expérience

Un autre élément essentiel de l'amélioration de la sûreté des systèmes à risques provient du retour d'expérience. Celui-ci a joué, comme nous l'avons vu dans les exemples précédents de systèmes à risques un rôle majeur dans l'amélioration de la sécurité des systèmes. Ainsi, la catastrophe de Meudon en 1842 conduisit-elle les autorités à mettre fin à la pratique du verrouillage des wagons de même que la catastrophe d'Eschede a conduit à l'abandon des bandes de roulements sur les roues des trains ICE.

De la même façon, les exemples des catastrophes Three Miles Island (voir Annexe A) et de Tenerife (voir Annexe B) montrent comment l'analyse de l'accident permet de modifier profondément les normes, règlements et procédures régulant alors la sécurité nucléaire et le transport aérien.

L'analyse de l'accident permet ainsi aux autorités compétentes (ainsi qu'aux scientifiques spécialistes depuis les années 60-70) de comprendre comment cet accident est intervenu, par quels mécanismes et d'en déduire des solutions pour éviter qu'un tel accident ne se reproduise.

L'un des exemples les plus connus d'un tel retour d'expérience est la directive européenne SEVESO qui *demande aux Etats et aux entreprises d'identifier les risques associés à certaines activités industrielles dangereuses et de prendre les mesures nécessaires pour y faire face* [MEDAD]. Cette directive, datée du 24 Juin 1982, fut la conséquence du rejet accidentel de dioxine par une usine chimique en 1976 sur le village italien de Seveso. Cette directive (remplacée depuis 1999 par la directive SEVESO II) impose désormais aux établissements industriels à risques (1213 au 1er Janvier 2006 en France) des contraintes en termes d'évaluation des risques, de prévention et d'information du public mais aussi une limitation de l'urbanisation autour de ces sites dangereux. Cette directive est périodiquement amendée pour prendre en compte les résultats des retours d'expérience effectués après chaque nouvel accident majeur (pollution du Danube par des cyanures en Janvier 2000, explosion de l'usine AZF en Septembre 2001, ...).

Au travers de ces exemples parmi les plus connus, on voit l'intérêt du retour d'expérience sur les accidents dans l'amélioration des systèmes. L'autorité de régulation nucléaire américaine a d'ailleurs imposé cette culture du retour d'expérience à tous ses administrés. L'intérêt de ce travail d'analyse des accidents et de transmission des informations recueillis aux autres membres du réseau est évident puisqu'il permet aux gestionnaires des systèmes concernés de bénéficier de l'expérience acquise par d'autres au cours d'accidents sans avoir eux-mêmes à les subir. Ce retour d'expérience joue donc un rôle majeur dans l'amélioration continue de la sûreté des systèmes à risques.

I - 3. 3. L'accumulation des barrières – défenses en profondeur

L'un des effets du retour d'expérience est l'accumulation de barrières visant à améliorer la sécurité des systèmes en empêchant la survenue de défaillances (robustification des composants du système) mais aussi en établissant des mécanismes de compensation d'une défaillance (doublement des circuits de commande d'un avion par exemple pour pouvoir continuer à contrôler l'appareil même en cas de panne du circuit principal par exemple) ou d'atténuation des effets d'un accident si celui-ci vient à survenir (airbags dans l'automobile par exemple).

Ces défenses peuvent être d'ordre technologique comme nous l'avons vu dans ces quelques exemples ou réglementaires comme c'est le cas avec les directives Seveso qui imposent des distances de sécurité entre les sites à risques afin d'éviter la propagation d'un feu ou d'une explosion à d'autres sites. Cette contrainte a ainsi permis d'éviter que l'explosion de l'usine AZF n'entraîne d'autres explosions sur le site tout proche de la SNPE (Société Nationale des Poudres et Explosifs).

L'accumulation de ces barrières techniques et réglementaires contre les accidents catastrophiques est connue sous le nom de défenses en profondeur. L'établissement de ces défenses permet ainsi de renforcer petit à petit la sécurité du système et de limiter le nombre et l'importance des accidents.

I - 3. 4. Des influences contradictoires

On l'a vu, les systèmes à risques tendent au cours de leur cycle de vie à évoluer vers plus de sécurité et de performances. Les améliorations technologiques ainsi que l'accumulation de l'expérience en matière de compréhension des accidents passés et la multiplication des défenses permettent au système de gagner à la fois en performance et en sécurité. Cependant on note que cette évolution vers plus de sécurité et de sûreté se fait au travers des influences combinées de plusieurs facteurs qui interviennent plus ou moins et de façon différente au cours de ce cycle de vie.

L'opinion publique par exemple va tout d'abord ignorer cette nouvelle technologie réservée à quelques fous qui cherchent à accomplir on ne sait quel miracle. Cependant, lorsque la démonstration de la fonction du système à risques est faite (l'annonce des premiers vols motorisés par exemple), l'opinion publique se passionne pour les exploits de ces premiers explorateurs et cherche petit à petit à profiter de cette fonction. Plus la technologie devient accessible au plus grand nombre plus elle est demandée. Lorsque l'accès aisé à cette technologie est obtenu, l'opinion publique demande plus de sécurité et plus de performances. Enfin, la pression pour une plus grande sécurité tout en ne perdant pas de performance se fait de plus en plus forte, la population n'hésitant plus à poursuivre les concepteurs des systèmes à risques en cas d'accidents.

La forte demande de l'opinion publique de profiter des bienfaits d'un nouveau système à risques introduit dans le même temps une pression commerciale forte sur ces mêmes systèmes. En effet, cette forte demande se traduit par une demande de fortes performances à des prix toujours plus abordables. L'aviation commerciale en est ainsi un exemple frappant, les voyages long-courriers étant maintenant accessibles à tous alors qu'il y a quelques dizaines d'années ces mêmes voyages été réservés à une élite. La sécurité du système peut ainsi apparaître dans un premier temps comme une dépense optionnelle (comme on le constate actuellement avec la présence en option de l'ESP sur de nombreux modèles de véhicules alors que ce système apporte un surplus de sécurité non négligeable).

Enfin, comme nous l'avons vu précédemment, l'inquiétude croissante de l'opinion publique face aux risques des systèmes à risques à mesure que ces systèmes deviennent plus communs entraîne une augmentation des régulations s'appliquant à ces systèmes. Il en résulte ainsi une pression réglementaire de plus en plus importante sur les systèmes à risques afin qu'ils réduisent le nombre d'accidents.

1 - 3. 5. Un équilibre précaire, difficile à maintenir

Toutes ces pressions contradictoires s'exercent ainsi sur les systèmes à risques, leurs concepteurs, leurs gestionnaires et surtout leurs opérateurs. Un équilibre précaire tend ainsi à se créer entre les différentes contraintes de coût, de performance et de sécurité citées précédemment ainsi qu'avec les contraintes issues des opérateurs qui comme nous le verront par la suite cherchent leur propre bénéfice (réduction du coût cognitif et de la charge de travail...) dans la conduite du système à risque. L'ensemble de ces contraintes est illustré par la Figure 7 tirée de [Hale 06] page 36.

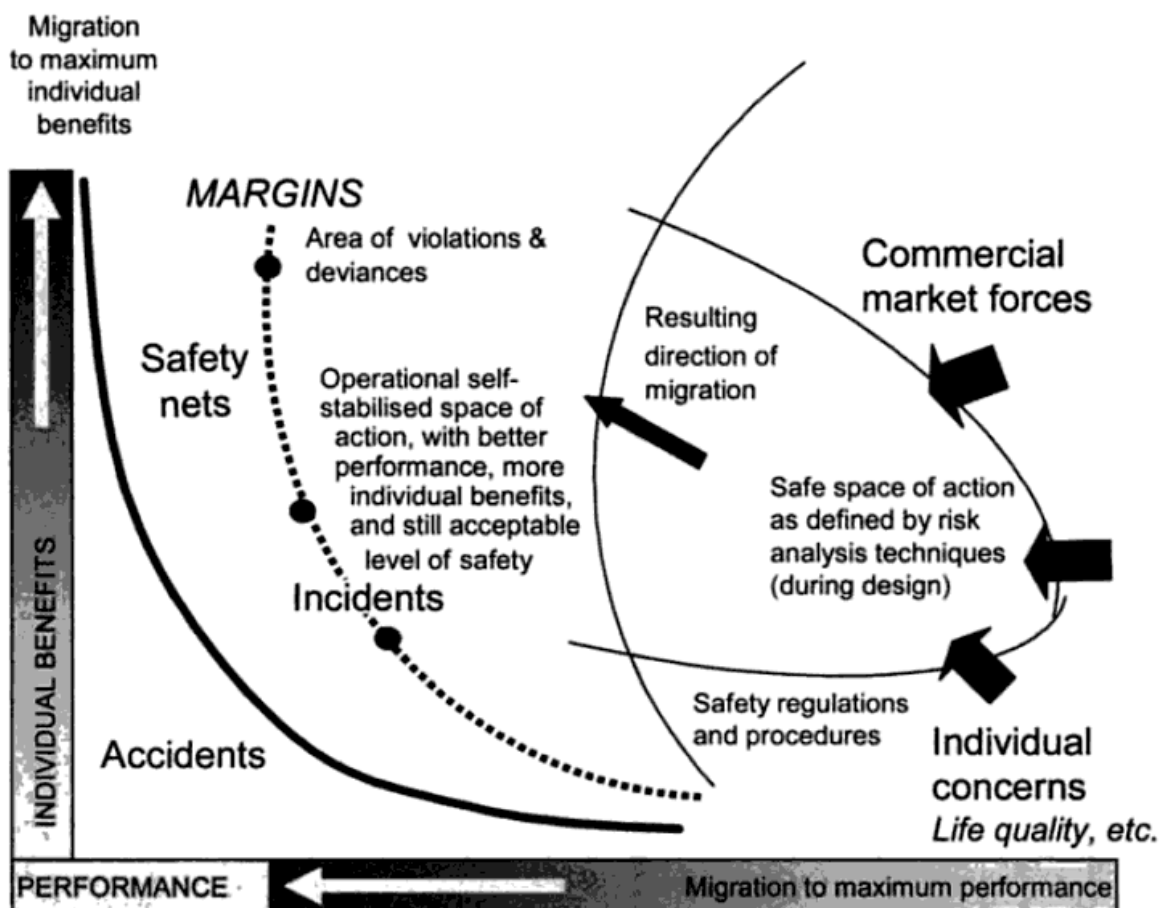


Figure 7 : L'équilibre précaire des systèmes à risques ([Hale 06] d'après [Rasmussen 97])

On voit ainsi que les différentes contraintes appliquées sur le système et ses opérateurs amènent à une sorte d'équilibre dans lequel l'opérateur doit opérer. Cet équilibre est obtenu par l'existence de limites définies par les critères suivants:

- Performances minimales au dessous desquelles le système ne doit pas descendre afin de rester rentable, viable, productif...
- Limites réglementaires imposées par les différentes lois en vigueur
- Limites procédurales encadrant les pratiques admises dans la conduite du système. Ces limites sont souvent mises en place pour assurer la sécurité du système et sont donc souvent conservatrices (au sens où leur franchissement n'entraîne pas immédiatement un accident).
- Limites de performances humaines liées à l'impossibilité pour l'opérateur humain de gérer une charge de travail trop importante par exemple.

L'opérateur humain bénéficie ainsi d'une certaine liberté dans la conduite du système pour définir lui-même le point d'équilibre autour duquel le système va opérer. On voit cependant que l'obtention de ce point peut se faire hors des limites existantes par exemple si l'obtention d'une meilleure performance à moindre coût passe par une légère violation des limites réglementaires ou procédurales par exemple. La conduite d'un véhicule au-delà des limites de vitesse afin d'arriver plus vite à destination entre ainsi dans ce cadre. On se référera par la suite à ces petites violations des règles par la notion de BTCU (pour *Borderline Tolerated Conditions of Use*, c'est-à-dire utilisation du système dans des conditions tolérées seulement). Ces BTCU réduisent alors la marge de sécurité prévue par la réglementation et les procédures.

I - 4. Risques résiduels

Nous avons vu précédemment que les grands systèmes à risques tendaient progressivement à devenir des systèmes ultra-sûrs dans lesquels le risque d'accidents catastrophiques est extrêmement faible. Cependant il est important de garder à l'esprit que même dans de tels systèmes le risque zéro n'existe pas comme nous l'ont montrés les récents accidents d'avions ainsi que les fuites radioactives sur certains sites nucléaires français (Tricastin par exemple).

L'impossibilité d'assurer une fiabilité absolue des pièces d'un système à risques constitue évidemment l'une des causes de ces risques résiduels mais elle n'en est pas la seule. Ainsi l'existence de BTCU dans le contrôle des systèmes apparaît comme l'une des causes probables d'accidents. On peut s'en convaincre en se représentant simplement le cas d'un conducteur automobile qui, connaissant la route pour aller au travail, sait qu'une des intersections avec un stop qu'il franchit régulièrement peut se passer sans marquer l'arrêt du fait de l'absence de circulation à cet endroit. Ce conducteur viole ainsi régulièrement une des règles du code de la route mais sans conséquences jusqu'au jour où un autre véhicule circule sur la route ne peut l'éviter alors qu'il n'a pas marqué l'arrêt.

L'analyse des catastrophes de Three Miles Island et Tenerife présentées dans les Annexes A et B, fait ainsi apparaître une trame générique dans le déroulement de chacun de ces accidents. Ainsi, chacun de ces accidents fut la conséquence d'une dégradation des conditions de fonctionnement normal du système couplée à une série de petites violations (BTCU) des règles, d'erreurs humaines et de défaillances ou d'absence des mesures technologiques de protection. Traitant des erreurs humaines dans le cas des catastrophes, Reason [Reason 93] (page 41) témoigne ainsi :

"L'une des plus importantes leçons à tirer de ces études de cas est que les catastrophes sont très rarement produites par une unique gaffe monumentale. En général, elles impliquent la succession de plusieurs erreurs, souvent assez mineures, soit par une personne, ou, le plus souvent, par plusieurs personnes."

Il est important de noter que ces deux catastrophes ne sont que des exemples extrêmes de la séquence de développement des accidents en général. On constate l'existence d'une séquence d'événements similaires dans la plupart des autres accidents, même si ceux-ci ne sont pas aussi dramatiques. Ainsi les accidents de voiture sont-ils eux aussi souvent provoqués par une dégradation de la situation de conduite (baisse de la vigilance du conducteur, visibilité réduite, ...), de petites violations du code de la route et par des erreurs apparemment mineures induisant une mauvaise prise de décision ou une non prise de décision (ces aspects relatifs à la conduite automobile seront abordés dans le Chapitre IV).

I - 5. Synthèse

Nous avons vu au cours de ce chapitre quelques exemples de grands systèmes à risques ainsi que l'histoire de leur développement, de systèmes peu performants et très dangereux à des systèmes extrêmement sûrs et très performants. Nous avons vu apparaître dans chacun de ces exemples une trame commune dans la façon d'évoluer de ces systèmes tout d'abord par le biais d'une recherche absolue de la performance, puis petit à petit par l'amélioration de la sécurité, d'abord par le biais des progrès techniques effectués puis par une pression de l'opinion publique vers plus de sécurité.

Cette évolution mène comme nous l'avons vu à atteindre un plateau de développement des systèmes lorsque les contraintes réglementaires pour améliorer la sécurité et la pression judiciaire sont si fortes que le progrès en terme de performance n'est quasiment plus possible. Seule la mort du système et l'apparition d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau système permet alors de redémarrer un cycle d'évolution des performances du système.

Dans un deuxième temps nous avons vu les mécanismes qui conduisent cette évolution vers plus de sécurité ainsi que leurs conséquences sur la façon d'opérer ces systèmes. Nous avons tout d'abord vu comment les changements dans la gestion des systèmes (l'abandon d'une pratique ego centrée de la sécurité vers une approche globale par exemple) introduit des gains de sécurité. Nous avons ensuite vu comment le retour d'expérience est utilisé pour améliorer le système en comprenant mieux les causes des accidents afin de mettre en œuvre les barrières adéquates. Nous avons ensuite vu que cette accumulation de barrières dans un contexte de défenses en profondeurs permet à la fois de prévenir l'occurrence de nombreux accidents mais aussi d'en réduire les conséquences. Nous avons enfin vu quelles pressions s'exercent sur les systèmes à risques et sur leurs opérateurs et mènent à un équilibre précaire entre les différentes contraintes imposées. On a alors vu que l'ensemble de ces pressions pouvaient mener les opérateurs à violer certaines règles afin d'assurer un compromis entre performances, sécurité ressentie et confort personnel acceptable pour celui-ci.

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'existence de risques résiduels de ces systèmes à risques afin de comprendre pourquoi des accidents pouvaient encore subvenir. Nous avons alors vu au travers des exemples des catastrophes de Three Miles Island et Tenerife présentées dans les Annexes A et B, que malgré toutes les règles mises en places, malgré toute la redondance des systèmes, une combinaison de facteurs mineurs (qui pris un par un n'auraient pas conduit à un accident) dus à des erreurs humaines, des violations habituelles, des problèmes techniques et des situations d'opération dégradées, pouvaient mener à une catastrophe de très grande ampleur.

I - 6. Vers plus de sécurité?

A posteriori, il apparaît que ces facteurs mineurs constituent des indices de l'arrivée probable d'un accident. La détection précoce de tels indices permettrait la récupération efficace de la situation par le biais de contre-mesures adaptées. Néanmoins, dans le cas des accidents et encore plus dans le cas des catastrophes, certains de ces indices passent inaperçus des opérateurs, soit que leur intensité ait été trop faible (cas d'une faible oscillation de l'aiguille d'un manomètre témoignant d'une légère variation de la grandeur mesurée); soit qu'ils aient été masqués par d'autres signaux plus importants (cas d'une alarme se déclenchant parmi de nombreuses autres alarmes); soit enfin que l'information ait été détectée mais non prise en compte par le conducteur du système (cas du doute émis par l'ingénieur de vol du 747 de la KLM lors de la catastrophe de Tenerife par exemple). La détection et la compréhension des implications de ces indices constituent donc à nos yeux l'un des principaux enjeux de l'amélioration de la sûreté des systèmes.

Malheureusement, la plupart des systèmes modernes sont beaucoup trop complexes pour que leur fonctionnement puisse être compris de leurs opérateurs. De plus, les BTCU apparaissent comme difficilement mises en cause par l'opérateur puisque ces violations sont effectuées sciemment. Ainsi, la détection et la compréhension des indices de dégradation de la situation de conduite par l'opérateur s'en trouvent considérablement complexifiées. Les opérateurs de tels systèmes ont donc besoin d'être assistés dans leur tâche de pilotage de tels systèmes complexes afin d'éviter au maximum les accidents. Cette assistance peut provenir d'un ou plusieurs autres opérateurs (afin de minimiser le risque de non détection de problèmes sur le système), d'un ou plusieurs superviseurs s'assurant du bon respect des procédures par exemple mais aussi par le biais de l'entraînement et de la mise en situation (comme c'est le cas dans l'aviation ou le pilotage de centrales nucléaires par exemple).

I - 7. Un problème insoluble ?

Les exemples récents d'accidents d'avion, d'incidents dans des usines chimiques ou des centrales nucléaires nous montrent que malgré l'amélioration des aides au pilotage de ces systèmes complexes des accidents restent toujours possibles. La non-détection d'indices de dégradation de la situation de conduite reste ainsi toujours possible de même que la survenue d'un accident dans un système complexe. On peut donc se demander si l'amélioration de la sécurité dans les systèmes à risques reste possible au-delà d'un certain seuil.

Pour répondre à cette question nous allons dans un premier temps nous intéresser, dans le Chapitre II aux mécanismes de conduite des systèmes mis en place par l'opérateur humain qui apparaît comme la dernière frontière vers plus de sécurité. Nous verrons alors que l'amélioration de la perception du risque pourrait être l'une des clés vers une amélioration de la sécurité. Nous proposerons alors dans le Chapitre III une nouvelle forme d'aide à la conduite des systèmes à risques dédiée à la détection et à la compréhension des risques inhérents à la situation de conduite courante et les contraintes associées à un tel système.

Nous nous intéresserons alors à la réalisation d'un tel système pour la conduite automobile qui reste l'un des systèmes à risques les plus meurtriers à l'heure actuelle. Nous proposerons ensuite les éléments de réalisation d'un tel système dans les Chapitres IV à VII. Nous concluons enfin sur l'intérêt d'un tel système d'aide à la conduite pour l'automobile, sur ses limitations ainsi que sur sa portabilité vers d'autres type de systèmes complexes (aviation commerciale, usines chimiques, centrales nucléaires, ...). Nous verrons alors s'il est possible d'espérer améliorer la sécurité des systèmes à risques grâce au concept d'aide à la conduite proposé.

CHAPITRE II – L'HUMAIN DERNIERE FRONTIERE?

L'être humain est une machine faillible. Cette faillibilité s'explique par le fait que l'humain n'est pas apte à traiter les tâches les plus complexes ou les plus courantes sans erreurs. Ainsi, nous faisons tous de très nombreuses erreurs chaque jour, du lapsus au cours d'un dialogue à l'oubli de l'action que nous menions juste avant d'être interrompus. Ces petites erreurs n'ont généralement que peu de conséquences mais elles peuvent parfois provoquer des catastrophes, d'autant plus qu'elles interviennent dans des systèmes dits "sensibles" (centrale nucléaire, industrie chimique, alimentaire, ...).

C'est pour cette raison que l'erreur humaine est un domaine de recherche très important pour les ergonomes et les psychologues qui trouvent en elle une source d'informations sur les processus de la pensée humaine en plus des informations classiques sur les moyens de mieux concevoir les systèmes complexes. Leurs recherches ont abouti à de nombreuses conclusions dont la principale est l'impossibilité d'atteindre un taux d'erreurs humaines nul et à la création du concept de défenses en profondeur présenté précédemment. Ce concept préconise, pour éviter des accidents, de multiplier les barrières pour intercepter les erreurs à tous les stades de la génération de l'erreur et pour diminuer les conséquences des erreurs qui passeraient toutes ces barrières. Amalberti [Amalberti 00] (page 76) résume ainsi cette pensée :

"L'accident n'est que le révélateur d'une ou plusieurs mauvaises défenses du système dans son ensemble. Un système sûr doit permettre l'erreur ou la panne et se protéger contre les conséquences de ces événements."

En effet, on s'est aperçu, comme nous l'avons vu précédemment, que la totalité des grandes catastrophes industrielles qui ont eu lieu au cours des 30 dernières années (Three Miles Island, Bhopal, Tchernobyl, ...) n'est pas due à une erreur humaine énorme mais plutôt à une suite de perturbations du système complexe, d'erreurs ou de ratés de la part des opérateurs, de manque de contrôles, de prises de libertés avec les règles en place et de dégradation de la situation nominale. Il serait donc intéressant d'aider le ou les opérateurs à évaluer le niveau de dégradation de la situation afin que ceux-ci soient correctement informés et puissent prendre leurs décisions en conséquence de cause dans un tel contexte. Pour cela il convient de comprendre comment l'être humain raisonne afin de l'aider au mieux dans son raisonnement et sa prise de décision.

Nous n'entendons bien évidemment pas nous substituer ici à toutes les recherches qui ont été menées dans le domaine depuis plus d'un siècle mais simplement proposer une synthèse de notre conception du fonctionnement de l'être humain très largement inspirée des travaux de Reason et de Rasmussen mais se basant aussi sur la théorie de la conscience de la situation de Endsley.

II - 1. Principe de raisonnement de l'être humain :

Les sciences cognitives ont cherché, depuis très longtemps, à théoriser le raisonnement humain, ses mécanismes et ses principes afin de pouvoir prévoir les réactions de l'homme et ainsi, éventuellement recréer artificiellement ce raisonnement. L'esprit humain s'est néanmoins montré trop complexe pour pouvoir ainsi être mathématisé mais les résultats de ces recherches apportent déjà de nombreux éclairages sur les principes de raisonnement et de prise de décision de l'homme.

De nombreuses théories ont cherché à fournir un cadre fixe à la prise de décision mais toutes ont été remises en cause par certaines expériences confirmant une hypothèse plutôt qu'une autre. Malgré cela, certains points de convergence sont apparus dans toutes ces études. L'existence d'une limite à notre capacité à traiter de façon consciente des problèmes complexes apparaît ainsi dans tous les modèles. Cette limite s'exprime à la fois dans la taille de notre espace de travail ou mémoire de travail et dans la rapidité du traitement des situations.

II - 1. 1. Différents niveaux d'abstraction

Pour compenser ces limitations qui l'empêcheraient probablement d'effectuer de façon efficace la majeure partie des tâches qui lui sont confiées, l'homme a tendance à utiliser le minimum de mécanismes de raisonnement de haut niveau et au contraire tend à privilégier l'utilisation de "schémas" préexistants (beaucoup moins demandeurs en ressources cognitives) qui lui donnent la marche à suivre. Ces "schémas" sont issus de l'expérience acquise au fil du temps et permettent en fait de stocker les actions "calculées" lors des premières rencontres avec une situation similaire. Ces schémas peuvent être compris comme un ensemble de lois (ou règles), de type SI (événements) ALORS (actions), qui lorsqu'elles sont vérifiées entraînent l'application d'actions prédéfinies.

Lorsqu'une situation n'est pas directement reconnue par l'une de ces règles, on cherche à trouver une analogie avec une règle existante en négligeant un paramètre peu important par exemple. Ce principe mène à la création de règles moins spécifiques qui correspondent ainsi à un plus grand nombre de cas.

Cette règle plus générale sera alors appliquée plus souvent que la ou les règles plus spécifiques. Elle deviendra alors plus prioritaire dans la hiérarchie des règles et sera en conséquence accédée plus souvent. En l'absence de contre-exemple de cette règle générale, les règles plus spécifiques correspondantes seront donc progressivement oubliées puisque jamais utilisées. Au contraire, un contre-exemple créera une règle spécifique plus forte que la règle générale afin de s'assurer de son utilisation prioritaire (ce contre-exemple devra cependant être rencontré assez régulièrement pour ne pas être oublié).

Le principe de la prise de décision telle que nous l'appliquons peut donc se décomposer en trois stades différenciés par le niveau de conscience qu'ils demandent :

- La phase réflexive qui permet de réagir immédiatement à une situation selon nos aptitudes. Cette phase est effectuée inconsciemment et correspond aux schémas les plus classiques.
- La phase basée sur les règles que nous avons apprises. Cette phase nous oblige à chercher exhaustivement dans notre base de données de règles, selon l'ordre hiérarchique établi, afin de trouver une règle adaptée à notre situation puis de l'appliquer.
- La phase basée sur les connaissances, il s'agit là d'une phase réflexive atteinte lorsque aucunes des deux phases précédentes n'ont abouti. Elle se fait de façon consciente et oblige à réfléchir pour trouver soit une analogie avec une règle, soit définir une nouvelle règle qui permettra de réagir à un tel cas de figure. Cette nouvelle règle sera ensuite utilisée aux niveaux inférieurs de conscience si elle a réussi.

On voit apparaître à travers ce découpage en trois niveaux de réaction et dans leur principe de fonctionnement, la tendance naturelle à économiser les ressources utilisées (ici le temps de réflexion). Ce fonctionnement nous permet ainsi de gérer beaucoup plus facilement les situations complexes auxquelles nous sommes confrontés.

Dans la Figure 8, [Reason 93] propose, à partir du modèle de la double échelle de [Rasmussen 86], une schématisation des mécanismes mis en œuvre lors des prises de décision. Cette schématisation permet de mieux visualiser les différentes méthodes qui permettent de court-circuiter les phases les plus longues de la pensée dans certains cas.

Ainsi dans ce schéma, lorsque le circuit emprunté est court (niveau réflexive), il nécessite moins de ressources pour être effectué. L'action sera donc très rapidement menée de façon presque inconsciente (par exemple le maintien d'un véhicule sur la route par un conducteur expérimenté). Au contraire, s'il est long (niveau réflexif) il nécessitera plus de temps et de ressources pour être effectué, l'action sera donc beaucoup plus réfléchie et la prise de décision moins rapide (tâche d'orientation sur un parcours inconnu par exemple).

II - 1. 2. Parallélisme du traitement des tâches

La schématisation de la prise de décision humaine par différents niveaux d'abstraction ne modélise qu'une partie des mécanismes de raisonnement humains. En effet elle ne prend pas en compte la capacité humaine à traiter plusieurs tâches simultanément. Ce parallélisme de raisonnement ne peut apparaître que si l'on replace ce schéma dans un schéma général multi fils dans lequel chaque fil correspond à une tâche cognitive effectuée par l'opérateur humain selon le mécanisme précédent. Ce parallélisme du traitement des tâches peut aisément être observé (un conducteur de voiture qui parle à son passager tout en continuant à conduire par exemple effectue au moins deux tâches cognitives simultanément).

Ce modèle multi fils permet de plus de mettre en avant la limitation des ressources cognitives disponibles à chaque instant. En effet, l'être humain n'a qu'une capacité de raisonnement limitée qui ne lui permet pas forcément de mener simultanément toutes les tâches requises et il n'a de ressources attentionnelles qu'en nombre limité. L'être humain ne peut donc utiliser un raisonnement basé sur les connaissances (qui requiert donc une charge cognitive très importante) pour chaque fil sans risquer une saturation de ces capacités et donc un rallongement d'un ou plusieurs des raisonnements. La Figure 9 donne ainsi un exemple de ce mécanisme de saturation cognitive dans un cas où 3 fils sont utilisés.

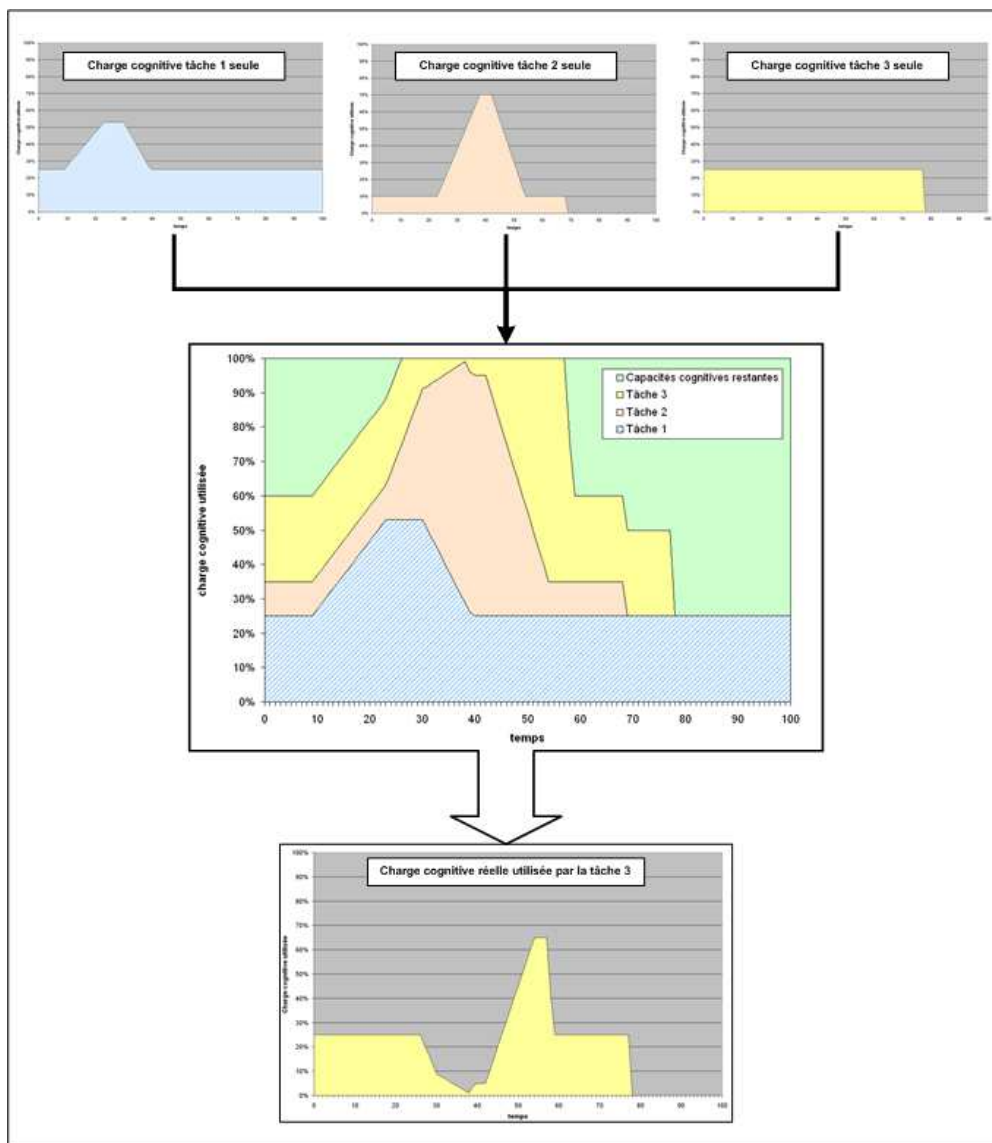


Figure 9 : Illustration du parallélisme de traitement et de la limitation de charge cognitive

Dans cet exemple les tâches sont numérotées en fonction de leur priorité. Ainsi la tâche 1 est-elle la plus prioritaire et recevra donc le maximum d'attention. On peut identifier cet exemple au cas d'un conducteur cherchant son chemin à l'approche d'une intersection. Sa tâche prioritaire (tâche 1) correspond alors au contrôle de la trajectoire du véhicule et à l'attention à la forme de la route. Sa tâche secondaire correspond à la recherche de son chemin aux intersections. La tâche 3 enfin est une tâche annexe comme une discussion en cours avec un passager. A $t=10$, le conducteur aperçoit une intersection, la tâche 1 mobilise alors une plus grande partie de ses ressources cognitives pour identifier le type d'intersection, la signalisation et pour ralentir en conséquence. Au bout d'un temps $\Delta t=13$ (donc à $t=23$), le conducteur identifie l'intersection comme pouvant être intéressante pour sa route à suivre. La tâche 2 fait alors appel à davantage de ressources cognitives afin d'évaluer dans quelle direction il doit aller. A cet instant, ses ressources sont encore suffisantes pour lui permettre de continuer sa conversation. Néanmoins, la mobilisation rapide de ressources par les tâches 1 et 2 réduit rapidement la capacité cognitive restante jusqu'à l'épuiser complètement. Les ressources allouées pour la tâche annexe sont alors réduites momentanément. A $t=46$, la charge cognitive conjuguée des tâches 1 et 2 devient suffisamment faible pour réallouer le taux de ressources nécessaires à la bonne tenue de la conversation. La tâche annexe du conducteur va alors tenter de rattraper son retard en augmentant ponctuellement sa charge cognitive (le conducteur cherche à se souvenir de ce que lui a dit son interlocuteur pendant la phase de saturation par exemple). Une fois son retard rattrapé, elle revient à sa charge cognitive normale.

Cet exemple très simple montre ainsi une partie des mécanismes permettant à l'être humain de gérer plusieurs tâches simultanément en fonction de leurs priorités respectives. Néanmoins, il ne permet la perception que d'un seul des aspects du "compromis cognitif" effectué naturellement par l'être humain :

"Le modèle [du compromis cognitif] repose sur une prise de risque constante pour réaliser le travail à un coût cognitif acceptable compte tenu des ressources disponibles et des conséquences physiologiques de la fatigue. La prise de risque s'effectue par une réduction de la complexité, une conduite par anticipation et une économie des ressources faisant préférer un niveau de conduite automatique à un niveau de conduite plus réfléchi et plus logique."
[Amalberti 01] pages 184-185.

Ainsi, l'être humain en général, et l'opérateur d'un système à risques en particulier, aura tendance à ne pas utiliser l'intégralité de ses ressources cognitives afin de ne pas s'épuiser inutilement au prix d'une plus grande prise de risques. Cette prise de risques reste néanmoins relativement raisonnable compte tenu des défenses en profondeur établies afin de s'assurer du degré de risque pris. L'opérateur humain réduit ainsi sa charge cognitive au prix d'une charge attentionnelle légèrement supérieure afin de contrôler les risques pris.

II - 1. 3. Conclusion

Le raisonnement humain semble donc reposer, sur un modèle multi fils, où chaque fil, représentant une tâche à accomplir, peut être traité à un niveau d'abstraction dépendant de plusieurs facteurs tels que :

- L'habitude de l'opérateur à traiter cette tâche
- L'habitude de l'opérateur à traiter des tâches similaires
- La priorité attribuée au traitement de cette tâche
- La prise de risques éventuelle par l'opérateur afin de traiter la tâche de façon simplifiée en espérant/pariant que le traitement de cette tâche simplifiée donnera des résultats acceptables
- La charge cognitive demandée par les autres tâches

Ce mode de raisonnement nous permet de traiter simultanément, le plus souvent de manière efficace, les tâches qui nous incombent en évitant au maximum de saturer nos capacités cognitives. Néanmoins, les deux mécanismes présentés précédemment ne sont pas parfaitement fiables. Ainsi, la prise de risques faite lors du compromis cognitif peut provoquer des erreurs de raisonnement si l'hypothèse de la validité du traitement simplifié n'est pas vérifiée. De même, le modèle de prise de décision (Figure 8) peut lui aussi générer de nombreuses erreurs, tant par l'application de raisonnements faux que par la mauvaise compréhension de la tâche à accomplir.

Il est intéressant, dans l'optique de la prévention des accidents dus pour la plupart aux erreurs humaines, de s'intéresser aux mécanismes de génération des erreurs afin d'identifier les causes de celles-ci pour pouvoir éventuellement y remédier. Pour cela on se base principalement sur l'ouvrage de Reason "L'erreur humaine" [Reason 93].

II - 2. L'erreur humaine selon Reason :

Nous avons vu précédemment que l'être humain organise chacune de ses prises de décisions selon un processus à trois niveaux qui permet de limiter l'utilisation de la mémoire de travail, déchargeant ainsi la conscience d'une grande charge. Cette classification des activités humaines en "automatismes – règles – connaissances" due à Rasmussen a permis à Reason d'introduire le GEMS : système Générique de Modélisation de l'Erreur (Generic Error Modeling System) [Reason 93] qui lui a permis de distinguer trois types d'erreurs de base selon le niveau d'activité demandé :

- les ratés et lapsus basés sur les automatismes (de type SB : Skill Based)
- les fautes basées sur les règles (de type RB : Rules Based)
- les fautes basées sur les connaissances déclaratives (de type KB : Knowledge Based)

Cette nomenclature permet de distinguer des types d'erreurs aux caractéristiques très différentes. On peut mieux visualiser les zones d'actions de chacune de ces erreurs dans la Figure 10 qui représente les grandes lignes du GEMS.

Ainsi les erreurs de type SB apparaissent lors d'activités courantes et routinières ne demandant que l'application de schémas pour fonctionner, le sujet considéré étant le plus souvent concentré sur autre chose. Au contraire les erreurs de type RB et KB peuvent avoir lieu lors de la résolution d'un problème, alors que l'attention est concentrée sur ce problème. Les erreurs de type RB se produisent plus lorsque le sujet s'aperçoit d'un changement dans la situation par rapport au plan prévu et avant la détection d'un problème alors que les erreurs de type KB se produisent, elles, pendant la phase de résolution des problèmes apparus. De plus alors que les erreurs de type RB portent sur des activités contrôlées par des règles de façon quasi-automatique les erreurs de type KB portent sur des activités contrôlées consciemment. On résume dans le Tableau 1 les différentes distinctions entre les trois types d'erreurs de base [Reason 93].

On remarque dans ce tableau deux points essentiels pour la sûreté de fonctionnement dans tous les systèmes utilisant l'homme dans la boucle de commande. Tout d'abord, le nombre assez faible d'erreurs de type KB, qui tient du nombre relativement limité d'occasions d'utiliser le niveau KB, mais leur importance par rapport aux occasions, qui dénote une propension à commettre des erreurs dans ce mode de fonctionnement. Le deuxième point soulevé par les données de ce tableau et l'incapacité de l'homme à détecter ses erreurs de types KB sans l'intervention d'une personne extérieure. Or, le niveau KB est activé lorsque l'opérateur se trouve dans une situation inconnue, le plus souvent en état de stress et dans l'urgence. On voit donc ici apparaître l'une des causes des erreurs de haut niveau (KB et RB) dans les différents accidents : la nécessité de raisonner efficacement dans l'urgence pour éviter une situation critique. On cherchera donc au maximum à réduire le nombre d'occurrences de ces situations potentiellement catastrophiques.

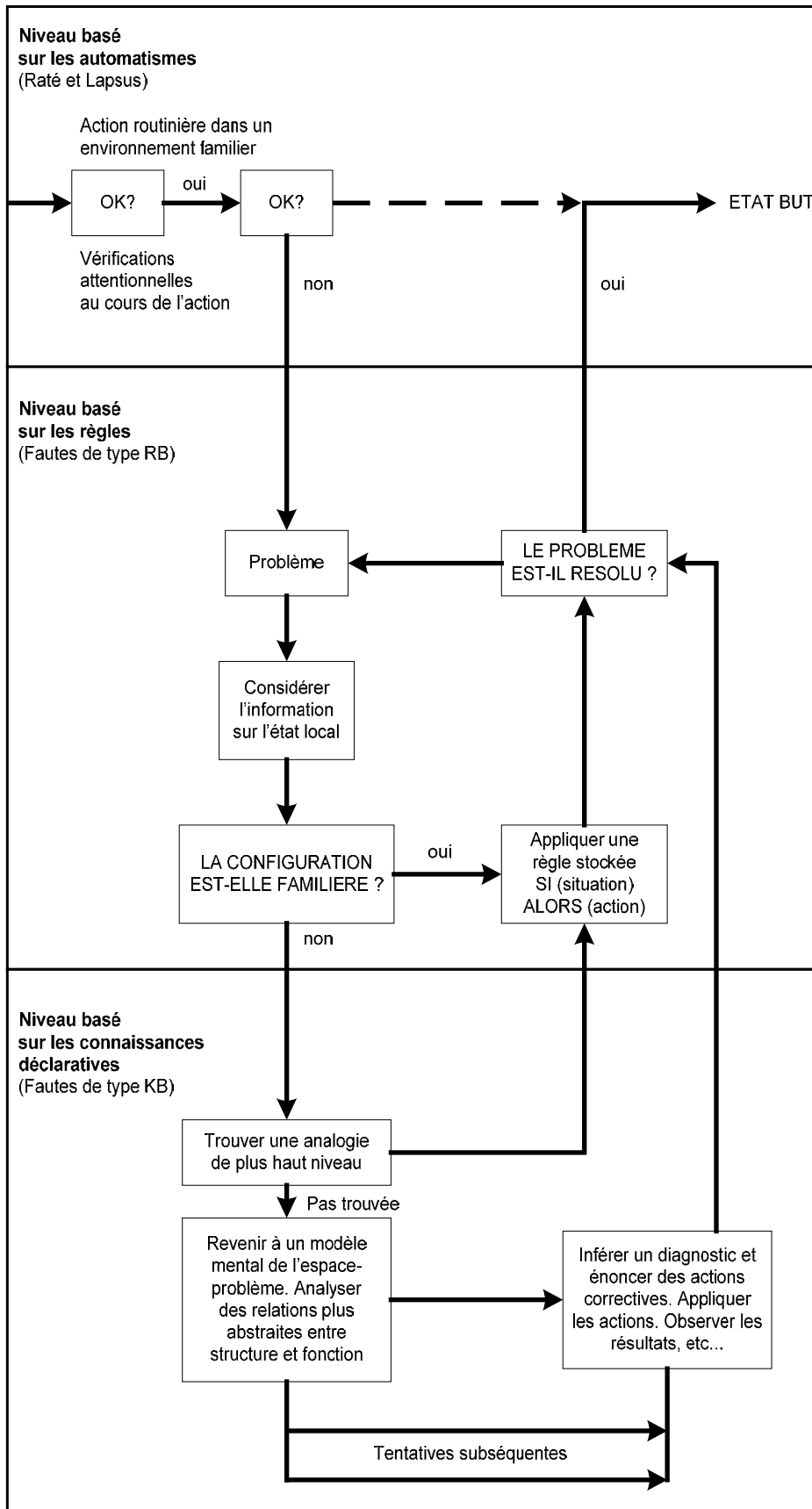


Figure 10 : Le GEMS dans ses grandes lignes [Reason 93]

Dimension	Erreurs basées sur les automatismes (SB)	Erreurs basées sur les règles (RB)	Erreurs basées sur les connaissances déclaratives (SB)
Type d'activité	Actions routinières	Activités de résolution de problème	
Concentration de l'attention	Sur autre chose que la tâche en cours	Sur des considérations liées au problème	
Mode de contrôle	Essentiellement par des processus processeurs automatiques :		Processus conscients limités
	(Actions)	(Règles stockées)	
Caractère prédictible des types d'erreurs	Largement prédictibles Erreurs de type "règles fortes mais fausses"		Variable
	(actions)	(règles)	
Relation entre l'erreur et l'opportunité d'erreur	Bien que les nombres absolus puissent être élevés, ils représentent une faible proportion du nombre total d'opportunités d'erreur		Nombre absolus faibles, mais rapport élevé aux occasions
Influence des facteurs situationnels	Faible à modéré ; les facteurs intrinsèques (fréquence d'utilisation antérieure) exercent une influence prédominante		Les facteurs extrinsèques prédominent
Facilité de détection	Détection généralement assez rapide et efficace	Difficile et souvent réussie seulement grâce à une intervention extérieure	
Relation au changement	Prise de connaissance du changement non remarquée au bon moment	On ne sait pas quand et comment le changement anticipé se produira	Le changement n'est pas anticipé et on n'y est pas préparé

Tableau 1 : Résumé des distinctions entre les différents types d'erreurs de bases

II - 3. Causes des différents types d'erreurs humaines :

Les erreurs humaines peuvent, comme nous l'avons vu précédemment, être classées selon trois grands types d'erreurs, chacun ayant des caractéristiques intrinsèques bien marquées (Tableau 1). Ces différents types d'erreurs proviennent des mécanismes de la pensée humaine et sont donc intimement liés à la façon dont notre cerveau fonctionne. Cette classification est encore trop générale et ne permet pas de différencier certaines erreurs d'un même type, de même qu'elle ne donne pas les causes de l'apparition des différentes erreurs possibles. Nous allons donc rentrer plus en détail dans les différents types d'erreurs afin de pouvoir déterminer les causes générales de chaque erreur d'un même type. On adopte ici la classification proposée par Reason [7] que l'on résumera dans le Tableau 2.

II - 3. 1. Erreurs d'activité au niveau basé sur les automatismes :

Ce type d'erreur se produit lorsque le niveau d'activité SB ("skill based") est activé, c'est-à-dire lorsque le sujet est exposé à une situation connue et bien maîtrisée (ou du moins perçue comme telle) et qu'il agit donc de façon automatique. Dans ce mode de fonctionnement, comme on peut le voir dans la Figure 10, le sujet doit effectuer des vérifications attentionnelles pour vérifier que la situation correspond bien au schéma prévu. Ces vérifications attentionnelles requièrent une activité consciente très faible, mais néanmoins obligatoire. On voit donc apparaître ici les deux types d'erreurs qui peuvent être commises à ce niveau d'activité, les erreurs d'inattention, dues à une omission des vérifications attentionnelles, et les erreurs dues à une attention excessive, c'est-à-dire à l'application de vérifications attentionnelles supplémentaires et inutiles.

Les erreurs d'inattention peuvent apparaître sous différentes formes :

- Les ratés de double capture, qui se produisent lorsque l'attention est retenue par un autre élément externe ou par une préoccupation interne alors qu'une vérification attentionnelle de l'action en cours est nécessaire pour suivre l'intention de départ. L'action continue alors selon le schéma le plus fort qui ne satisfait pas forcément l'intention.
- L'erreur par omission suivant une interruption est due quant à elle à une interruption externe qui entraîne une interruption de l'action afin d'y réagir. L'action peut alors être court-circuitée et reprendre bien plus loin dans le déroulement du schéma, entraînant ainsi l'omission de plusieurs étapes.
- L'erreur par intentionnalité réduite provient de l'existence d'un retard entre la formulation de l'intention et l'action. Ceci peut se traduire par la reprise du contrôle par d'autres exigences de l'espace de travail, entraînant ainsi l'arrêt de la tâche en cours jusqu'à ce que le sujet en prenne conscience.
- L'erreur par confusion perspective se produit lorsque les schémas de reconnaissance se satisfont d'approximation d'entrées attendues. Cette forme d'erreur d'inattention provoque la continuation de l'action avec des mauvais objets par exemple.
- Les erreurs d'interférence apparaissent lorsque deux actions ou deux plans (SB et RB par exemple) en cours cherchent à avoir le contrôle des effecteurs entraînant ainsi un mélange des deux actions.

Les erreurs dues à une attention excessive se produisent quant à elles lorsqu'une vérification est faite pendant l'application d'une séquence entièrement automatisée. Elles suivent généralement une "absence" qui fait penser que l'on n'a pas effectué une ou plusieurs vérifications précédemment. De telles erreurs conduisent à l'arrêt de l'action en cours et à une incertitude quant à son état actuel d'accomplissement, nécessitant ainsi une vérification attentionnelle poussée pour analyser la tâche effectuée.

On voit apparaître au travers de cette décomposition certaines causes d'accidents de conduite de systèmes à risques (l'omission d'un contrôle par exemple). Ceci s'explique par le fait que la tâche de conduite de ces systèmes utilise constamment les trois niveaux d'activités de façon parallèle et imbriquée.

II - 3. 2. Erreurs d'activité au niveau basé sur les règles :

Les erreurs ou fautes de type RB peuvent apparaître lorsque l'activité a lieu dans le niveau à base de règles. Pour bien comprendre l'existence et l'apparition de telles erreurs il faut bien comprendre le principe de fonctionnement de ce niveau. Lors de l'activation de ce dernier, plusieurs règles sont en compétition, par le biais de processus parallèles de traitement des règles, pour représenter l'état de l'environnement. Le choix du vainqueur de cette compétition et donc de la règle qui sera utilisée, se fait selon deux critères : la spécificité de la règle vis-à-vis de l'environnement (c'est-à-dire la corrélation entre les données de l'environnement et les conditions de la règle) et la force de la règle, qui, comme nous l'avons expliquée précédemment, dépend de sa fréquence d'utilisation correcte. Ces règles de choix, si elles sont efficaces la plupart du temps, peuvent néanmoins entraîner l'apparition d'erreurs indésirables.

Ces erreurs peuvent prendre deux formes distinctes : la mauvaise application de "bonnes règles" ou l'application de règles fausses. On entend ici par "bonne règle" une règle qui s'est avérée utile dans une situation particulière. De telles règles s'avèrent néanmoins inadaptées à certaines situations et peuvent provoquer l'application de règles fortes mais fausses.

L'application erronée de bonnes règles peut provenir de différents problèmes :

- Les premières exceptions : Il s'agit de la première rencontre avec une exception à une règle, qui entraînera probablement l'application de la règle fautive. De telles rencontres permettent la constitution de règles d'exception qui seront utilisées par la suite pour résoudre ces situations. De telles erreurs tendent généralement à disparaître avec des entraînements utilisant le spectre le plus large possible de situations.
- Les signes, contre signes et non signes : La présence d'informations différentes dans la scène, signes (informations qui satisfont à la règle), contresignes (informations qui rendent la règle générale non applicable) et non signes (informations sans rapport, bruit) peut amener certains contre signes à ne pas être pris en compte et à être écartés volontairement "*s'ils ne s'accordent pas à la situation actuelle*" [Reason 93] (page 118). Ces contresignes non pris en compte deviennent alors des signaux faibles, comme expliqué dans l'introduction.
- La surcharge informationnelle : Les capacités d'appréhension du système cognitif sont limitées et ne peuvent traiter qu'une partie de l'information disponible, la présence de non signes peut donc surcharger le système cognitif et masquer ainsi les contresignes. Ces contresignes apparaissent alors comme des signaux faibles.
- La force d'une règle : comme nous l'avons vu précédemment, plus une règle est forte plus elle a de chances d'être appliquée. Ceci peut avoir pour conséquence l'application d'une règle très forte à une situation mal adaptée.
- La redondance des informations : En temps normal, les signes se présentent sous de très nombreuses formes qui sont parfois redondantes. On apprend ainsi à négliger certaines sources d'informations considérées comme redondantes dans la plupart des cas. On favorise ainsi certaines sources de données aux dépens des autres au risque de négliger certains contresignes plus rares.
- La rigidité : Ce facteur d'erreur provient de notre habitude à réutiliser une solution déjà éprouvée plutôt que de chercher une autre solution qui nécessiterait réflexion. Ceci peut nous amener à réutiliser une règle dans une situation où les conditions ne garantissent plus son succès.

L'application de mauvaises règles peut provenir de deux types de fautes :

- Les défauts d'encodage de la situation, dont les caractéristiques ne sont pas encore encodées ou mal représentées dans les conditions de la règle. Ceci peut être dû à un apprentissage des règles en cours comme c'est le cas pour les conducteurs débutants qui ne peuvent gérer efficacement la vitesse et la direction du véhicule [Ellingstadt 70]. La règle peut aussi être mal encodée, Reason utilisant l'exemple de la physique naïve (une bille sortant d'un tube en tourbillon va continuer à tourbillonner...) pour illustrer son propos [Reason 93]. Enfin une règle générale erronée peut être protégée par des exceptions qui confirment la règle.
- Les défauts de l'action, lorsque l'action mène à des réponses insatisfaisantes, inélégantes ou inopportunes. Ces fautes sont dues principalement à des règles fautes (qui entraînent donc des actions inadaptées), des règles maladroites qui permettent d'atteindre le but malgré l'utilisation de chemins détournés ou le recours à des comportements déconseillés qui ne sont pas interdits et permettent d'atteindre le but mais qui à force de répétition finissent par provoquer un accident ou un échec (comme suivre une voiture sans respecter les distances de sécurité par exemple).

On voit dans ces différentes causes apparaître d'autres problèmes du conducteur : les erreurs du conducteur débutant qui ne sait pas comment réagir face à une situation inconnue, les habitudes tenaces de certains conducteurs qui préfèrent adopter des solutions habituelles au mépris des règles (couper les virages ou suivre de très près le conducteur précédent par exemple pour la conduite automobile), l'échec de prise d'informations.

II - 3. 3. Erreurs d'activité au niveau basé sur les connaissances déclaratives :

Ce type d'erreur est basé sur des défaillances qui apparaissent lors de l'utilisation du mode de raisonnement conscient au niveau KB. Ces erreurs sont donc intimement liées à la nécessité de résoudre un problème inconnu des niveaux inférieurs. Lors de cette résolution un raisonnement séquentiel très puissant, mais lent et difficile, est mis en œuvre. Ce raisonnement peut donner de très bons résultats, mais il lui arrive aussi de provoquer des erreurs très difficilement perceptibles du fait de l'intense concentration qui a été nécessaire pour aboutir à ce résultat. On peut finalement attribuer les défaillances de ce mode de raisonnement aux limitations intrinsèques de celui-ci que nous explicitons ci-dessous.

- L'utilisation du niveau KB ne peut se faire que par la réduction de l'espace de travail en concentrant son attention sur une petite partie de celui-ci. Le résultat est une sélectivité extrême qui risque de porter trop d'attention à des caractéristiques non pertinentes ou trop peu d'attention aux données importantes.
- La limitation de l'espace de travail induit une forte dépendance de la charge de travail en fonction de la représentation du problème. Un problème mal conditionné s'avèrera donc très difficilement résoluble.
- La gestion des données favorise les données les plus accessibles ce qui peut conduire à rater des données "cachées" (c'est-à-dire moins facilement accessibles).
- La résolution des ambiguïtés est mal faite puisque l'on a tendance à favoriser rapidement une interprétation disponible de la situation et à refuser l'ambiguïté.
- *"Les sujets qui résolvent les problèmes et les planifient, semblent accorder une confiance excessive à la justesse de leurs connaissances."* Reason [Reason 93] (page 134) montre ainsi que plus le sujet est habitué à résoudre des problèmes plus il a confiance en ses décisions. Il aura donc tendance à se concentrer uniquement sur les données qui confirment ses choix et à négliger les autres données.
- Après l'étape de résolution du problème et la planification de l'action à appliquer, le sujet se livre à une récapitulation de son plan d'action pour détecter d'éventuelles erreurs. Malheureusement cette récapitulation est biaisée, le sujet ayant un a priori positif pour celui-ci. De plus la récapitulation s'arrête lorsque le nombre de paramètres évalués est jugé suffisant et non lorsque tous ont été vérifiés.
- L'être humain détecte et évalue très difficilement les différents types de corrélations, surtout lorsqu'elles ne correspondent pas à sa vision du monde.
- On tend généralement à préférer un mode d'organisation simple, ce qui peut donc conduire un sujet à regrouper deux organisations compliquées de mêmes personnes ou objets dans une seule organisation simple. Ceci peut alors conduire le sujet à mal interpréter une situation et ainsi à prendre de mauvaises décisions.
- Cette tendance à la simplification se retrouve dans le cas de la causalité. En effet, on préférera se souvenir des régularités du passé (qui sont apparues plus souvent et ont donc un poids plus important) ce qui pourra nous conduire à négliger la possibilité d'une irrégularité, d'un changement. La connaissance d'un résultat antérieur augmentera donc sa vraisemblance et risque donc, lors d'une nouvelle rencontre, de conduire le sujet à surestimer ses capacités de contrôle.
- Enfin, la limitation principale est due à la complexité de la situation. Lors d'une situation de stress le sujet a tendance à se replier vers les réflexes et les lois bien maîtrisées tout en faisant passer les "lois" après la nécessité d'atteindre l'objectif ce qui peut provoquer des violations de celles-ci.

Il existe donc deux grandes limitations que peut rencontrer l'être humain lorsqu'il doit recourir au niveau KB : la limitation de sa capacité de traitement et sa tendance à chercher la simplification de toutes les situations (quitte à simplifier à l'excès) et à aller vers la solution la plus facile. Ces deux limitations peuvent conduire le conducteur d'un système à risques à de graves erreurs, très rarement détectées par celui-ci et dont les conséquences peuvent être catastrophiques. C'est pourquoi la plupart des systèmes à risques sont pilotés non par un mais par plusieurs opérateurs qui peuvent ainsi exercer un contrôle mutuel sur les actions de l'autre. Néanmoins, comme on l'a vu dans le cas de la catastrophe de Tenerife, un tel contrôle n'est utile que s'il est pris en compte par l'opérateur ayant effectué l'erreur et si les opérateurs n'ont pas de modes communs (même formation, même expérience, etc.).

Activité basée sur les automatismes	
<i>Inattention</i>	<i>Attention Excessive</i>
Ratés de double capture Omissions suivant des interruptions Intentionnalité réduite Confusions perceptives Erreurs d'interférences	Omissions Répétitions Inversions
Activité basée sur les règles	
<i>Mauvaise application de règles correctes</i>	<i>Application de règles erronées</i>
Premières exceptions Contre-signes et non-signes Surcharge d'information Force de la règle Règles générales Redondance Rigidité	Déficiences d'encodage Déficiences de l'action Règles erronées Règles inélégantes Règles déconseillées
Activité basée sur les connaissances déclaratives	
<i>Sélectivité</i> <i>Limitations de l'espace de travail</i> <i>Accessibilité des faits</i> <i>Biais de confirmation</i> <i>Confiance excessive</i> <i>Récapitulation biaisée</i> <i>Difficultés avec la corrélation</i> <i>Préférence pour les organisations simples - Effet de Halo</i> <i>Difficultés avec la causalité</i> <i>Difficultés avec la complexité</i>	

Tableau 2 : Résumé des principales catégories de modes de défaillance

II - 3. 4. Violations

Les violations sont une catégorie spécifique de l'erreur humaine qui touche la prise de décision de l'humain. Dans le cas d'une violation, l'opérateur humain franchit de façon volontaire ou involontaire certaines des règles imposées pour la conduite du système. Ces violations peuvent initiées de trois façons différentes :

- Involontairement : la violation est alors véritablement une erreur qui intervient au niveau de l'action ou de la prise de décision. Elle peut aussi être la conséquence d'une mauvaise appréciation de la situation (un conducteur empruntant un sens unique à contresens alors qu'il n'a pas vu la signalisation par exemple).
- Contrainte : la violation est alors le résultat d'une prise de décision de l'opérateur liée à la situation. La situation peut être trop complexe pour l'opérateur qui doit alors franchir certaines règles pour garder la maîtrise du système comme nous l'avons vu précédemment.
- Volontairement : la violation est ici le résultat de la prise de décision volontaire de l'opérateur, il peut alors s'agir soit d'un comportement volontairement destructeur (volonté de l'opérateur de détruire ou de nuire au système piloté – à l'image des kamikazes Japonais par exemple) soit d'une BTCU. Dans ce dernier cas, comme nous l'avons mentionné précédemment, l'opérateur franchit certaines règles pour optimiser la performance du système en limitant les contraintes qui s'appliquent sur lui.

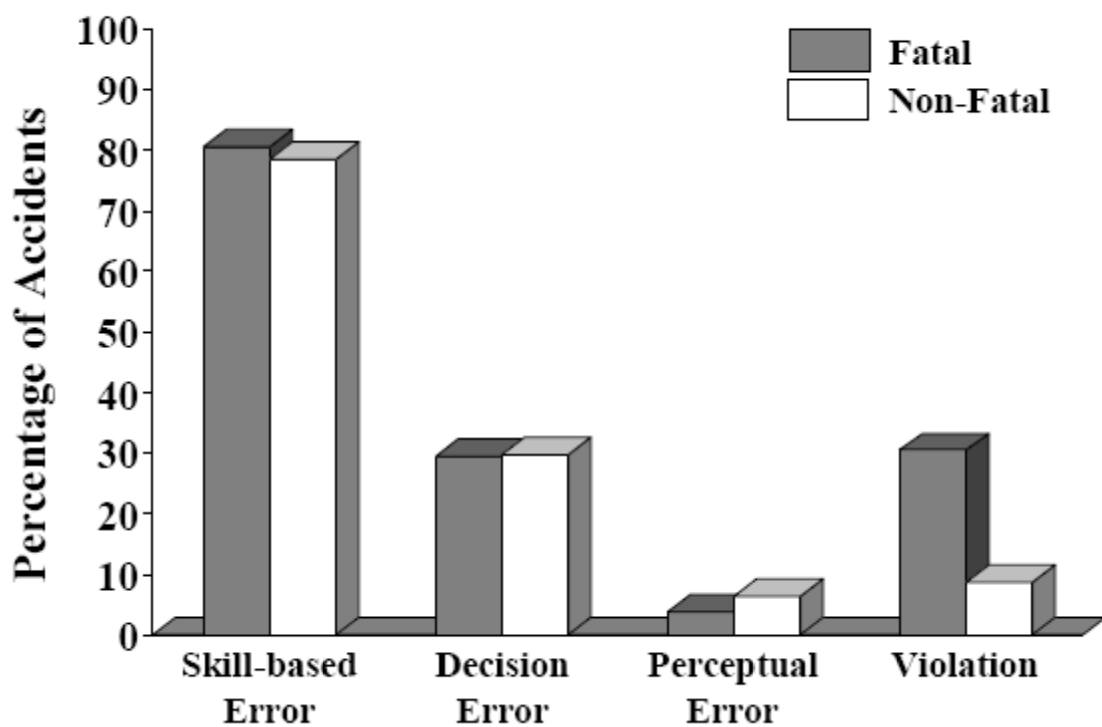


Figure 11 : Pourcentage d'accidents fatals et non fatals dans l'aviation générale suivant le type d'erreur source ([Wiegmann 05] page 8)

Ces violations conduisent toutes à un affaiblissement de la sécurité du système en déplaçant son point de fonctionnement vers des zones plus dangereuses, réduisant ainsi les marges de sécurité disponibles. Par ailleurs, les violations causent proportionnellement beaucoup de morts que les simples erreurs ([Wiegmann 05] conclut ainsi que les violations causent proportionnellement 4.57 fois plus de morts que les autres erreurs) comme l'illustre la Figure 11 dans le cadre des accidents d'aviation générale aux Etats-Unis entre 1990 et 2000.

II - 3. 5. Conclusion :

La capacité de la pensée humaine à simplifier des situations très complexes grâce à la décomposition en trois modes de fonctionnement et au compromis cognitif donne à l'être humain une très grande efficacité dans l'action face à de nombreuses situations comme nous pouvons le constater dans la vie de tous les jours. Malheureusement, cette efficacité est obtenue au détriment de la fiabilité du raisonnement et il arrive donc fréquemment que l'on commette des erreurs. Si la plupart d'entre-elles sont sans conséquences ou rattrapées ou détectées à temps, surtout dans le cas des erreurs de type SB (elles contribuent d'ailleurs à l'apprentissage), certaines erreurs produites dans les niveaux élevés du raisonnement ne sont ni détectées ni corrigées et nous exposent donc à leurs conséquences. Ces erreurs sont moins facilement détectées car elles sont générées au même niveau que les vérifications attentionnelles, biaisant donc ces dernières comme nous l'avons vu.

De la même façon, les violations, qui constituent finalement une forme d'erreurs volontaires peuvent entraîner comme nous l'avons vu de graves conséquences à la fois pour le système et pour l'opérateur qui est d'autant moins apte à percevoir le risque encouru qu'il a l'habitude d'effectuer cette violation (comme on l'a vu dans le cas des BTCU qui aident à améliorer le compromis performance du système – coût cognitif pour l'opérateur).

II - 4. La conscience de la situation selon Endsley

La conscience de la situation est une théorie popularisée par Endsley à la fin des années 80 et durant les années 90. Issue de l'analyse du fonctionnement des pilotes de chasseurs durant les combats aériens elle cherche à comprendre comment l'être humain parvient à se faire une idée mentale claire, précise et concise de la situation courante. Cette conscience de la situation a été, depuis les origines, essentielle pour la survie humaine comme le rappelle Endsley dans sa présentation de la théorie : "*Prehistoric man undoubtedly needed to be aware of many cues in his environment in order to successfully hunt and keep from being hunted.*" ([Endsley 00] Chapitre 1, page 3).

II - 4. 1. Définition

Endsley définit la conscience de la situation comme "la perception des éléments d'un environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche" ("*The perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future.*" [Endsley 88]). La conscience de la situation traduit ainsi la connaissance élaborée par un individu sur l'environnement dans lequel il évolue ainsi que l'anticipation des changements qui vont y survenir.

Pour Endsley, la génération de cette conscience de la situation se fait selon un processus hiérarchique en trois étapes:

1. Une première phase de **perception de l'environnement** au cours de laquelle l'individu rassemble les données pertinentes à la tâche qu'il effectue. Un pilote d'avion s'informerait ainsi des valeurs affichées par les différents cadrans du cockpit, les éventuelles alarmes et voyants lumineux. Il prêterait de même attention aux informations relayées par les contrôleurs aériens et observerait les conditions météo devant lui. De la même façon un conducteur automobile chercherait à connaître la position et la dynamique de chaque obstacle statique et mobile dans son environnement, la dynamique de son propre véhicule ainsi que la signalisation routière. Il n'a par contre pas besoin de prêter attention aux publicités présentes sur le bord de la route par exemple.
2. Dans une deuxième phase de **compréhension de l'environnement**, l'individu cherche à comprendre les données qu'il a recueillies à l'étape précédente. On retrouve ici le principe des schémas de raisonnement chers à Rasmussen qui vont permettre à l'individu de former plus rapidement une image mentale de la situation.
3. Dans une dernière phase de **prédiction de l'évolution de l'environnement**, l'individu cherche à prédire au moins à très court terme l'évolution de l'environnement courant en se basant sur sa compréhension de l'état courant de l'environnement et de sa dynamique.

Comme on peut le voir la conscience de la situation est intimement liée à la tâche effectuée par l'individu. Elle évolue de plus de façon dynamique en fonction de l'évolution du système. Plusieurs facteurs (liés aussi bien à la tâche et au système considérés qu'à l'individu lui-même) peuvent ainsi influencer la conscience de la situation et la prise de décision associée comme le schématise Endsley dans la Figure 12.

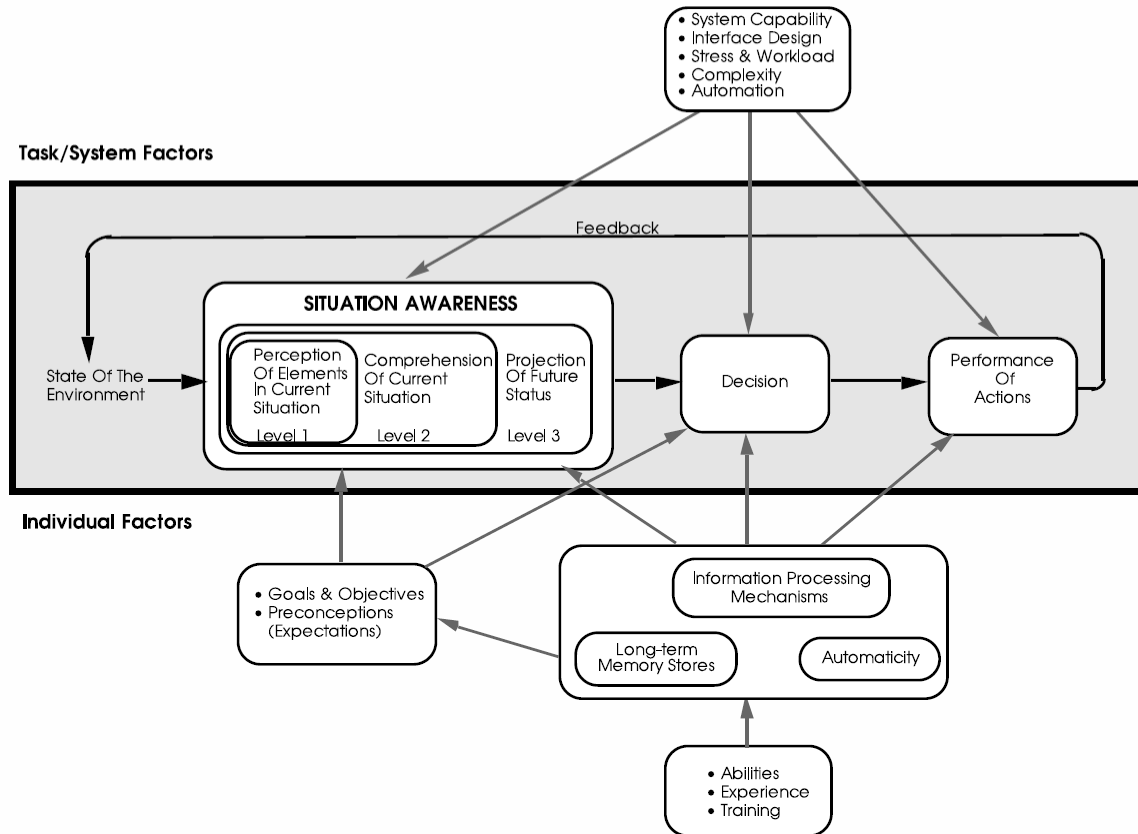


Figure 12 : La Conscience de la Situation dans la prise de décision dynamique [Endsley 95]

II - 4. 2. Mécanismes mis en jeu

Endsley propose dans [Endsley 88] un modèle de la Conscience de la Situation basé sur la décomposition du raisonnement selon les mécanismes cognitifs utilisés. Ce modèle, repris dans la Figure 13, est utilisé par Endsley pour détailler le fonctionnement de chaque mécanisme mis en jeu. Nous proposons ici une brève description des ces différents mécanismes. On trouvera une description plus détaillée de chacun de ces mécanismes dans [Baillly 04].

II - 4. 2. 1. Short term sensory store :

La première étape dans la création d'une conscience de la situation provient de la façon dont l'individu perçoit inconsciemment les informations saillantes dans son environnement³. Ces informations conduisent l'attention à se focaliser autour d'elles, permettant ainsi de réduire la charge cognitive liée à l'étape de perception proprement dite (il est ainsi beaucoup plus aisé de percevoir un lion dans la savane lorsqu'il bouge que lorsqu'il est immobile).

³ La proximité spatiale, le mouvement, la couleur est les formes sont autant d'indices permettant à l'individu d'extraire les informations saillantes nécessaires. On retrouve ici la théorie de la Gestalt (voir [Gestalt])

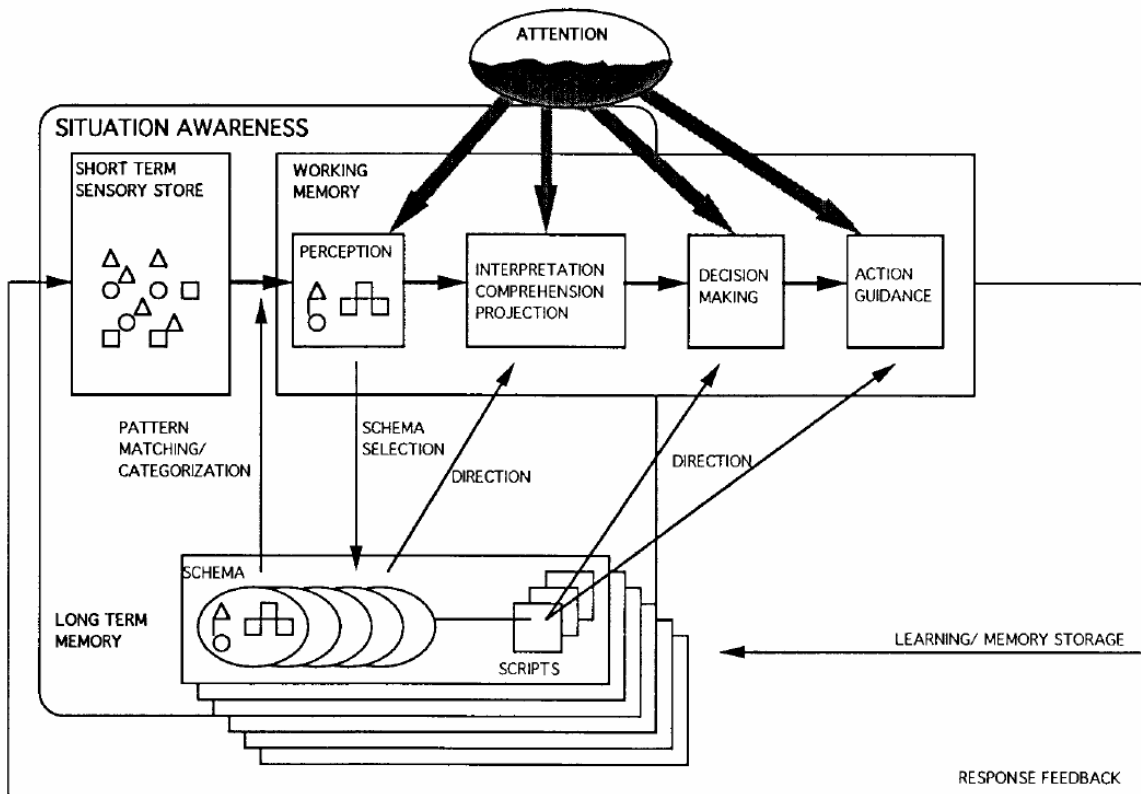


Figure 13 : Mécanismes de la conscience de la situation d'après [Endsley 88]

II - 4. 2. 2. L'attention

L'attention est comme nous l'avons vu au travers des modèles d'erreurs de Reason une des sources principales d'erreurs. On retrouve dans le modèle de la Conscience de la Situation le rôle très important joué par l'attention dans l'établissement correct d'une image mentale de la situation. En effet, l'attention est nécessaire à la perception correcte (i.e. percevoir l'ensemble des informations pertinentes nécessaires à l'accomplissement de la tâche) mais aussi aux différents contrôles attentionnels effectués au cours du raisonnement. Endsley, met en avant le problème de la limitation attentionnelle (liée à une focalisation trop forte de l'attention ou à surcharge des capacités d'attention) qui mène à une mauvaise interprétation et donc à une mauvaise conscience de la situation.

II - 4. 2. 3. La perception

Dans le modèle de la conscience de la situation proposé par Endsley, la perception est conditionnée par la mémoire de travail et la mémoire à long terme. L'individu anticipe ainsi la localisation et la nature des informations qu'il va recevoir afin de faciliter leur perception. Cette anticipation mène ainsi à une plus grande efficacité lorsque l'environnement se comporte comme attendu mais entraîne une augmentation du risque d'erreur dans le cas contraire. Ce mécanisme renforce de plus le problème de limitation attentionnelle évoqué précédemment en focalisant la perception sur les éléments escomptés.

II - 4. 2. 4. Schémas, scripts et automatismes

On retrouve dans le modèle de la conscience de la situation les schémas présents dans le modèle de Rasmussen sous la forme de règles. On retrouve ainsi le même appariement d'éléments perçus avec des règles connues permettant de comprendre plus facilement la situation et donc de prendre une décision plus rapidement et de mieux agir. Les schémas de Endsley guident aussi la perception de la situation, l'individu ayant ainsi des attentes sur l'environnement et son évolution liées au schéma en cours. Dans ce modèle les scripts constituent le prolongement logique du schéma en définissant pour chaque schéma les actions à mettre en œuvre lorsque le schéma est reconnu.

Endsley propose, de la même façon que Reason, le concept d'automatismes. De la même façon que les scripts, les automatismes permettent d'agir ou de réagir à la situation de façon très rapide dès qu'une situation connue est reconnue. Les automatismes diffèrent cependant des scripts du fait qu'ils sont activés de façon quasi inconsciente (l'individu aura conscience des conditions l'ayant mené à l'action mais ne pourra expliquer comment il a abouti à générer cette action).

II - 4. 2. 5. Synthèse

Pour Endsley la conscience de la situation d'un individu est principalement limitée par ses capacités attentionnelles et par la capacité de sa mémoire de travail (i.e. sa capacité à synthétiser les informations perçues, les interprétations effectuées et les actions prises précédemment afin de guider au mieux la génération de la conscience de la situation courante). L'utilisation des schémas, scripts et automatismes permet de s'affranchir grandement de ces problèmes de limitations en réduisant la charge cognitive demandée mais introduit un risque de mauvaise perception ou compréhension de la situation courante comme décrit par Reason.

Par ailleurs, Endsley insiste sur le rôle joué par les buts et les motivations de l'individu. En effet, si la conscience de la situation influe sur les buts recherchés par l'individu, ces mêmes buts influent sur la conscience de la situation. Ainsi, comme on le schématise Endsley dans la Figure 14, les buts de l'individu influent sur la sélection du modèle mental qui sera mis en œuvre pour comprendre la situation. Or comme nous l'avons vu ce modèle mental dirige l'attention vers les éléments espérés et permet la compréhension et l'anticipation grâce aux schémas et scripts associés. Le choix du modèle mental, et donc les buts de l'individu, influencent donc considérablement la conscience de la situation. On retrouve ainsi l'influence des facteurs individuels présentés dans la Figure 12.

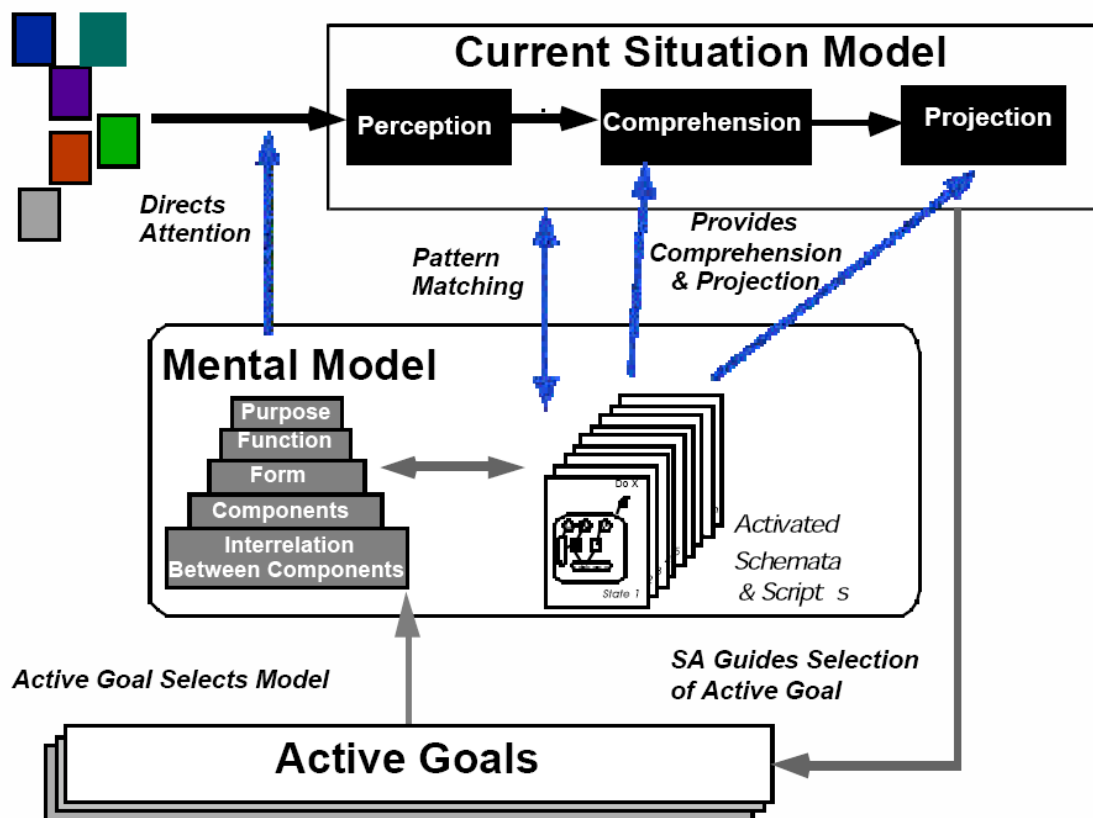


Figure 14 : Interactions entre Conscience de la situation et buts ([Endsley 00], page 11)

II - 4. 3. Conscience de la situation et erreurs

La théorie de la conscience de la situation décrit les mécanismes guidant le raisonnement de l'individu. Néanmoins, l'analyse de ces mécanismes permet aussi de comprendre les causes de certaines erreurs commises par les individus. Endsley ne cherche pas à décrire tous les types d'erreurs possibles, comme le fait Reason par exemple, mais plutôt à comprendre les facteurs menant à une mauvaise conscience de la situation. Elle propose ainsi une classification des erreurs en 3 classes correspondant aux étapes de son modèle : perception, interprétation et compréhension, et enfin anticipation.

II - 4. 3. 1. Erreurs au niveau perceptif

Ce type d'erreur apparaît lorsque la totalité de l'information pertinente à la tâche en cours n'est pas perçue par l'individu. Ce type d'erreurs est le plus courant (plus des trois quarts des erreurs d'après Jones et Endsley [Jones 96]) du fait de son positionnement à l'origine du raisonnement. Les principales causes de ce type d'erreurs sont :

- L'indisponibilité des données qu'elles soient masquées à l'individu (cas des angles morts dans l'automobile par exemple) ou non disponibles par le système piloté (cas de la panne d'un voyant d'alerte par exemple). Endsley cite ainsi (dans [Endsley 95]) l'accident du vol 255 de la Northwest Airlines, le 16 Août 1987 à Détroit, causé en partie par une défaillance de l'alarme de décollage qui aurait dû avertir les pilotes que les volets étaient rentrés. L'absence de cette alarme ne permit donc pas aux pilotes de percevoir cette information essentielle pour éviter l'accident.
- La difficulté à discriminer ou à détecter l'information pertinente. L'information est alors noyée dans le bruit ambiant et/ou ne présente pas une saillance suffisante pour être détectable par l'individu. La conduite par fort brouillard rentre ainsi dans cette catégorie, d'autant plus si les véhicules précédents n'allument pas leurs feux de brouillard.
- Echec de la surveillance ou de l'observation de l'information pertinente. Ce type d'erreurs apparaît comme la cause principale d'erreurs dans l'étude de Jones et Endsley, représentant 35% des erreurs totales soit presque la moitié des erreurs de perception. Ces erreurs sont principalement causées par une distraction de l'individu (conversation avec un passager par exemple) ou par un problème de surcharge cognitive menant à une limitation attentionnelle. Elles peuvent aussi être causées par une croyance excessive dans les systèmes automatisés tels que le pilote automatique d'un avion.
- Mauvaise perception des données. Ces erreurs proviennent principalement de la perception par un individu des données destinées à d'autres ou de leur mauvaise "compréhension". C'est par exemple le cas lorsqu'un individu croit que l'on s'adresse à lui alors que la conversation est destinée à un autre.
- L'oubli par la perte de la mémoire de travail constitue la dernière grande source de ce type d'erreurs. L'individu oublie alors certaines informations qu'il a perçues précédemment, ou oublie d'effectuer certaines tâches. Ce type d'erreurs intervient lorsque l'individu est surchargé et/ou distrait.

II - 4. 3. 2. Erreurs au niveau de l'intégration des données

Ce type d'erreur apparaît lorsque l'individu ne parvient pas à intégrer ou à comprendre correctement la situation alors qu'il a perçu correctement l'information pertinente. Les principales causes de ce type d'erreurs sont:

- L'absence ou la pauvreté du modèle mental utilisé. Le manque d'expérience de l'individu conduit à ce type d'erreurs de même que la compréhension incomplète du fonctionnement d'un système par exemple (Endsley prend ainsi l'exemple d'un pilote novice sur un appareil et ne sachant pas que le pilote automatique ne maintient pas l'altitude pendant les virages, entraînant ainsi un brusque changement d'altitude).
- L'utilisation d'un modèle mental erroné. Ces erreurs peuvent provenir de l'usage excessif d'un modèle mental préféré. L'individu cherche alors à tout prix à faire correspondre les données perçues à son modèle mental et ne cherche pas à le remettre en cause. L'inattention peut aussi conduire à ce type d'erreurs en négligeant certaines informations pourtant perçues.

- La confiance excessive dans les valeurs par défauts d'un modèle mental. C'est en particulier le cas des erreurs par habitude, l'individu ne cherchant pas à remettre en cause les valeurs habituelles de son modèle à partir des informations perçues. Ces habitudes peuvent aussi fausser l'interprétation du comportement des autres (cas d'une intersection avec une route très peu utilisée, le conducteur a l'habitude que les véhicules continuent sur la route principale et ne comprend que trop tard que le véhicule qui le précède ralentit pour tourner).

II - 4. 3. Erreurs au niveau anticipatif

Ce dernier type d'erreurs correspond à une prédiction erronée de l'évolution de la situation ou à l'absence de prédiction. Ce type d'erreurs peut provenir de l'absence de modèle mental ou d'un modèle mental pauvre qui ne permettra donc pas de prédire correctement l'évolution de la situation. Un conducteur novice a ainsi du mal à évaluer le temps dont il dispose pour s'insérer dans la circulation du fait de son manque d'expérience.

Une autre source de ce type d'erreurs provient d'une confiance excessive dans le modèle utilisé. L'individu projette alors plus loin qu'il ne devrait l'évolution de la situation en se basant sur la situation courante et ne contrôle pas assez par la suite. Cette sur-projection mène à des erreurs lorsque la situation est beaucoup plus volatile que perçue.

II - 4. 4. Conclusion

La théorie de la conscience de la situation permet de décrire les processus cognitifs mis en œuvre par un individu pour évoluer dans son environnement. Endsley propose ainsi un modèle basé sur l'utilisation de modèles mentaux très proches des règles de Rasmussen. Elle décompose cependant le raisonnement entre perception, interprétation et anticipation et met en exergue les influences extérieures qui jouent sur la conscience de la situation. Ce modèle apparaît ainsi comme particulièrement adapté pour étudier le comportement des opérateurs de systèmes à risques. La mesure de la conscience de la situation d'un opérateur permettrait ainsi de s'assurer qu'il pilote le système dans de bonnes conditions.

II - 5. Synthèse

Le raisonnement humain repose comme nous l'avons vu sur un compromis cognitif permettant à chaque instant de réduire la complexité du traitement de chaque tâche afin de minimiser la charge cognitive relative associée tout en conservant une bonne fiabilité du traitement global. Ce compromis est effectué afin de maintenir un niveau de conscience de la situation correct pour l'accomplissement des tâches en cours. En effet, comme le montre Endsley par la Figure 15, l'opérateur humain a une capacité limitée à traiter l'information. Il peut ainsi maintenir une conscience de la situation correcte tant que la charge cognitive est limitée mais son niveau de conscience de la situation chutera très vite lorsque la charge cognitive sera trop grande, conduisant ainsi aux erreurs présentées précédemment. Il est donc essentiel pour l'opérateur humain de minimiser sa charge cognitive.

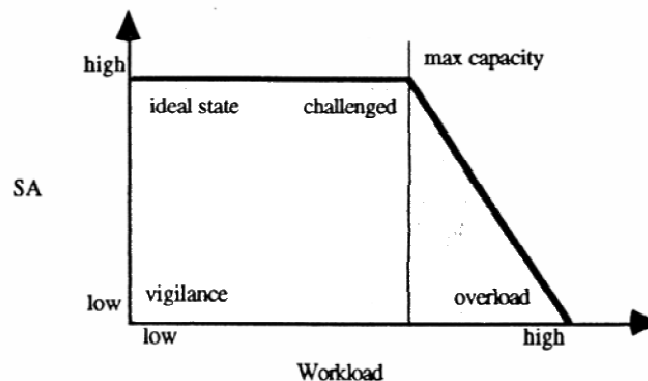


Figure 15 : Conscience de la situation et charge cognitive selon Endsley ([Endsley 93])

Cette minimisation se fait par le biais de l'apprentissage de schémas d'action correspondant aux tâches les plus courantes qui seront ainsi exécutées avec une faible charge cognitive. De plus l'usage d'une simplification du contexte de la tâche en assimilant la tâche complexe à une tâche plus facilement exécutable ou déjà connue permet, grâce à une prise de risque modérée, de diminuer encore la charge cognitive.

Cette méthode de simplification ainsi que les processus de traitement des tâches introduisent naturellement un risque d'erreurs. Ces erreurs peuvent être causées par de nombreux facteurs comme nous avons pu le voir précédemment. On voit apparaître dans les causes de ces erreurs les signaux faibles indicateurs d'un risque d'accident au travers des erreurs d'inattention et des phénomènes de surcharge cognitive entraînant la non-perception ou la non-prise en compte de ces signaux.

Une deuxième cause majeure d'erreurs de raisonnement provient de la difficulté pour l'être humain à remettre en cause ses résultats ainsi que ses hypothèses. Ainsi, lorsque le niveau de raisonnement cognitif demandé par le traitement d'une tâche augmente, l'humain doit émettre des hypothèses et des propositions de solution afin de résoudre son problème. Il lui est alors difficile de remettre en cause les hypothèses et le raisonnement l'ayant conduit à son résultat. Lorsque de telles erreurs se produisent, seul un point de vue extérieur à l'erreur, permet de détecter cette erreur de raisonnement. Cette difficulté à se remettre en cause apparaît d'autant plus que l'humain se perçoit comme un expert de cette tâche.

Une troisième source principale d'erreurs provient du contexte du traitement de la tâche, et donc du compromis cognitif effectué. En situation de stress (du soit à la criticité de la tâche soit au laps de temps très court permis pour l'effectuer) l'être humain peut avoir deux comportements radicalement opposés mais tous deux potentiellement accidentogènes. Il aura soit tendance à vouloir réduire la prise de risque au maximum et se rabattra donc sur des situations connues, en ne considérant que la fraction des informations disponibles validant son raisonnement, soit au contraire, il réduira ses contrôles et proposera une solution non vérifiée ou en violation des limites réglementaires.

Enfin, une dernière source d'erreurs provient des motivations personnelles de l'opérateur. Ainsi l'opérateur humain aura tendance à chercher à simplifier son travail. Cette tendance à la simplification conduit alors parfois à la violation de certaines limites réglementaires destinées à maintenir des marges de sécurité suffisantes mais qui impose une surcharge cognitive, de travail ou de stress. De la même façon, l'opérateur peut être amené à chercher à augmenter sa productivité à moindre coût, le conduisant là encore parfois à outrepasser certaines règles. De telles violations généralement sans conséquences conduisent cependant à déplacer le point de fonctionnement d'un système à risques vers ses marges de sécurité, augmentant ainsi le risque d'un accident.

Le conducteur d'un système à risques est donc une machine faillible, comme le montrent les statistiques d'accident attribuant au facteur humain la responsabilité principale de la majorité des accidents, du fait de ses méthodes de raisonnement. Il reste néanmoins essentiel au contrôle de ces systèmes à risques dont la fiabilité ne repose souvent que sur la capacité humaine à inventer de nouvelles solutions aux problèmes qui se présentent. En effet, la conduite de la plupart de ces systèmes à risques est réglementée par un ensemble de lois et de procédures visant à uniformiser le contrôle et à donner la marche à suivre pour un contrôle correct en toutes situations envisagées (logique du "tout est sous contrôle"). Le mot "envisagées" est ici très important car les procédures et les lois qui sont données aux opérateurs pendant leur formation ne permettent de traiter que les cas qui ont été déjà rencontrés ailleurs ou qui ont été envisagés par les concepteurs du système. Lorsque un événement imprévu se produit les procédures ne permettent généralement plus de réagir correctement, la capacité d'improvisation de l'humain est alors essentielle.

Comment peut-on alors dépasser cette "dernière frontière" constituée par le facteur humain?

CHAPITRE III – LA PERCEPTION DU RISQUE, CLE DE LA SURETE?

Nous avons vu précédemment que l'opérateur humain est une machine faillible, doté d'une capacité cognitive limitée et qui n'est de plus pas nécessairement dédiée à la tâche à accomplir. De cette constatation, nous avons vu émerger de nombreux mécanismes possibles de génération d'erreurs dans la conduite d'un système par son opérateur. Or les études sur les principales causes d'accidents dans les systèmes à risques ont montré que les erreurs des opérateurs humains étaient au moins en partie responsables de l'accident dans 90% des cas [Treat 77]. C'est ce qui nous a amené à qualifier l'être humain de "dernière frontière" pour la sécurité des systèmes. On peut dès lors se demander comment améliorer encore la sécurité des systèmes à risques compte tenu de la présence de l'opérateur humain dans la boucle de contrôle du système.

L'automatisation complète de la conduite des systèmes à risques pourrait apparaître comme la solution idéale puisqu'en supprimant l'opérateur humain du contrôle du système on supprime la source principale d'accidents. Cette solution semble néanmoins très difficilement réalisable à l'heure actuelle compte-tout de la complexité des opérations de conduites à réaliser et de la part d'improvisation nécessaire dans les situations d'urgence (on peut se poser la question de la réaction d'une machine aux commandes de l'Airbus A320 qui a amerri sur l'Hudson River en début d'année 2009) non prévues par le manuel dans lesquelles l'opérateur humain semble irremplaçable. De plus on peut s'interroger sur la confiance qu'inspirerait à la population un système à risques entièrement automatisé.

Si l'être humain semble donc devoir encore garder son rôle de décideur final dans le contrôle des systèmes à risques, l'éradication de toutes les erreurs humaines apparaît comme une solution séduisante car elle permettrait d'avoir des opérateurs humains parfaits. Néanmoins, comme le précise Amalberti ([Amalberti 01] pages 193-195), la plupart des systèmes techniques donnent à l'opérateur une marge de sécurité dans le contrôle du système afin de lui permettre de récupérer ses erreurs. La suppression de ces erreurs entraînerait donc une suppression de ces marges, une perte des capacités d'apprentissage et donc un risque d'accident bien plus grand.

Nous proposons donc, plutôt que d'aider l'opérateur à supprimer ses erreurs, de l'aider à prendre en compte le risque courant de sa situation, lui donnant ainsi une indication de sa marge de sécurité mais aussi lui permettant de percevoir une accumulation d'erreurs ou une erreur majeure risquant de lui faire perdre le contrôle. Ce type d'aide a de plus l'avantage de montrer aux opérateurs ayant recours à des BTCU quels sont les risques qui en découlent afin qu'ils gardent à l'esprit la diminution de leurs marges de manœuvres en cas d'incident. On espère ainsi augmenter la conscience de la situation de l'opérateur en lui fournissant une information synthétique sur le risque lié à la situation.

III - 1. Une aide à la prise en compte du risque

Aider l'opérateur humain à percevoir le risque courant de la situation de conduite pourrait ainsi permettre à l'opérateur de mieux appréhender la situation et donc de mieux comprendre l'impact potentiel de chacune de ses actions. Afin de parvenir à ce résultat il faut tout d'abord regarder de plus près la situation de conduite d'un système à risques et les interactions entre ses différents acteurs.

III - 1. 1. Schématisation de la conduite des systèmes à risques

La Figure 16 montre la situation de conduite d'un système à risques générique sous la forme d'un modèle tripartite constitué du ou des opérateurs, du système et de l'environnement du système ainsi que des interactions (interactions physiques ou cognitives) entre ces acteurs. Dans ce modèle, le ou les opérateurs pilotent le système à partir :

- des informations recueillies sur l'état courant du système (grâce aux affichages des capteurs ou par le biais d'informations sensorielles : bruit, vibrations, ...)

- des informations sur l'environnement du système (ceci est surtout vrai dans le cas du pilotage de système se déplaçant dans un environnement mais est aussi valable pour une centrale nucléaire dont le refroidissement dépend du débit et du niveau du fleuve attenant par exemple)
- de leur propre expérience (constituée de leur formation et de l'expérience acquise depuis)
- des buts du pilotage du système (par exemple dans une centrale électrique il pourra s'agir de maintenir une production sûre d'électricité à un bon niveau de puissance)
- des règles et procédures à suivre (qui définissent ainsi les limites d'action des opérateurs)
- mais aussi à partir de buts propres à chaque opérateur (l'envie de repartir le plus vite possible du pilote KLM lors du crash de Tenerife par exemple) qui sont parfois antagonistes avec les règles ou les procédures (c'est là la source des violations présentées au chapitre précédent).

Le ou les opérateurs du système contrôle le processus à la fois par le contrôle direct du système à risques (par le biais du pupitre de commandes dans le cas d'une centrale nucléaire, par les commandes de vol dans le cas du pilotage aérien) mais aussi, lorsque cette action est possible, par des actions sur l'environnement du système. Ainsi l'opérateur d'une centrale nucléaire, face à une nécessité de réduire la puissance produite, demandera au réseau de distribution de réduire la demande sur son réacteur. De même, en cas de canicule, cet opérateur pourra demander à pouvoir rejeter une eau plus chaude dans les cours d'eau utilisés pour le refroidissement de la centrale.

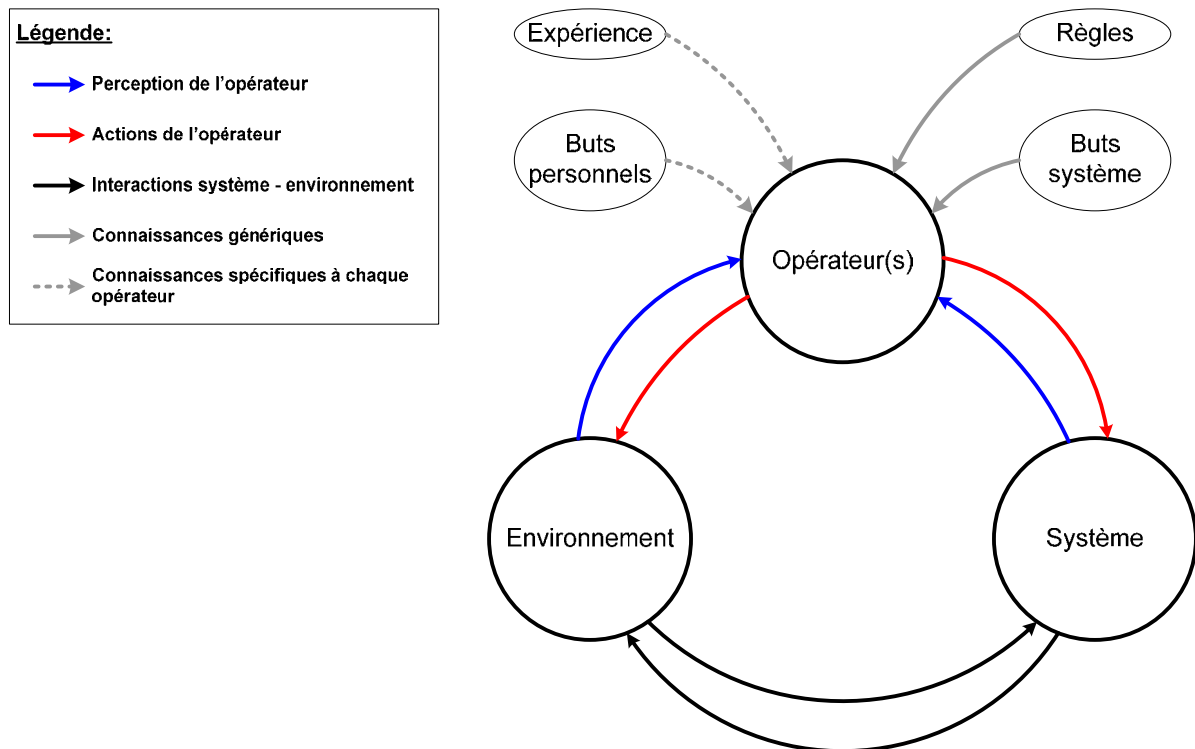


Figure 16 : Vue d'ensemble de la situation de pilotage d'un système à risques

III - 1. 2. Aide à la conduite par la prise en compte du risque

Nous proposons de compléter la représentation tripartite de la tâche de conduite par l'ajout d'une aide à la conduite basée sur l'évaluation du risque d'accident et destinée au conducteur. La tâche de cette aide à la conduite est donc de mesurer à tout moment le risque d'accident, c'est-à-dire le danger associé à la situation courante du système, compte tenu des actions du conducteur, de l'état du système et de son environnement. Nous nous référerons par la suite à cette aide sous le nom de **cindynamètre** (du grec *cindynos* signifiant danger) puisqu'il s'agit finalement d'un "mesureur de danger".

L'objectif du cindynamètre n'est évidemment pas d'éviter toutes les erreurs humaines mais plutôt de donner une information prétraitée au conducteur lui permettant d'avoir une vue d'ensemble de l'état du système (en terme de danger) et ainsi de piloter au mieux celui-ci. On compte ainsi permettre au conducteur de rester toujours dans un fonctionnement sûr du système même en cas de dégradation non perçue des conditions d'utilisation ou de fonctionnement.

III - 1. 2. 1. Situation générale

La Figure 17 représente ainsi l'insertion d'un cindynamètre dans le schéma du pilotage d'un système à risques. On voit apparaître dans cette nouvelle schématisation les différents flux d'informations nécessaires au bon fonctionnement de cette aide :

- La perception de l'état du système au travers de l'utilisation des capteurs existants
- La perception de l'état de l'environnement ou tout du moins des aspects utiles au système perceptibles dans l'environnement. Il pourra par exemple s'agir du niveau de l'eau en amont d'une centrale nucléaire par exemple ou de la visibilité actuelle dans le cas du pilotage d'un avion.
- La perception du comportement et des actions du conducteur afin d'essayer d'évaluer les buts visés par l'opérateur mais aussi afin de contrôler ses actions et son attention.
- La retransmission des consignes d'aide au conducteur par le biais d'une interface homme machine afin de fournir l'aide au conducteur avec la meilleure ergonomie possible.

Les buts du système ainsi que les règles sont évidemment connus et relativement constantes. Il n'est donc pas besoin d'essayer de les évaluer. Les buts du conducteur par contre ne sont pas connus. En général on peut les supposer concordants avec les buts du système néanmoins il peut leur arriver de diverger. Ainsi, un conducteur automobile désirant se rendre en un point en utilisant un système de navigation par satellite pourra décider de s'arrêter avant la destination ou de passer par un autre chemin dans une partie connue du trajet. De même, un pilote d'avion de ligne pourra décider de voler plus vite pour rattraper le retard pris à l'embarquement des passagers ou de contourner une zone de turbulences pour la sérénité des passagers. Il convient donc que le système soit capable de comprendre ces changements locaux d'objectifs afin d'aider au mieux le conducteur.

Il s'agit là de l'une des raisons nécessitant la compréhension au moins partielle du comportement du conducteur. Une deuxième raison provient de la nécessité pour le cindynamètre de ne pas aliéner⁴ l'opérateur en l'alarmant trop souvent ou en l'alarmant pour un risque accepté par l'opérateur. Enfin, le cindynamètre doit s'assurer de l'attention de l'opérateur aux données importantes dénotant une dégradation de la situation afin d'éviter l'apparition de signaux faibles due à la fatigue ou à la surcharge cognitive par exemple.

⁴ Faire perdre au système d'assistance sa crédibilité (syndrome de « Pierre et le loup »)

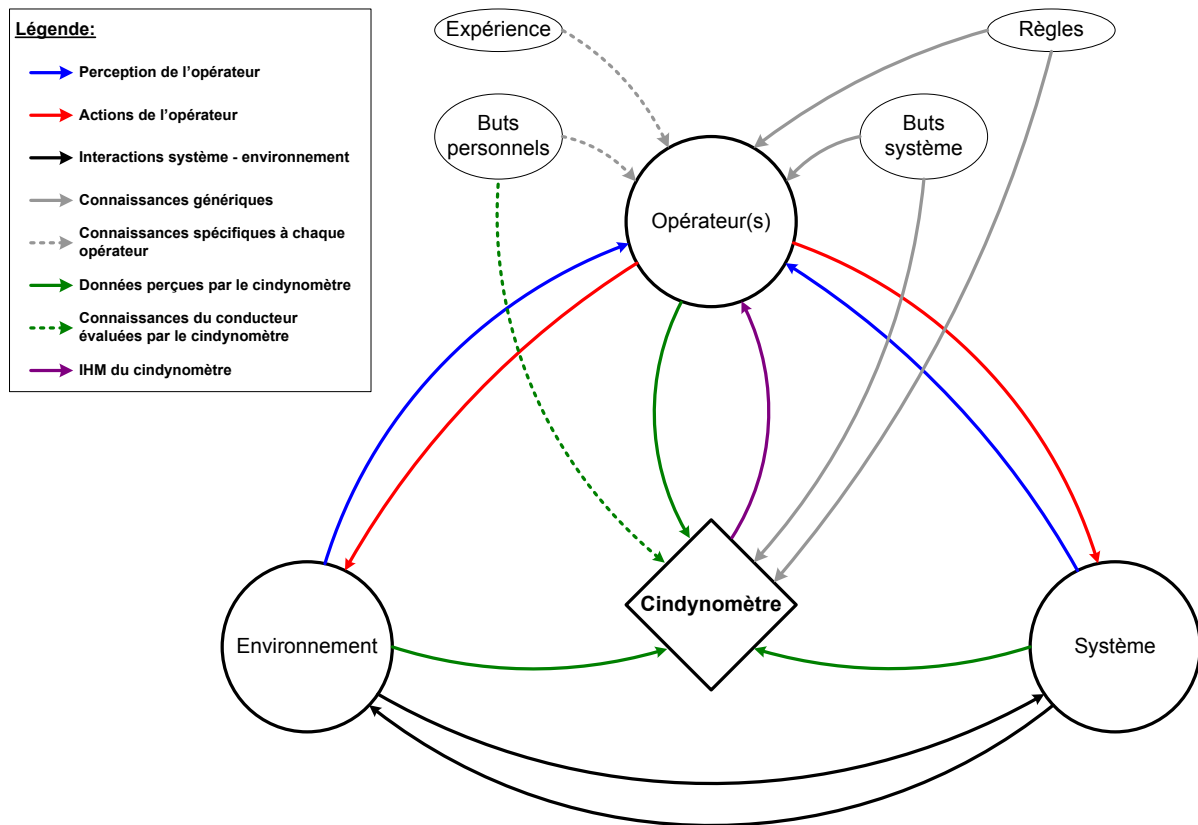


Figure 17 : Schéma d'insertion d'un cindynamètre dans une situation de conduite d'un système à risques

III - 1. 2. 2. Un modèle générique d'implémentation d'un cindynamètre

La réalisation d'un cindynamètre revient à réaliser un système dédié apte à surveiller le système considéré, son environnement et le ou les conducteurs comme le montre la Figure 17. Cette surveillance nécessite donc les moyens de capter l'état de chacun des acteurs de la relation tripartite évoquée précédemment. Elle nécessite de plus des moyens d'interprétation et de compréhension des données captées. Enfin, elle requiert l'existence de méthodes pour présenter au conducteur les informations comprises sur les dangers menaçant à chaque instant le système de façon ergonomique.

L'implémentation proposée pour un cindynamètre reprend donc ces points au sein d'un système informatique couplé à un ensemble de capteurs. Cette architecture repose alors (Figure 18) sur:

- Un ensemble de capteurs "environnementaux" permettant d'évaluer les paramètres de l'environnement qui sont importants pour la conduite du système (température de la source d'eau d'une centrale nucléaire, conditions météorologiques sur le trajet prévu pour un vol commercial, présence d'obstacles sur la voie pour un train, ...).
- Un ensemble de capteurs dits "comportementaux" permettant d'évaluer l'attention, la vigilance et les actions du conducteur. L'usage de caméras semble la méthode la plus à même d'apporter de telles informations mais l'exemple de la conduite des TGV (le conducteur doit presser régulièrement le volant afin de montrer qu'il reste vigilant) nous montre que l'usage d'autres capteurs peut aussi fournir une partie de ces informations.
- Un ensemble de capteurs "système" permettant de connaître l'état du système à tout instant. Il s'agit là principalement d'interfacer le cindynamètre avec les capteurs déjà existants et utilisés pour aider le conducteur ou par les systèmes de sécurité automatiques (et souvent invisibles au conducteur).
- Un programme informatique de fusion des données captées fonctionnant en plusieurs étapes :

- Extraction des informations pertinentes de chaque capteur par un traitement des données brutes (surtout dans le cas de capteurs fournissant beaucoup d'informations simultanément tels que les caméras ou les radars par exemple).
 - Fusion de ces données traitées afin d'évaluer l'état courant du système et de son environnement ainsi que le comportement du conducteur, ses buts et son attention.
 - Evaluation de la situation par l'analyse des résultats précédents, détectant l'existence éventuelle de risques pour la conduite du système, les dangers qu'ils représentent ainsi que l'attention portée par le conducteur à ceux-ci et les éventuelles contre-mesures qu'il adopte.
- Une interface homme machine permettant de présenter au conducteur les informations sur les risques encourus et les sources de dangers associées et lui proposant éventuellement des solutions pour ramener la situation dans des limites moins dangereuses. La méthode de représentation de ces informations et d'éventuelles alarmes qui y seraient associées dépend évidemment de la criticité des risques encourus et de l'importance des dangers associés.

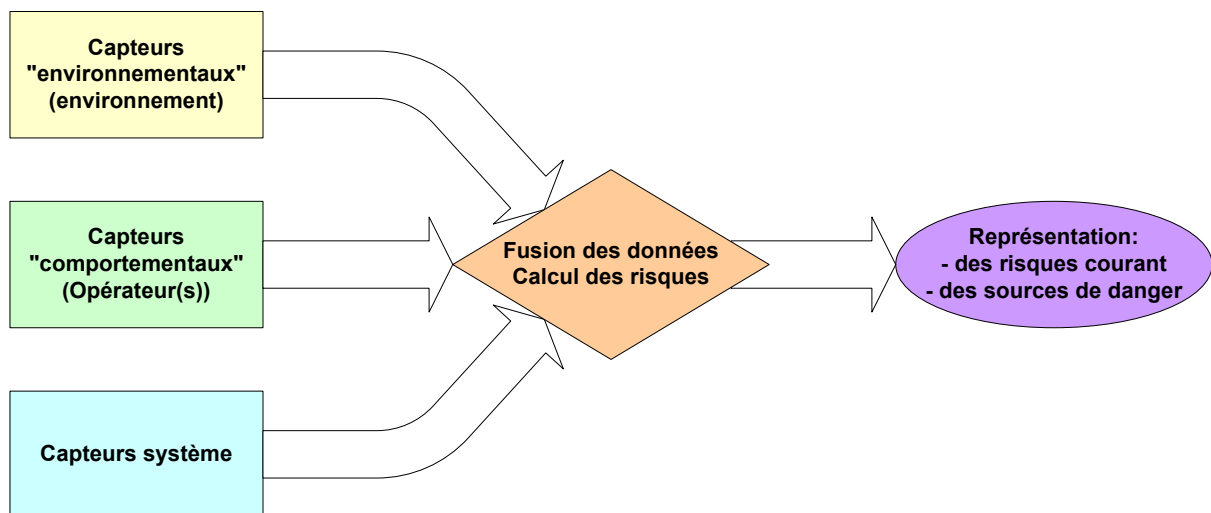


Figure 18 : Schéma générique de l'architecture d'un cindynomètre

Evidemment, chaque être humain étant différent dans son fonctionnement, une partie de ses actions et de ses comportements lui est propre. Il est donc important pour le bon fonctionnement d'un cindynomètre que celui-ci soit capable d'adapter son fonctionnement à l'opérateur. Cette adaptabilité favorise de plus l'acceptabilité du cindynomètre par les opérateurs et lui garantit donc une plus grande crédibilité auprès d'eux. Pour se faire, un cindynomètre devra être capable d'acquérir sa propre expérience à mesure qu'il est utilisé par le ou les opérateurs. Cela permettra ainsi de passer d'un système générique programmé à partir des connaissances de quelques experts à un système plus spécifiquement adapté à sa tâche. De plus, cet apprentissage automatique lui permettra d'acquérir des connaissances que seuls les opérateurs de terrain ont grâce à leur expérience et qui ne sont pas forcément disponibles par une formation, l'opérateur ne considérant pas ces connaissances comme pertinentes (manque de retour d'expérience).

III - 1. 3. Synthèse

L'être humain est une machine faillible qui commet en permanence des erreurs la plupart sans conséquences ou rattrapées rapidement. C'est d'ailleurs cette faculté de récupération qui rend le système "machine – opérateur" fiable et résilient. Néanmoins, il arrive que ces erreurs ne soient pas rattrapées et soient à l'origine de situations dangereuses. Dans le cas des systèmes à risques, les erreurs cognitives et attentionnelles de l'opérateur peuvent avoir de très graves conséquences pour l'opérateur, pour le système ou même pour leur environnement. Il est donc essentiel de pouvoir limiter les risques d'accidents pour les systèmes à risques.

Dans cette optique est né le concept de défense en profondeur visant à réduire le risque d'arriver à un accident critique (causé par une ou plusieurs erreurs humaines et/ou des défaillances techniques) grâce à la multiplication des barrières technologiques et procédurales sur les voies accidentogènes. Néanmoins, cette multiplication des barrières n'a pas tant amélioré la sécurité des systèmes qu'elle a contribué à l'augmentation des performances. En effet, le sentiment de risque amoindri a conduit les opérateurs à prendre plus de risques et donc à piloter les systèmes plus près de leurs limites.

Afin, d'améliorer la sécurité des systèmes au-delà du niveau actuel il semble raisonnable de proposer non pas de nouvelles barrières de défense mais plutôt un système capable de donner au conducteur **une idée claire de sa marge de sécurité courante**. Nous proposons donc un système d'aide à la conduite des systèmes à risques, baptisé **cindynomètre** (du grec *cindynos* signifiant danger), capable de détecter les signes de la dégradation de la situation de conduite, d'évaluer le risque d'accident et de montrer au conducteur à la fois les sources de danger, le risque qu'elles représentent et éventuellement capable de lui indiquer comment ramener le système à un niveau de sécurité plus grand.

Cette aide repose sur l'acquisition de données sur l'ensemble des acteurs de la relation tripartite "opérateur – système – environnement" afin d'évaluer l'état de chacun. L'acquisition de ces données se fait par l'intermédiaire de trois grands types de capteurs :

- "Environnementaux" qui permettent d'évaluer les variables de l'environnement importantes pour la bonne conduite du système
- "Comportementaux" qui permettent d'évaluer, l'attention, le comportement et les actions des opérateurs ainsi que l'apprentissage éventuel de méthodes de conduite du système en observant le ou les opérateurs.
- "Système" permettant de connaître l'état du ou des processus internes du système considéré.

Le traitement des données recueillies, puis la fusion des informations ainsi traitées doit permettre de détecter des signaux faibles de dégradation de la situation, d'évaluer les risques pesant sur le système et d'identifier les dangers associés. Ces résultats permettent ensuite d'évaluer la dangerosité de la situation et éventuellement d'avertir le conducteur en cas de marge de sécurité trop réduite afin de l'inciter à revenir à une conduite plus sûre.

Cette aide permettra ainsi au conducteur de détecter plus facilement des erreurs commises mais aussi de percevoir plus rapidement la dégradation de la situation de conduite, lui permettant ainsi de résoudre les problèmes plus rapidement et surtout d'éviter d'avoir à intervenir en situation d'urgence afin de réduire le risque d'accident du à une mauvaise décision.

III - 2. La conduite automobile

La conduite automobile est une activité dangereuse comme ne cessent de nous le rappeler les statistiques d'accidents de la route données régulièrement par la sécurité routière et relayées par les médias. Cette dangerosité s'explique par le grand nombre de véhicules partageant la même infrastructure de déplacement, le déplacement de nombreux véhicules simultanément sur les mêmes infrastructures et en interaction avec l'environnement et enfin par la conduite du système par des opérateurs humains, seuls aux commandes, dont la formation est minimale et l'expérience et les capacités extrêmement variables.

Ainsi, les nouveaux conducteurs, que ce soit dans le cadre du permis de conduire ou de la conduite accompagnée, n'ont qu'une expérience limitée à quelques heures de pratique avec un moniteur, et un apprentissage succinct des règles de conduite (code de la route) lorsqu'ils prennent le volant pour la première fois. La conduite accompagnée permet néanmoins de donner au nouveau conducteur une expérience de conduite longue (plusieurs milliers de kilomètres) sous la supervision d'un conducteur expérimenté⁵ avant de pouvoir devenir autonome. Néanmoins, l'inexpérience des jeunes conducteurs explique en partie⁶ la surreprésentation de cette classe d'âge dans les statistiques des accidents mortels [Sécurité 07] comme on peut le voir dans la Figure 19.

⁵ On retrouve ce principe de "compagnonnage" dans la formation d'opérateurs de systèmes dangereux, par exemple dans l'industrie chimique

⁶ La prise de risques plus grande liée à "l'inconscience de la jeunesse" contribue aussi à ce risque accru.

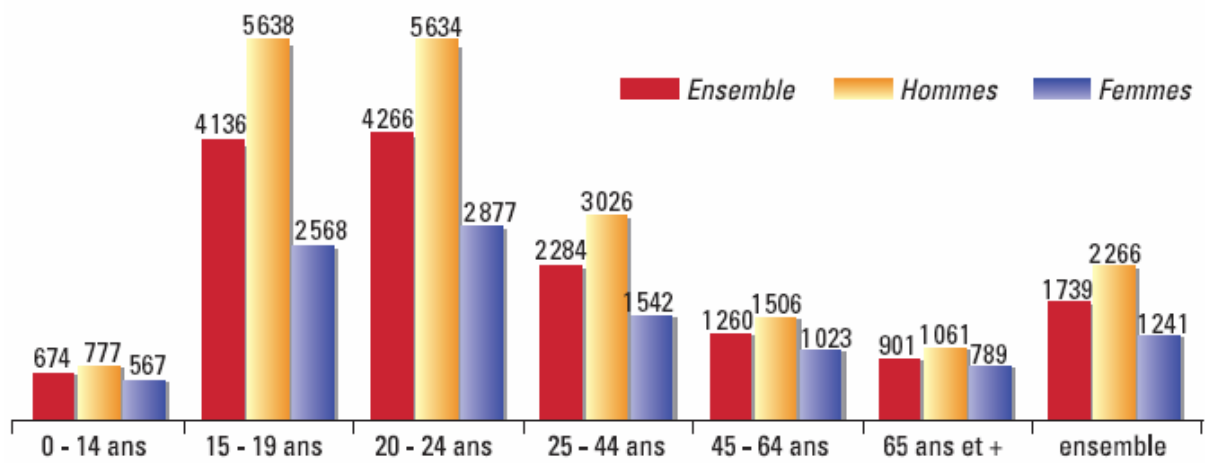


Figure 19 : Nombre de victimes (tués et blessés) en fonction de la classe d'âge

Les sources de danger sont très nombreuses sur la route et l'activité de conduite en est d'autant plus dangereuse. Le très grand nombre de véhicules et leur diversité, leur proximité et les différences de formations, de niveaux et de caractéristiques des conducteurs rendent les situations dangereuses (débouchant sur un accident ou pas) très courantes sur le réseau routier. Ces situations, que chaque conducteur a connu au moins une fois, sont très diversifiées de part leurs causes et leurs effets. Cette diversité a conduit à chercher des mécanismes communs d'accidents ainsi que des scénarios types qui permettraient de classer chaque situation accidentogène.

En France, la méthode d'analyse la plus couramment utilisée provient de l'INRETS qui a développé depuis 1980 une méthode basée sur un modèle séquentiel de l'accident [Brenac 97]. Cette méthode propose un déroulement d'accident en quatre phases :

- La situation normale de conduite.
- La situation d'accident, durant laquelle la situation se dégrade vers la situation d'urgence.
- La situation d'urgence, durant laquelle peut être tenté une manœuvre d'évitement par le conducteur ou par un système d'anticollision.
- Le choc et ses conséquences.

III - 2. 1. Les sources d'accidents

Les études menées selon ce principe par l'ASFA (Association des Sociétés Françaises d'Autoroute) ont permis de détailler les principaux facteurs à l'origine des accidents mortels sur autoroutes. La Figure 20, tirée des résultats d'une telle étude [ASFA 04], montre les causes principales des accidents mortels pour les accidents sur autoroute.

On voit au travers de ces résultats qu'une grande majorité des accidents mortels sur autoroute peut être attribuée au conducteur, soit par le biais d'un déficit d'attention (causé par la fatigue ou par l'ingestion de substances) soit par une conduite dangereuse. Le sous gonflage des pneus ainsi que la collision avec des obstacles non prévus (piétons ou véhicules arrêtés) peuvent là encore être considérés comme des erreurs du conducteur, en termes d'entretien du véhicule ou de mauvaise attention aux obstacles. On retrouve ainsi les résultats d'autres études qui ont conclu à un taux d'implication moyen du conducteur de plus de 90% dans les accidents de la route (mortels ou non).

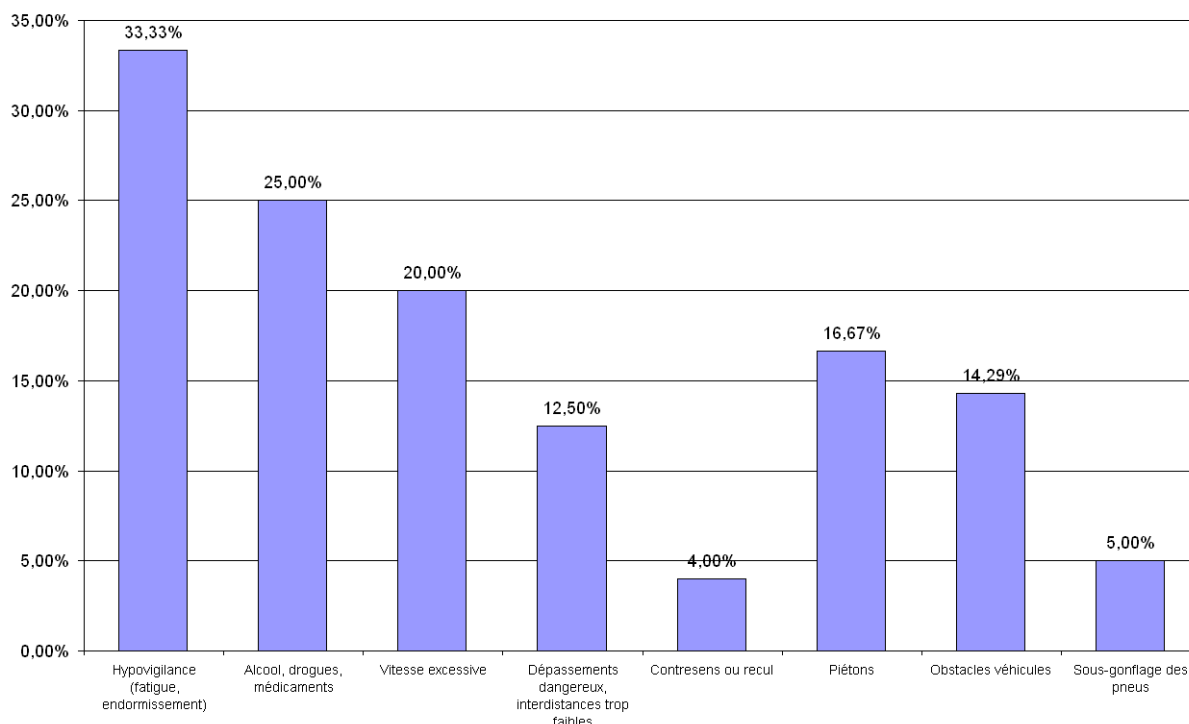


Figure 20 : Répartition des causes principales retenues des accidents mortels sur autoroutes

Une deuxième statistique tirée des études de l'ASFA [ASFA 02] remet en cause l'argument courant consistant à considérer que les autres conducteurs sont dangereux et créent les situations accidentogènes. En effet plus de 50% des accidents corporels sur autoroute entre 1998 et 2000 n'impliquaient qu'un seul véhicule comme le montre la Figure 21.

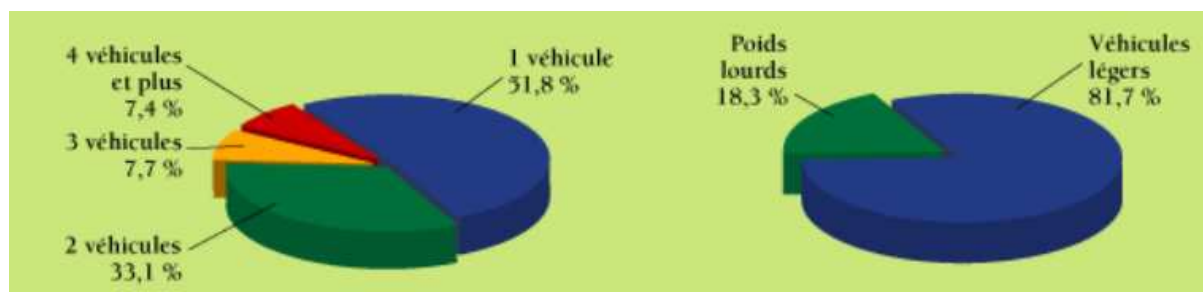


Figure 21 : Répartition du nombre de véhicules impliqués dans les accidents corporels sur autoroute entre 1998 et 2000

Il apparaît au travers de ces statistiques que la majorité des accidents ne sont provoqués que par un petit nombre de facteurs. Bien évidemment, ces statistiques ne sont valides que sur autoroutes qui ne représentent qu'une faible partie du nombre total d'accidents corporels. Néanmoins, elles mettent en relief la responsabilité du conducteur dans nombre d'accidents de la route ainsi que certaines des causes principales d'accidents, à savoir l'hypovigilance, l'inattention et la conduite dangereuse en particulier la vitesse excessive.

III - 2. 2. Défenses existantes

Afin de limiter le nombre d'accidents malgré la multiplication du nombre de véhicules en service de nombreuses défenses ont été mises en place. Celles-ci sont constituées par des barrières réglementaires, visant à encadrer la conduite automobile et à en fixer les procédures à suivre, et des barrières technologiques visant à empêcher la survenue d'un accident en empêchant le conducteur de faire certaines manœuvres ou en l'aidant à conduire le véhicule au travers des systèmes de sécurité active mais aussi à réduire les conséquences d'un accident grâce aux éléments de sécurité passive.

III - 2. 2. 1. Barrières réglementaires

Les barrières réglementaires destinées à la conduite automobile sont regroupées au sein du manuel que chaque candidat au permis de conduire est supposé connaître : le Code de la Route. Ce texte qui rassemble l'ensemble des lois régissant la conduite automobile en France permet de fixer la réglementation que doit suivre le conducteur selon les conditions (météo, signalisation, type de route, ...) dans lesquelles il se trouve.

Evidemment comme dans tout système à risques le respect de cette réglementation par les conducteurs doit être contrôlé afin d'éviter des écarts à la réglementation potentiellement dangereux. Ces contrôles sont effectués par les forces de l'ordre mais le nombre de conducteurs rend très difficile leur réalisation systématique. Ainsi, le non-respect d'au moins une partie de la réglementation est-il courant chez la plupart des conducteurs entraînant une conduite risquée des véhicules. On retrouve ici la notion de BTCU présentée au Chapitre II.

"Limiter la vitesse des véhicules à la construction, installer systématiquement des boîtes noires, faire respecter effectivement le code de la route... Je répète les mêmes choses depuis vingt ans. Souhaitons que l'année 2002 soit enfin celle du procès de la voiture folle."

C'est en ces termes que s'exprimait Claude Got [Got 02] lorsqu'on lui demandait quel serait le programme idéal pour améliorer la sécurité routière au lendemain de la publication des chiffres de la sécurité routière pour l'année 2001. Si les solutions proposées semblent extrêmes il est vrai que les statistiques tendent à encourager ce type de raisonnement.

Cette année 2001 s'était en effet caractérisée par une stagnation de l'évolution du nombre de victimes de la route malgré les mesures politiques engagées. Le nombre d'accidents et de blessés n'avait baissé que de 1 ou 2 % et le nombre de morts était resté quasiment identique. Ces mauvais chiffres traduisaient une négligence des réglementations (45 % des accidents seraient dus à l'alcoolémie [Croize 02]) accentuée par l'approche des élections présidentielles et la perspective d'une amnistie.

Depuis lors, l'apparition sur les routes de France de radars fixes permettant le contrôle automatique ainsi que l'augmentation de la répression face aux conduites à risques (vitesse excessive, conduite sous influence de l'alcool ou de drogues, ...) a entraîné une baisse spectaculaire du nombre de blessés et de tués sur les routes de France comme le montre le Tableau 3 comprenant les résultats d'analyse de la sécurité routière sur les 20 dernières années. On peut y constater que la mise en place des radars fixes en 2003 a conduit à une baisse de 20% du nombre de tués sur les routes de France bien plus importante que la baisse constante de quelques % liée au renouvellement du parc automobile et à l'amélioration des systèmes de sécurité passive et active des nouveaux véhicules.

On voit ainsi l'influence du comportement du conducteur sur le risque d'accident encouru. En effet, la répression accrue qui a entraîné cette diminution spectaculaire du nombre d'accidents corporels, de blessés et de morts n'a eu d'effets qu'au travers d'une "peur du gendarme" qui a incité les conducteurs à mieux respecter les règles, notamment ralentir leur vitesse, entraînant ainsi mécaniquement une baisse du nombre et de la gravité des accidents.

Néanmoins, bien qu'efficace, la continuation de cette politique répressive n'a pas permis de réduire significativement le nombre d'accidents corporels depuis lors. En effet, cette répression a réduit énormément la tendance des conducteurs à rouler au-delà des limites de vitesse mais n'a pas permis d'agir sur toutes les causes des accidents de la route. Les collisions frontales ou latérales entre véhicules roulant aux limites de vitesse continuent ainsi à engendrer le même nombre d'accidents corporels chaque année. Il est donc essentiel de trouver d'autres méthodes pour réduire davantage le nombre de ces accidents corporels.

	Accidents corporels		dont accidents mortels	Tués à 6 jours		Blessés graves	Blessés légers	Total blessés		Gravité (tués/100 accidents corporels)
	Nombre	Évolution en %		Nombre	Évolution en %			Nombre	Évolution en %	
1987	170 994	-7,4	8 686	9 855	-10,1	57 902	179 734	237 636	-8,2	5,76
1988	175 887	+2,9	9 341	10 548	+7,0	58 172	185 870	244 042	+2,7	6,00
1989	170 590	-3,0	9 302	10 528	-0,2	55 086	180 913	235 999	-3,3	6,17
1990	162 573	-4,7	9 128	10 289	-2,3	52 578	173 282	225 860	-4,3	6,33
1991	148 890	-8,4	8 509	9 617	-6,5	47 119	158 849	205 968	-8,8	6,46
1992	143 362	-3,7	8 114	9 083	-5,6	44 965	153 139	198 104	-3,8	6,34
1993	137 500	-4,1	8 005	9 052	-0,3	43 535	145 485	189 020	-4,6	6,58
1994	132 726	-3,5	7 609	8 533	-5,7	40 521	140 311	180 832	-4,3	6,43
1995	132 949	+0,2	7 453	8 412	-1,4	39 257	142 146	181 403	+0,3	6,33
1996	125 406	-5,7	7 178	8 080	-3,9	36 204	133 913	170 117	-6,2	6,44
1997	125 202	-0,2	7 130	7 989	-1,1	35 716	133 862	169 578	-0,3	6,38
1998	124 387	-0,7	7 514	8 437	+5,6	33 977	134 558	168 535	-0,6	6,78
1999	124 524	+0,1	7 185	8 029	-4,8	31 851	135 721	167 572	-0,6	6,45
2000	121 223	-2,7	6 811	7 643	-4,8	27 407	134 710	162 117	-3,3	6,30
2001	116 745	-3,7	6 920	7 720	+1,0	26 192	127 753	153 945	-5,0	6,61
2002	105 470	-9,7	6 549	7 242	-6,2	24 091	113 748	137 839	-10,5	6,87
2003	90 220	-14,5	5 168	5 731	-20,9	19 207	96 722	115 929	-15,9	6,35
	Accidents corporels		dont accidents mortels	Tués à 30 jours		Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total blessés		Gravité (tués/100 accidents corporels)
	Nombre	Évolution en %		Nombre	Évolution en %			Nombre	Évolution en %	
2004 Cal.	85 390	-5,4		5 593				108 366		6,55
2005	84 525	-1,0	4 857	5 318	-4,9	39 811	68 265	108 076	-0,3	6,29
2006	80 309	-5,0	4 326	4 709	-11,5	40 662	61 463	102 125	-5,5	5,86
2007	81 272	+1,2	4 265	4 620	-1,9	38 615	64 586	103 201	+1,1	5,68

Cal. : calculé en convertissant les tués à six jours en tués à trente jours, soit en appliquant le coefficient de 1,069

Source : ONISR, fichier des accidents

Tableau 3 : Bilan statistique de la sécurité routière depuis 1987 (d'après [Sécurité 07])

III - 2. 2. 2. Barrières technologiques

Les constructeurs automobiles ont quant à eux considéré ce problème du point de vue technique et proposent depuis plusieurs années des systèmes de sécurité passive permettant de réduire les conséquences de l'accident (airbag, ceinture à déformation limitée, système anti sous marinage, ...) et plus récemment des systèmes de sécurité active visant à rattraper les défauts d'action du conducteur (ABS⁷, AFU⁸, ESP⁹, ...). Ces améliorations sont aussi passés par un renforcement de l'habitacle des véhicules couplé à une déformabilité accrue des zones de collision (avant et arrière du véhicule) afin d'absorber le plus d'énergie possible, pour atténuer la violence des chocs et donc la sévérité des accidents.

Malgré leurs effets bénéfiques ces systèmes ont aussi eu plusieurs effets négatifs dont le principal et la plus grande prise de risques par les conducteurs du fait de l'existence de systèmes supposés (ou du moins compris comme tels) corriger leurs erreurs et améliorer leurs performances (freinage plus court grâce à l'ABS ou vitesse de passage en courbe plus rapide avec l'ESP par exemple). L'utilisation de systèmes de sécurité active prenant le relais du conducteur en cas de défaillances n'a ainsi contribué que faiblement à l'amélioration de sa sécurité car elle l'a amené à conduire avec des marges de sécurité plus faibles. On rejoint ainsi les conclusions du chapitre précédent qui décrivait déjà ce problème.

⁷ Anti Blockier System, système anti blocage des freins

⁸ Aide au Freinage d'Urgence, système permettant un freinage plus puissant plus rapidement

⁹ Electronic Stability Program, système de stabilité électronique permettant de garder le contrôle du véhicule. On estime d'ailleurs que l'ESP généralisé à tous les véhicules du parc automobile entrainerait une baisse de 15% de la mortalité sur la route. L'organisme Euro-NCAP qui évalue la sécurité des véhicules a ainsi changé son mode de notation en 2007 pour ne plus donner de 5° étoile (synonyme de très grande sécurité qu'aux véhicules équipés de l'ESP en série).

III - 2. 3. Conclusions

La réduction du nombre d'accidents corporels, de morts et de blessés sur les routes est depuis de nombreuses années un des centres d'intérêt majeurs des gouvernements et des constructeurs. Cette réduction est d'autant plus prioritaire pour les autorités que chaque accident grave (entraînant des blessures ou la mort) coûte extrêmement cher à la société. Ainsi certaines études qui se sont attachées à évaluer le coût d'une vie humaine dans certains pays européens et aux Etats-Unis ont obtenu un coût pour la société variant de 1 à 4 millions de dollars (selon les pays) par mort [Trawen 02]. De tels chiffres appliqués au cas de la France donnent pour l'année 2007 un coût pour les seules personnes décédées de 4 à 18 milliards de dollars (soit environ autant d'euros).

La réduction du nombre d'accidents est passée par la mise en place de réglementations plus strictes et mieux appliquées (grâce à une répression plus sévère comme le prouve l'exemple des radars automatiques en France) et l'amélioration de la sécurité des véhicules par les constructeurs à mesure que la sécurité du véhicule devenait un argument de vente. Pour ce faire, ces derniers ont multiplié les systèmes de sécurité passive et active dans leurs véhicules.

Cela a été fait pour certains types de dysfonctionnements avec des systèmes tels que les nouveaux pneus anti-crevaison (qui permettent de ne pas perdre le contrôle du véhicule en cas de crevaison), l'ABS (qui corrige l'effet d'un freinage trop violent lorsque les conditions d'adhérence ne sont pas homogènes entre les roues), les aides à la navigation par GPS ou l'antipatinage par exemple. L'efficacité de ces systèmes a été largement démontrée mais ils ont aussi eu des effets pervers sur la sécurité en étant mal compris des conducteurs, incitant certains ainsi à réduire leur marge de sécurité. Les constructeurs tentent actuellement de mieux prendre en compte ce facteur au travers d'une communication plus explicite sur les avantages des systèmes de sécurité.

La plupart de ces systèmes d'aides à la conduite reposent sur le maintien de la dynamique du véhicule dans des limites acceptables. Ils ne tiennent donc pas ou très peu compte du facteur essentiel pour la sécurité automobile : le conducteur humain. La responsabilité totale ou partielle de ce dernier dans la quasi-totalité des accidents de la route rend inévitable l'étude de son comportement et de ses modes de fonctionnement en situation de conduite si l'on veut pouvoir comprendre les modes de génération des erreurs et ainsi développer de nouvelles aides à la conduite, de nouvelles barrières.

III - 3. Le raisonnement humain appliqué à la conduite automobile

De nombreux auteurs ont étudié la tâche de conduite et en ont extrait une décomposition en trois tâches de niveaux différents s'articulant selon un schéma d'asservissement par rapport aux réactions du véhicule et à l'environnement :

- Un niveau opérationnel, largement automatisé et fortement dépendant du niveau d'activité SB
- Un niveau tactique, qui gère les interactions et les évitements d'obstacles, géré conjointement par les trois niveaux
- Un niveau stratégique, qui consiste en l'activité de navigation qui fait appel aux niveaux d'activité RB et KB.

Cette décomposition (résumée par la Figure 22) nous permet d'observer la très forte implication des différents niveaux dans la plupart des tâches et explique ainsi la difficulté de classer les différents accidents en fonction de la défaillance d'un niveau de Rasmussen unique.

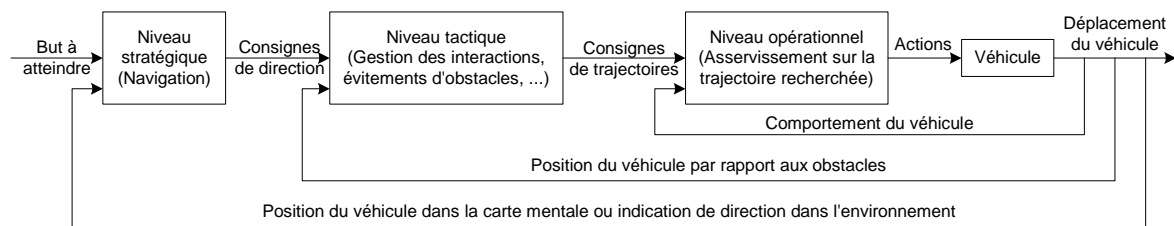


Figure 22 : Décomposition de l'activité de conduite en niveaux hiérarchiques

Il est ainsi très difficile de fournir de façon certaine la cause d'un accident ou d'un presque accident. Prenons l'exemple d'un conducteur qui négocie un virage tel que l'expose Gilles Malaterre [Amalberti 00] :

- Il doit tout d'abord détecter le virage et ses caractéristiques (rayon, dévers, adhérence, ...)
- Il doit anticiper les effets de la vitesse sur l'accélération transversale résultante et en déduire la vitesse acceptable selon ses critères de confort et de sécurité
- Il doit réaliser la manœuvre correctement
- Il doit enfin contrôler la manœuvre grâce aux informations sensorielles qu'il reçoit (accélérations, crissement de pneus, ...)

On peut voir apparaître de nombreuses erreurs humaines différentes qui conduiraient au même accident. Ainsi, la non-détection du virage à cause d'une erreur d'inattention ou d'une défaillance d'un contrôle attentionnel conduira à la même sortie de route qu'une défaillance de l'action au moment de la réalisation de la manœuvre. De même, une défaillance de l'évaluation de l'adhérence de la route (due à un oubli ou à une évaluation erronée) conduira à choisir une vitesse mal adaptée, ce qui aurait pu être causée par une erreur tactique de choix de vitesse. On voit donc que plusieurs erreurs de raisonnement différentes peuvent aboutir à la même erreur dans la tâche de conduite.

Il apparaît donc que l'étude des erreurs humaines dans les accidents de voiture et leur identification ne peut pas se faire efficacement à partir de l'étude du résultat des accidents. C'est pourquoi les accidentologues ont l'habitude d'interroger témoins et acteurs d'un accident pour identifier les défaillances humaines à l'origine de l'accident.

Néanmoins, dans le cadre de notre étude nous devons évaluer les défaillances potentielles du conducteur, il s'agit donc pour nous d'identifier toutes les causes de ces défaillances pour essayer de les compenser. Pour ce faire nous allons nous baser sur la décomposition en tâches de l'activité de conduite et chercher les différentes défaillances possibles pour chaque tâche ainsi que leurs causes.

III - 3. 1. Défaillances au niveau stratégique :

Le niveau stratégique de la tâche de conduite est, comme nous l'avons vu, destiné à gérer la navigation du véhicule, c'est à dire indiquer la route à emprunter en fonction d'indices présents dans l'environnement. Ces indices peuvent être aussi divers qu'un panneau de signalisation, un croisement ou le bruit de la route sur un parcours très connu. Ce niveau utilise le niveau d'activité KB pour des parcours très peu connus (les indices sont alors principalement les panneaux de signalisation) ou les niveaux RB et parfois SB pour les parcours très connus (une route utilisée tous les jours par exemple). Les erreurs types de ce niveau de conduite dépendront donc de la fréquence d'utilisation du parcours par le conducteur.

Ainsi un conducteur peu habitué à un parcours est très exposé à des erreurs de type KB, dues à la sélectivité et à la limitation de son espace de travail, qui peuvent l'amener à rater un indice important et probablement un changement de cap. Une telle erreur peut par exemple survenir dans les très grands échangeurs d'autoroutes ou de très nombreuses directions sont indiquées et où le temps de décision est très limité. Au contraire, le conducteur habitué à ce parcours n'utilise pas ou très peu le niveau KB, il est donc bien moins exposé à ce type d'erreurs mais il risque néanmoins de rater un changement de cap s'il est concentré sur un autre sujet lors d'un contrôle attentionnel. On a alors une erreur d'inattention due à un raté de double capture.

Ce type d'erreurs assez fréquentes ne présente donc pas de danger direct immédiat pour le conducteur tant que celui-ci ne fait pas passer son but avant les lois. En effet, si, alors qu'il vient de rater une sortie d'autoroute par exemple, le conducteur fait marche arrière, il s'expose à un risque d'accident énorme tout en violant le code de la route.

III - 3. 2. Défaillances au niveau tactique :

Le niveau tactique est probablement le niveau le plus complexe dans la tâche de conduite. En effet, ce niveau s'attache à convertir une consigne de direction en une trajectoire acceptable à suivre, et à réadapter celle-ci en fonction des différents obstacles qui pourraient la perturber. Cette partie de la tâche doit donc gérer les interactions avec les autres conducteurs et le respect de la signalisation (priorités, feux, limitations de vitesse, ...) pour calculer la trajectoire à suivre. Ce niveau apparaît donc comme le plus apte à générer des erreurs tant la tâche à accomplir est importante. De plus, sa gestion est réalisée conjointement par les 3 niveaux d'activités cognitives et est donc sujette à tous les types d'erreurs présentés précédemment.

On pourra ainsi voir à ce niveau des erreurs dues à la limitation de l'espace de travail dans des scénarios très complexes de circulation (circulation en ville ou arrivée sur une intersection de géométrie peu courante par exemple) où le conducteur devra à la fois comprendre et interpréter correctement la géométrie de l'infrastructure. La surcharge d'informations ou le masquage des contresignes par des non signes peuvent amener à fausser la détection des panneaux de signalisation ou à ne pas détecter des véhicules. Des erreurs d'omission peuvent conduire à ne pas effectuer de contrôle dans les angles morts par exemple. Ces erreurs qui correspondent à une mauvaise prise d'information peuvent être accentuées ou provoquées par des perturbations externes. Ainsi, la mobilisation de l'attention que ce soit à cause d'une conversation avec un passager, le réglage de l'autoradio ou l'utilisation du téléphone portable entraîne une chute dramatique du champ de perception utile [Ayama 00] et une augmentation conséquente du temps de réaction en cas de freinage du véhicule précédant [Summala 98]. Les résultats de cette dernière étude ont ainsi montré des temps de réaction multipliés par 6 ou plus lorsque l'attention est retenue par un élément situé au niveau de l'autoradio (ce qui est le cas lors du réglage de celui-ci par exemple).

Un deuxième type d'erreur à l'origine d'accidents de la circulation provient de la mauvaise interprétation des données reçues, le plus souvent à cause du biais vis-à-vis d'une interprétation plus forte, car plus courante (biais de confirmation, confiance excessive ou force d'une règle). Ceci peut être illustré par la réflexion effectuée lors de la traversée d'une intersection prioritaire. Le conducteur tend alors à considérer que les véhicules non prioritaires vont le voir et lui laisser la priorité. Il peut alors négliger le fait qu'un de ces véhicules roule trop vite pour s'arrêter car son conducteur se croit prioritaire ou n'a pas vu le véhicule prioritaire. L'interprétation de certains signes peut donc être négligée par le conducteur de façon inconsciente, provoquant ainsi de graves erreurs d'interprétation et par la suite de décision et d'action. De même, la mauvaise interprétation de l'état de la route peut amener le conducteur à choisir une vitesse de référence inadaptée à son adhérence, risquant ainsi de lui faire perdre le contrôle du véhicule.

Un troisième type d'erreur provient d'une mauvaise décision, donc du choix d'une mauvaise stratégie pour aborder un problème. Cette mauvaise décision peut être causée par une inexpérience vis-à-vis de la situation (la première fois que l'on doit éviter un véhicule par exemple, faut-il freiner de toutes ses forces ou éviter le véhicule, ou les deux ?) ou par application d'une mauvaise règle, c'est à dire par l'utilisation d'une méthode ayant été efficace par le passé mais qui s'avère erronée dans le cas de figure considéré. Ce type d'erreur a été illustré par de nombreuses études s'intéressant à la prise de risque chez les conducteurs. Ainsi l'étude du franchissement d'un passage à niveau [Witte 00] par un grand nombre de conducteurs, a montré qu'une partie conséquente de ceux-ci (environ 10% des sujets interrogés) avait tendance à essayer de dépasser un train. Cette tendance s'accroît de plus en plus à chaque fois qu'ils y parviennent, leur faisant ainsi négliger le risque encouru. Witte fait ainsi l'hypothèse que ces conducteurs perçoivent le danger de collision avec le train comme important mais qu'ils ne croient pas que cela puisse leur arriver. On a ainsi l'exemple typique d'application d'une règle déconseillée mais dont la force est renforcée par l'expérience de ces conducteurs.

Enfin, les conducteurs peuvent être amenés à privilégier leurs buts au détriment des règles de la conduite. Un tel comportement conduit inévitablement à une violation du code de la route de façon délibérée ou par inattention. Ainsi, les comportements agressifs du conducteur vis-à-vis des autres passagers (queue de poisson, "poussée" du véhicule précédant, ...) entraînent le plus souvent des violations de la loi. Ces comportements très dangereux sont largement étudiés par de nombreuses équipes de part le monde et sont regroupés sous l'appellation de "road rage". Outre ce cas particulier, la violation volontaire du code de la route peut avoir comme origine l'envie d'arriver plus vite à destination (quitte à emprunter un sens interdit ou à ne pas s'arrêter à un feu qui vient de passer au rouge par exemple) ou d'éviter un embouteillage par exemple. Ce type de violation provient généralement de l'expérience qui a montré qu'un tel comportement n'était pas dangereux (puisque l'on n'a pas eu d'accident) ou inversement de l'inexpérience et d'une croyance a priori qui fait négliger le danger. Il peut aussi s'agir d'une prise de risques volontaires par goût du risque et visant à tester ses propres limites.

Par opposition au cas précédent, un conducteur peut être amené à violer le code de la route par inattention, c'est le cas des conducteurs qui "coupent" les virages pour aller plus vite ou pour moins ressentir les accélérations latérales du véhicule. Une telle violation provient des buts choisis pour la conduite et de l'interprétation du code de la route qui fait que certains conducteurs ne considèrent pas le franchissement local de la ligne blanche comme une infraction et s'autorisent ainsi à couper le virage. On voit alors que dans le cas des violations involontaires le respect du code de la route est hiérarchiquement plus élevé que l'arrivée à destination au contraire de ce qui se passe dans le cas de violations volontaires. Enfin, dans le cas particulier d'un comportement de type "road rage" la violation du code de la route peut être la priorité. Nous ne pourrions bien entendu pas traiter un tel cas avec le cindynamètre compte tenu de sa nature passive et de l'exigence de ne pas prendre le contrôle du véhicule.

III - 3. 3. Défaillances au niveau opérationnel :

Le niveau opérationnel est le niveau le plus bas hiérarchiquement et le plus automatisé. Il est utilisé pour gérer le contrôle longitudinal et latéral du véhicule le long de la trajectoire calculée au niveau tactique. De ce fait, son activité se base principalement sur les informations proprioceptives (c'est-à-dire les stimuli sonores et tactiles) reçues par le conducteur (accélérations, vibrations et bruits du véhicule, bruits du contact pneus / route, ...). Ces informations sont alors utilisées de façon totalement automatique pour assurer une trajectoire conforme à la consigne émise au niveau tactique. Les erreurs que l'on peut donc trouver à ce niveau sont donc de deux types : erreurs au niveau de la saisie des informations et erreurs dans l'action. En effet, on peut considérer qu'il n'y a pas d'autre analyse de la situation que l'évaluation et la vérification des données en entrée.

On peut voir dans la description des informations utilisées à ce niveau de conduite qu'une défaillance de perception implique une forte perturbation du système sensori-moteur du conducteur. En effet, les vibrations et les accélérations font partie des informations que l'être humain traite le plus facilement et le plus efficacement. On peut donc attribuer les erreurs de perception au niveau opérationnel à une baisse de vigilance entraînée par une concentration excessive sur une tâche non liée à la conduite (conducteur rêveur par exemple), la fatigue, les médicaments, l'alcool, les drogues ou un problème de santé. On comprend ainsi beaucoup mieux le danger représenté par la conduite en état d'hypovigilance car le conducteur n'est plus alors capable de suivre les plans prévus au niveau tactique. Il ne peut plus réaliser correctement l'asservissement sur la trajectoire et le véhicule est alors piloté en boucle ouverte. De plus de telles conditions d'hypovigilance influent aussi sur les autres niveaux de conduite et créent ainsi un risque plus élevé d'avoir une erreur de perception.

Les ratés d'action, sont, quant à eux, principalement la conséquence d'une erreur d'inattention. Il s'agit alors typiquement de ratés de double capture où l'attention est concentrée sur une préoccupation autre (problèmes familiaux, financiers, ...), le conducteur oubliant alors de réaliser l'asservissement (l'augmentation de la vitesse sur de longs trajets en est un exemple, le conducteur prend l'habitude de rouler vite et finit par asservir inconsciemment sa vitesse au-delà de sa consigne). Mais de telles erreurs peuvent aussi être provoquées par un manque d'habitude de l'action à réaliser. Ainsi, si un conducteur très habitué à un véhicule disposant de l'antipatinage conduit une voiture sans ce système de sécurité, il risque de sortir de la route si la voiture dérape car il n'aura pas le réflexe de contre-braquer par exemple. Cette erreur aura alors été causée par une erreur au niveau tactique où la vitesse de référence aurait du être baissée. Enfin, les ratés d'action peuvent être causés par un handicap momentané du conducteur, il s'agira alors du blocage d'un muscle, d'une perte de connaissance ou d'un autre problème de santé qui entraîne l'impossibilité d'agir correctement sur le véhicule. Cette dernière cause ne pourra pas être traitée par le cindynamètre, là encore à cause de l'aspect passif de ce système.

Les erreurs au niveau opérationnel sont donc très dépendantes de l'état de santé physique et mentale du conducteur, ainsi que de sa concentration tout comme les erreurs aux niveaux supérieurs. Néanmoins, toute erreur au niveau opérationnel met immédiatement en danger les occupants du véhicule du fait de l'action immédiate qu'elle entraîne sur la commande du véhicule. Il sera donc très important de pouvoir réagir très vite à de telles erreurs pour ramener le système dans un état stable aussi rapidement que possible.

III - 3. 4. Conclusion :

Nous avons vu rapidement les différentes erreurs à chacun des trois niveaux de la tâche de conduite ainsi que certaines de leur cause. On peut donc voir au travers de cette étude l'importance des erreurs de saisie des informations qui, si elles sont commises, entraînent une rupture de la chaîne de retour (voir Figure 22) et donc un fonctionnement temporaire en boucle ouverte. La durée de cette rupture ainsi que sa gravité (quelles informations critiques pour la tâche sont encore captées correctement?) conditionnent la gravité de l'erreur et donc de l'accident qui pourrait en découler. Ces erreurs au niveau de la prise d'informations sont principalement dues à la limitation des capacités attentionnelles de l'homme et à ses mécanismes de sélection de l'information pertinente ainsi qu'à des chutes du niveau d'attention réservé à la conduite lorsque le conducteur pense à autre chose.

Parmi les autres erreurs, une grande partie est générée au niveau tactique où un manque de compréhension de la scène peut entraîner de graves erreurs dans la génération de la trajectoire de consigne. D'autres erreurs sont commises au niveau décisionnel, généralement par application de mauvaises règles ou par volonté de violer les règles. Enfin, il peut arriver que des erreurs soient commises lors de l'actionnement des commandes de la voiture, il s'agit alors principalement d'erreurs d'inattention ou de perte de connaissance du conducteur (cas beaucoup plus rare mais souvent beaucoup plus grave).

La plupart de ces erreurs sont sans conséquences et comme nous l'avons indiqué précédemment, permettent au conducteur de réduire sa charge cognitive afin de rendre possible la conduite du véhicule. Elles lui permettent de plus de garder des marges de sécurité correspondant à ses capacités. Il est donc préférable, comme nous l'avons indiqué, de ne pas corriger toutes ces erreurs (au risque d'inciter le conducteur à piloter plus près des limites de sécurité en ayant trop confiance dans les aides à sa disposition) mais seulement les plus critiques pour la sécurité du véhicule et de son conducteur et d'indiquer à celui-ci les risques qu'il encourt. On propose ainsi d'appliquer à la conduite automobile le principe de l'aide à la conduite par prise en compte des risques présentée précédemment.

III - 4. Le cindynamètre appliqué à la conduite automobile

La conduite automobile est un cas particulier de la conduite des systèmes à risques semblable au pilotage d'un avion dans le sens où le système considéré se déplace avec son conducteur dans l'environnement. Néanmoins, là où la plupart des systèmes à risques sont pilotés par des opérateurs expérimentés et très bien formés dans un cadre réglementaire clair et respecté, la conduite automobile est confiée à des opérateurs plus ou moins respectueux des règles, disposant d'une formation minimale, d'une expérience variable et donc de peu de procédures communes.

III - 4. 1. Contexte

Les particularités de la conduite automobile en tant que systèmes à risques font d'elle un domaine d'application intéressant pour une aide à la conduite de type cindynamètre compte tenu du caractère accidentogène du système et de la faillibilité du conducteur. On étudie donc ici comment adapter le concept du cindynamètre à la tâche de conduite automobile.

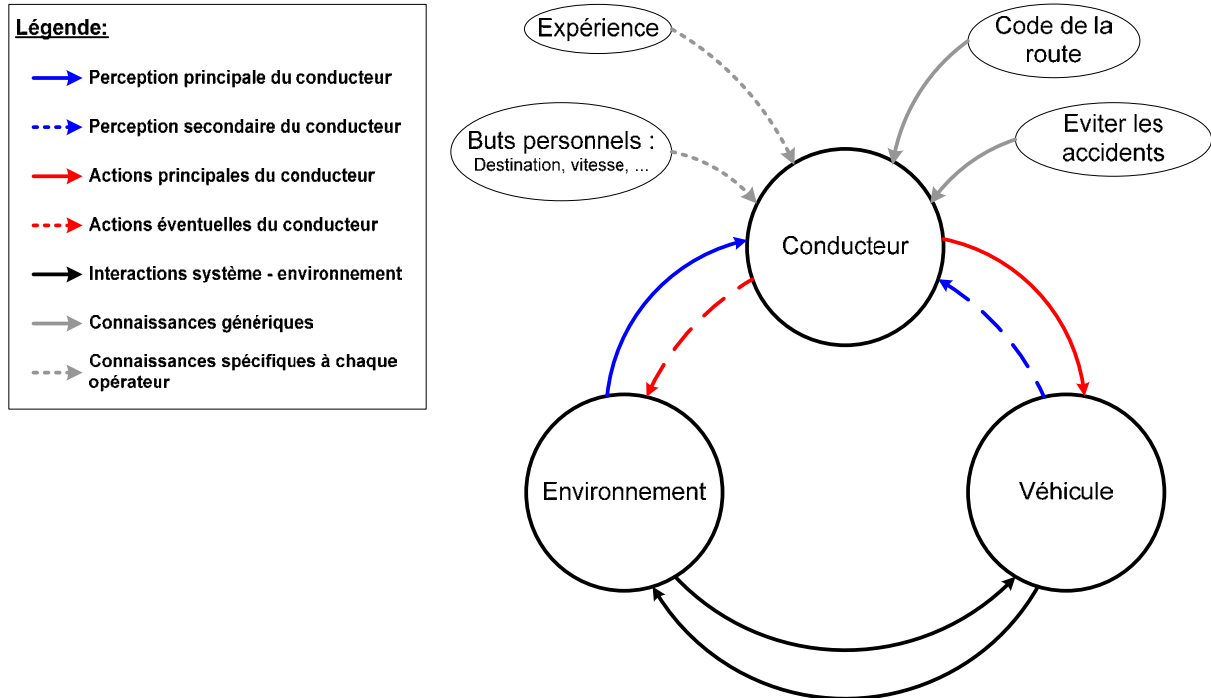


Figure 23 : Représentation de la relation tripartite appliquée à la conduite automobile

La Figure 23 montre la relation tripartite présentée précédemment appliquée au cas de la conduite automobile. Le conducteur contrôle le véhicule qui se déplace dans l'environnement. Ce dernier agit alors sur le conducteur par le biais d'informations visuelles et éventuellement sonores. Ces trois interactions constituent les interactions privilégiées du système, mais les interactions réciproques existent néanmoins : le conducteur tire des informations sur le véhicule grâce au tableau de bord, aux sons, aux vibrations dans l'habitacle et aux accélérations qu'il ressent. L'environnement agit sur le véhicule par le biais du contact roue – sol mais aussi par le biais des communications radio, des bornes de télépéage, Enfin, le conducteur influe sur l'environnement par le biais des signaux lumineux du véhicule (appel de phares, clignotants, feux de stop, ...) pour prévenir les autres conducteurs de ses intentions mais aussi par l'utilisation des bornes d'arrêt d'urgence ou du téléphone portable pour prévenir d'une situation anormale [Neyer 99].

III - 4. 2. Application à la conduite automobile

L'application à la conduite automobile d'un système d'aide tel que le cindynamètre consiste à insérer au sein de cette relation tripartite un quatrième acteur dont le rôle est de capter toutes les informations concernant la conduite sûre du véhicule puis de montrer une synthèse de ces informations au conducteur afin de l'inciter à adopter une conduite plus sûre. La Figure 24 montre ainsi l'insertion d'un cindynamètre dans la tâche de conduite automobile et le rôle qu'il jouerait.

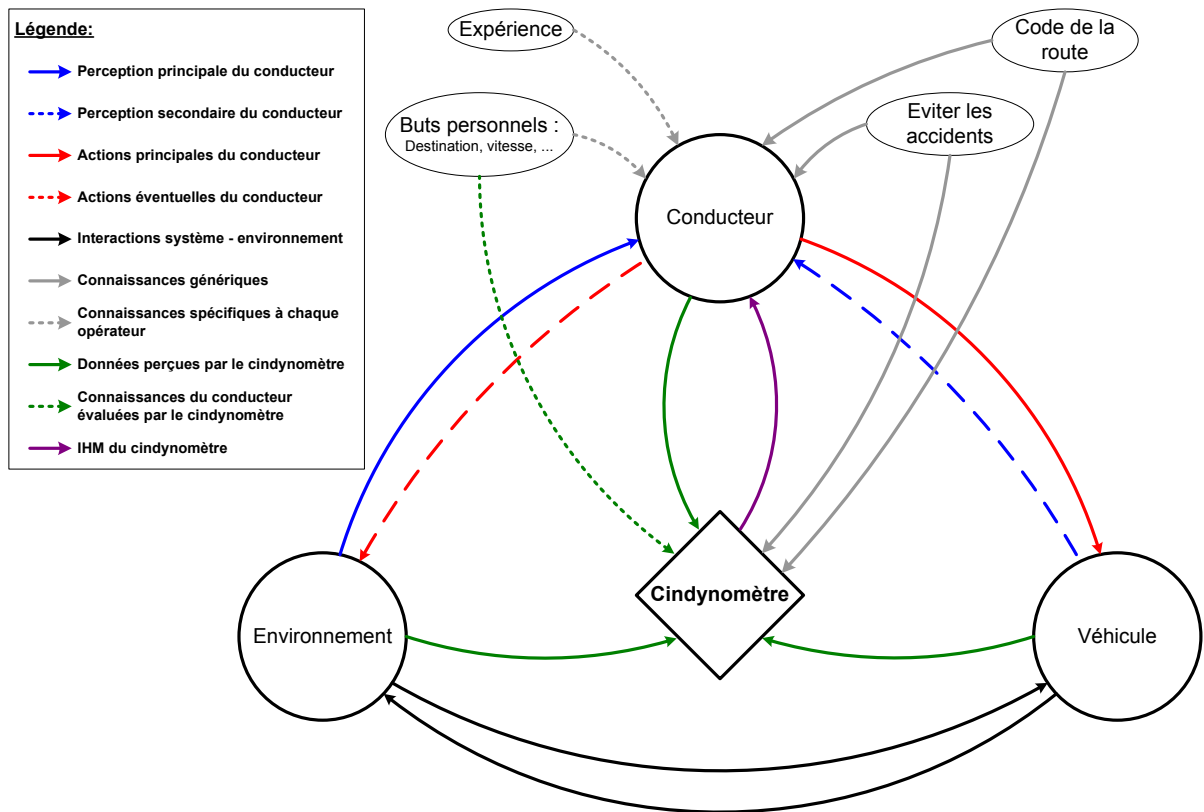


Figure 24 : Tâche de conduite améliorée par ajout du cindynamètre

Afin de donner des informations aussi pertinentes que possible, le cindynamètre doit capter les informations utiles concernant l'environnement, l'état de fonctionnement du véhicule ainsi que le comportement et l'attention du conducteur.

Appliqué à l'automobile, le cindynamètre a en priorité besoin des informations concernant l'environnement. En effet, le véhicule se déplace dans celui-ci et il est donc nécessaire de savoir quelle forme a la route, où sont les obstacles, quelles sont les réglementations spécifiques au lieu actuel, ... Ces informations, comparées aux informations provenant du véhicule (concernant sa position dans le monde, sa dynamique mais aussi l'état de sa mécanique par exemple) permettront de détecter les risques menaçant le système (collisions, sortie de route, ...). La captation des attitudes, du comportement et de la vigilance du conducteur permet ensuite au cindynamètre de déterminer quels dangers ont déjà été perçus et pris en compte par le conducteur et de l'avertir en conséquence.

III - 4. 3. Architecture proposée

Dans l'optique de la réalisation d'un cindynamètre destiné à l'automobile nous avons défini une architecture basée sur l'implémentation présentée à la Figure 18 (schéma d'une implémentation générique). Cette architecture, présentée dans la Figure 25, comprend les différents capteurs et algorithmes considérés comme nécessaires pour la bonne réalisation d'un cindynamètre.

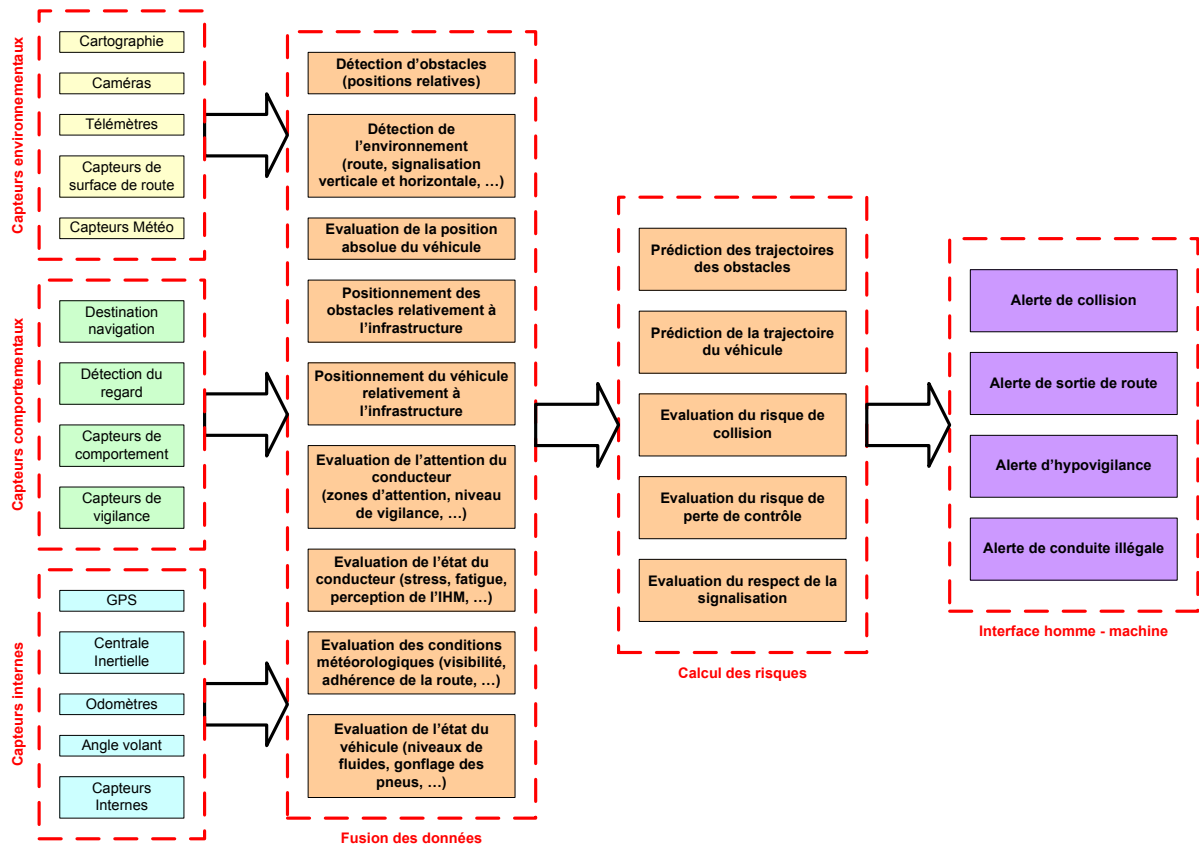


Figure 25 : Schéma générique de l'implémentation du cindynamètre

L'architecture du cindynamètre appliqué à l'automobile peut être vue comme un système séquentiel, les capteurs recueillant les données brutes concernant l'environnement, le comportement du conducteur et l'état du véhicule. On présente ainsi les principaux de ces capteurs dans le Chapitre IV.

Ces données sont ensuite transmises à des algorithmes de traitement et de fusion des données (présentés au Chapitre V) qui vont en extraire les informations relatives à la présence d'obstacles dans l'environnement, à la forme de la route, aux conditions météo mais aussi à la vitesse du véhicule ou à la vigilance du conducteur par exemple.

Ces informations sont ensuite traitées par des algorithmes de calcul des risques (présentés au Chapitre VI) qui vont chercher à prédire les trajectoires du véhicule et des obstacles afin d'en inférer les risques de collision et de perte de contrôle; évaluer le respect de la réglementation; analyser l'attention du conducteur afin d'évaluer les risques les plus importants pour le système ainsi que la marge de sécurité disponible. Ces résultats sont enfin transmis au conducteur par le biais de l'interface homme – machine (que l'on présentera dans le Chapitre VII) afin de l'amener si besoin à réduire le risque pris.

III - 4. 4. Conclusions:

L'application du cindynamètre à la conduite automobile requiert la réalisation d'un système informatique et matériel disposant comme nous l'avons vu d'un ensemble de capteurs dédiés au recueil d'informations sur l'environnement, le comportement du conducteur et l'état du véhicule. Nous espérons qu'un tel système informatique permettra de baisser le nombre d'accidents dans le domaine automobile par le biais d'une prise de conscience des risques encourus par les conducteurs.

III - 5. Synthèse

Au cours des chapitres précédents nous nous sommes intéressés au problème des accidents survenant sur les systèmes à risques. Nous avons ainsi vu que la majorité de ces accidents étaient désormais la conséquence d'erreurs ou de défaillances de la part des opérateurs humains de ces systèmes. Nous avons alors été amenés à étudier plus précisément les mécanismes cognitifs mis en place dans le raisonnement humain et plus particulièrement dans la réalisation d'une ou plusieurs tâches par un individu. Nous avons ainsi observé que l'être humain est faillible du fait des ses limitations cognitives et sensorielles qui ne lui permettent pas d'assurer une bonne conscience de la situation à tout moment. De plus nous avons vu qu'en cas de stress ces limitations se faisaient plus fortes entraînant ainsi une perte plus rapide des facultés de raisonnement.

Nous nous sommes alors attelés à proposer un nouveau type d'aide à la conduite des systèmes à risques basé non plus sur le principe des défenses en profondeur (i.e. cherchant donc à limiter les risques en empêchant toute erreur pouvant conduire à un accident) mais plutôt sur la constatation que nombre de ces accidents pouvaient être assimilés à une défaillance dans l'établissement d'une conscience de la situation correcte. Ce nouveau type d'aide propose ainsi d'établir en quelque sorte sa propre conscience de la situation et d'en évaluer ainsi le risque courant encouru par le système et son ou ses conducteurs.

Cette aide que nous avons baptisé cindynamètre (étymologiquement : mesureur de danger) vise ainsi à capter l'ensemble des informations pertinentes sur la situation courante dans l'environnement, à la comprendre et à en déduire ses évolutions possibles dans le futur afin d'évaluer le risque d'accident encouru par le système. Le cindynamètre permettrait ainsi d'aider le conducteur à se faire une image mentale correcte de la situation du système et des risques qu'il encourt à chaque instant. Nous espérons ainsi amener les opérateurs de systèmes à risques à ramener le système dans une zone de fonctionnement aux marges de sécurité acceptables.

Nous avons alors choisi d'étudier l'application d'une telle aide au domaine de la conduite automobile. La taille du parc automobile ainsi que le risque élevé d'accident (la conduite automobile n'étant pas encore un système ultra-sûr) rendent en effet l'évaluation des effets du cindynamètre très rapidement évaluables. Enfin, l'accès à un véhicule est beaucoup plus aisé que l'accès à une centrale nucléaire ou à un avion de ligne par exemple. Nous avons donc proposé une architecture du cindynamètre appliqué à la conduite automobile basé sur un ensemble de capteurs équipant un véhicule (certains de ces capteurs sont d'ailleurs déjà présents dans les véhicules récents comme nous allons le voir par la suite) que nous allons présenter maintenant. Nous verrons par la suite comment nous proposons d'utiliser les informations ainsi captées pour comprendre et prédire la situation de conduite et en déduire ainsi le risque existant.

CHAPITRE IV – PERCEPTION DE LA SITUATION DE CONDUITE

Avant de pouvoir aider le conducteur en améliorant sa perception et sa compréhension de la situation de conduite il est nécessaire que le cindynamètre soit lui-même capable de la percevoir. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent la situation de conduite peut être modélisée par la relation tripartite Conducteur – Véhicule – Environnement. Le conducteur dans sa tâche de conduite se doit de percevoir :

- Son environnement immédiat afin d'éviter les collisions avec les obstacles proches et de maintenir son véhicule sur sa trajectoire.
- Son environnement plus lointain afin d'anticiper les trajectoires des autres usagers, la présence d'obstacles sur les voies de circulation, la signalisation et ainsi pouvoir adapter sa conduite.
- Les informations provenant de son véhicule telles que la vitesse (pour s'adapter aux limitations ou à son souhait), le régime moteur (pour passer la vitesse adaptée), les accélérations latérales et longitudinales (qui créent le confort de conduite) ainsi que de nombreuses autres informations issues des systèmes d'aides à la conduite (GPS par exemple) ou fournies par les bruits et vibrations de l'habitacle par exemple.

Le cindynamètre quant à lui doit être capable de capter toutes ces informations mais aussi de nombreuses autres informations concernant le conducteur (telles que ses buts ou son état d'esprit par exemple). Le système pourra ainsi évaluer si le comportement et la conduite du conducteur sont adaptés à la situation courante de conduite et s'il est besoin de l'avertir des risques encourus. Le cindynamètre pourra de plus avoir accès à des informations complémentaires sur l'état du véhicule comme la pression des pneus ou la température des freins par exemple qui peuvent influencer grandement les caractéristiques dynamiques du véhicule (comme sa distance de freinage par exemple). Pour se faire le cindynamètre dispose donc d'une première couche de traitements permettant de capter les informations nécessaires sur la situation de conduite comme le montre la Figure 26.

Nous présentons dans ce chapitre les principaux capteurs existants commercialement ou à l'état de prototypes utilisables pour réaliser cette tâche de captation des informations sur la situation de conduite. Du fait du nombre considérable de capteurs existants nous ne présentons qu'une sélection qui se veut aussi large que possible de types de capteurs et de technologies applicables pour la réalisation du cindynamètre.

Nous présentons ces capteurs en trois parties principales: capteurs véhicules (qui vont fournir des informations sur l'état du véhicule), capteurs comportementaux (qui vont fournir les informations sur l'état du conducteur et sur les éventuelles perturbations internes à l'habitacle qu'il pourrait subir) et enfin capteurs environnementaux (qui fournissent les informations sur l'environnement du véhicule).

Nous présenterons ensuite dans une quatrième partie les technologies récentes de communication inter-véhiculaires et véhicule/environnement qui permettent aux véhicules d'échanger directement des informations avec les véhicules environnants ou l'infrastructure. Ces systèmes n'apparaissent cependant pas dans l'architecture du cindynamètre du fait de leur indisponibilité actuelle et de l'impossibilité de ne s'appuyer que sur elles tant que l'intégralité du parc automobile et du réseau routier n'est pas équipée. On verra cependant durant l'étude du cindynamètre que ces systèmes pourraient très facilement y être intégrés lorsqu'ils seront disponibles.

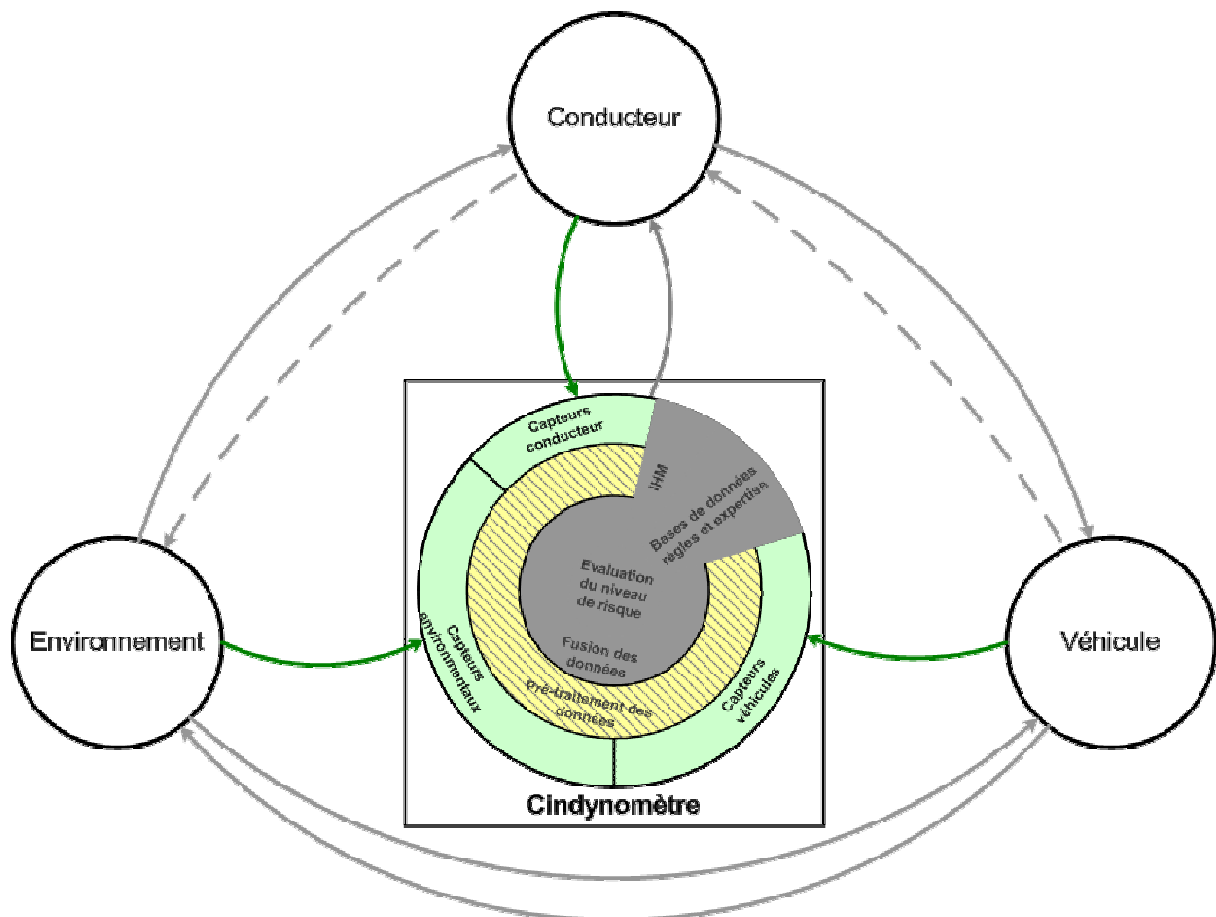


Figure 26: Schématisation de la couche "perception" du cindynamètre

IV - 1. Capteurs véhicule

Comme nous l'avons présenté précédemment, ces capteurs visent à évaluer l'état du véhicule, qu'il s'agisse de sa dynamique, du gonflage des roues ou de l'utilisation des clignotants. Il existe un très grand nombre de capteurs présents de série dans les véhicules modernes, malheureusement une étude exhaustive de ceux-ci serait bien trop longue et n'apporterait que peu d'informations intéressantes. Nous limiterons donc le champ de notre étude à trois capteurs essentiels pour le cindynamètre : les capteurs de pression interne des pneus qui permettent de détecter un sous gonflage (entraînant ainsi un risque d'éclatement du pneu, de faiblesse de freinage ou de perte d'adhérence), la centrale inertielle qui permettra d'obtenir les accélérations et vitesses angulaires du véhicule, nous permettant ainsi d'évaluer sa dynamique tandis que le positionnement par satellite nous permettra d'obtenir la position du véhicule dans l'environnement.

IV - 1. 1. Capteurs de pression des pneumatiques :

Ces capteurs ne sont apparus que récemment sur certains véhicules. Ils permettent d'évaluer régulièrement la pression de l'air à l'intérieur des pneus grâce à des capteurs sans fils placés sur la valve du pneu et qui transmettent leur mesure par liaison RF au calculateur central (Figure 27). Ces informations, comme beaucoup d'autres d'ailleurs, sont rendues disponibles par la suite via l'usage du bus CAN du véhicule qui permet de limiter le nombre de câbles nécessaires au transfert de ces informations en utilisant un bus de données uniques multiplexé.

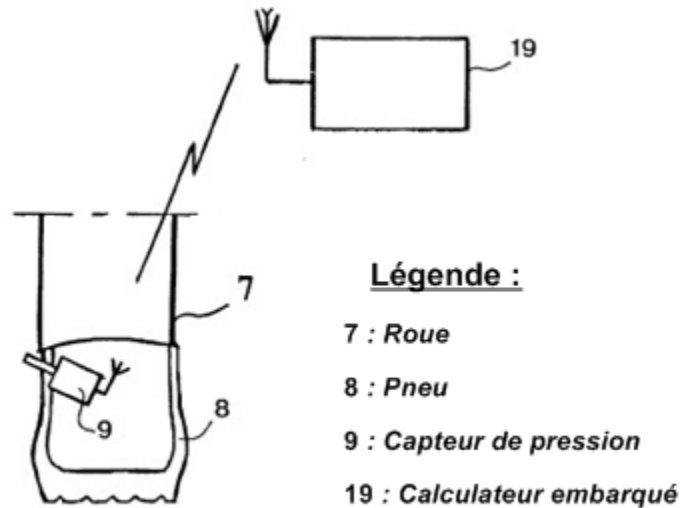


Figure 27 : Schéma de principe d'un capteur pneumatique embarqué

Ce capteur a été conçu pour être utilisé sans fils pour des raisons évidentes de simplicité, mais cela pose d'autres problèmes tels que la présence d'une source d'énergie embarquée dans le pneu, ainsi que des problèmes de transmission des informations. En effet, lorsque le véhicule roule, l'émetteur HF du capteur est masqué régulièrement, vis-à-vis du récepteur, par la roue. Il faut donc émettre suffisamment rapidement les informations avant d'être masqué à nouveau. Enfin, l'environnement moteur est extrêmement bruyant dans le domaine des radiofréquences à cause de l'allumage (sur un véhicule à essence) ou de la présence de moteurs électriques (dans le cas des véhicules hybrides ou entièrement électriques), il est donc essentiel d'avoir une émission très robuste.

Pour pallier ces différents problèmes, le capteur de pression embarque une source d'énergie interne (pile), un calculateur qui détermine le moment et la fréquence à laquelle les informations de pression doivent être envoyées (sachant qu'il faut au moins une mesure par tour de roue) et qui s'occupe d'ajouter à la mesure de pression un code redondant correcteur d'erreur qui permet de récupérer l'information même dégradée. Enfin, l'émission HF se fait par modulation de fréquence qui est beaucoup moins sensible au bruit que la modulation d'amplitude. Le fonctionnement du capteur est décrit dans la Figure 28.

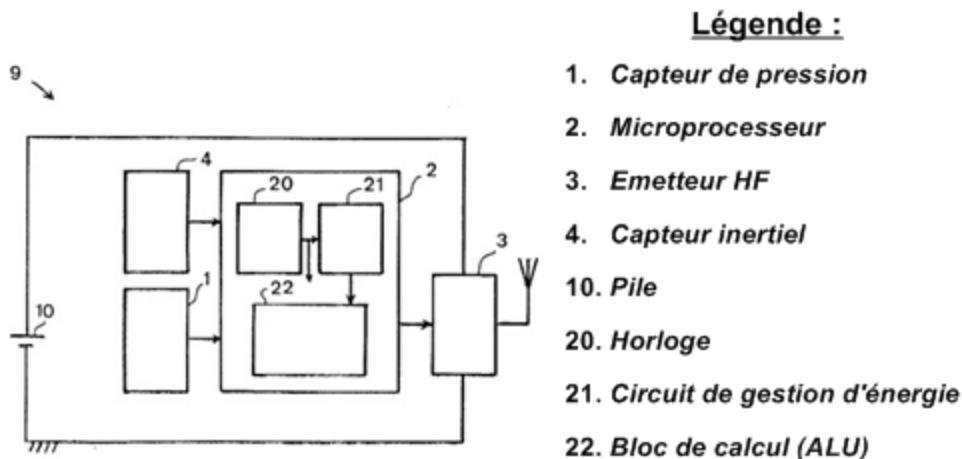


Figure 28 : Schéma interne du capteur de pression (tiré du brevet FR2794065)

De tels capteurs permettent de détecter quasiment immédiatement une chute de pression dans le pneu et ainsi d'avertir le conducteur lors d'une crevaison, mais ils peuvent aussi indiquer une pression de pneu trop basse ce qui augmente le risque d'aquaplaning sur route mouillée ainsi que d'éclatement sur autoroute. Enfin, couplé à un système d'aide à la navigation ce système peut permettre d'inciter le conducteur à regonfler ces pneus ou pas selon le type d'itinéraire attendu.

IV - 1. 2. Mesures inertielles :

Une centrale inertielle est un ensemble de capteurs de deux types différents, des accéléromètres, qui permettent de mesurer les accélérations de translation, et des gyroscopes, qui permettent de mesurer la vitesse angulaire autour d'un axe. Nous allons nous intéresser rapidement à leur principe de fonctionnement : on pourra se référer, pour une information plus fournie sur les technologies utilisées à [Kelly 94] et [Barbour 98]. Enfin, pour de plus amples informations sur les erreurs de mesure commise par une telle centrale on pourra se référer à l'étude [Unterhinninghofen 02] basée sur une centrale de type DMU/FOG Crossbow formée par des accéléromètres de type MEMS et des gyroscopes de type FOG utilisée au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris.

IV - 1. 2. 1. Gyroscopes :

Les premiers gyroscopes ont été réalisés mécaniquement mais pour des raisons de fiabilité, de précision, de compacité et de coût ils sont maintenant remplacés par des gyroscopes à corps solides, basés soit l'effet de Sagnac, soit sur l'effet de Coriolis.

L'effet Sagnac repose sur la propagation en sens inverse de deux faisceaux de lumière cohérente dans un anneau. La différence entre les temps de parcours du circuit est directement proportionnelle à la vitesse de rotation du dispositif. Les systèmes basés sur cet effet ont été rendus beaucoup plus performants grâce à l'apparition de la fibre optique et du laser qui ont permis d'effectuer la mesure non plus sur la différence temporelle mais sur la différence de fréquence des deux faisceaux qui s'avère beaucoup plus facile à effectuer. Les gyroscopes basés sur cet effet se présentent sous deux formes :

- Fiber Optical Gyroscope (FOG) : Il est composé d'une fibre optique formant un cercle, parcourue par deux faisceaux lasers en sens opposés. La mesure est réalisée par interférométrie. Pour augmenter la sensibilité du dispositif on utilise généralement une bobine de fibre optique plutôt qu'une boucle unique (Figure 29).

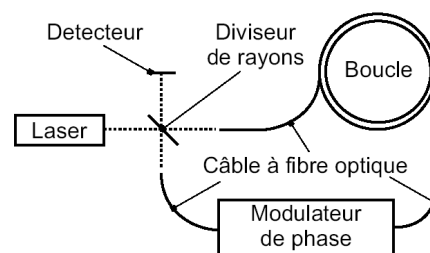


Figure 29 : Schéma de principe d'un F.O.G.

- Ring Laser Gyroscope (RLG) : Inventé avant le FOG, ce système repose sur le même principe mais on utilise des miroirs à la place de la fibre optique. Ce système est de moins en moins utilisé du fait des imperfections des miroirs et est donc remplacé par des systèmes FOG.

Les gyroscopes basés sur l'effet de Coriolis utilisent les vibrations d'un diapason, dont les deux fourchons sont excités en opposition de phase et vibrent donc de façon à se rapprocher puis à s'éloigner. Lorsqu'un tel dispositif est soumis à une vitesse de rotation selon l'axe parallèle aux fourchons, l'accélération de Coriolis entraîne une torsion au bout de la poignée qui est mesurée de façon capacitive ou piézo-électrique (Figure 30). Ce type de capteur existe aussi en version miniaturisée et est alors appelé gyroscope de type MEMS pour Micro Electro Mechanical System. Les diapasons sont alors réalisés à partir des mêmes processus utilisés dans l'industrie du semi-conducteur. On obtient ainsi des capteurs à très faible coût et très petits puisque de 5 à 10 000 gyroscopes de ce type peuvent être produits sur des wafers¹⁰ de 5 pouces. Leur précision est néanmoins sensiblement moindre que les gyroscopes à laser basés sur l'effet Sagnac.

¹⁰ Les wafers sont les disques de silicium servant de support aux couches métalliques d'un microprocesseur par exemple. Ces wafers sont utilisés pour réaliser un très grand nombre de composants d'un coup, leur surface étant bien supérieure à celle d'un composant unique.

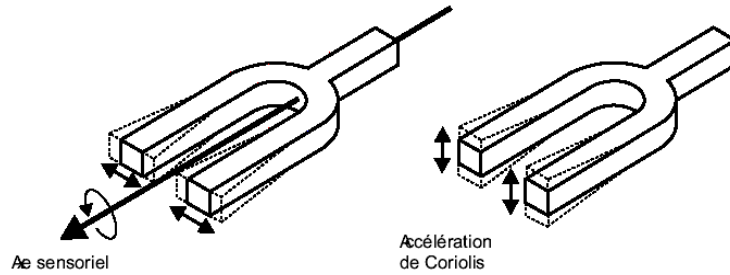


Figure 30 : Schéma de principe d'un gyroscope basé sur l'effet Coriolis

IV - 1. 2. 2. Accéléromètres :

La mesure d'une accélération inertielle de translation n'est pas possible à l'aide des gyroscopes optiques, mais seulement à l'aide de systèmes électromécaniques et de leurs pendants miniaturisés de type MEMS. Leur principe est relativement simple : une masse est couplée au support par un élément de rappel (ressort, force électrostatique, support élastique, ...); elle ne dispose que d'un seul degré de liberté. Le calcul de la force appliquée à la masse se fait de différentes façons (capteur de déformation piézoélectrique, capteur capacitif, ...). On donne ci dessous l'exemple d'un capteur MEMS où la mesure est effectuée par un ensemble de piézorésistances qui quantifient la déformation de la plaque par la masse (Figure 31).

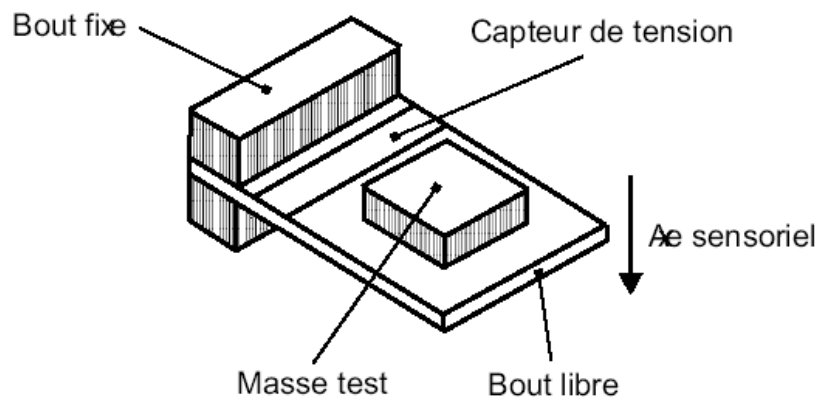


Figure 31 : Principe d'un "MEMS Strain-Sensing Accelerometer"

IV - 1. 2. 3. Centrale inertielle:

Ces différents capteurs sont regroupés au sein d'un même boîtier qui forme la centrale inertielle. Il existe plusieurs types de centrales mais la forme la plus utilisée et celle que nous utiliserons dans le cadre du cindynomètre, est composée de trois gyroscopes et de trois accéléromètres, montés de façon à ce que leurs axes sensoriels soient concourants et orthogonaux.

Afin d'éviter des perturbations entre les mesures, ces capteurs sont montés très proches les uns des autres. Dans le cas contraire, les accéléromètres pourraient être amenés à prendre en compte les rotations sous la forme d'accélération centrifuges. Néanmoins, ce problème est désormais devenu négligeable grâce à la miniaturisation des capteurs qui permet une implantation très proche des différents capteurs.

Une centrale inertielle nous permet donc de recueillir avec précision les informations relatives à la dynamique du véhicule et ainsi de détecter relativement tôt d'éventuelles pertes d'adhérence du véhicule. On utilisera donc ces informations pour mieux comprendre les données reçues par les autres capteurs, pour évaluer l'adhérence offerte par le contact pneu – chaussée et avertir le conducteur si le risque de perte de contrôle devient trop important. La centrale inertielle fournira dans le même temps des informations qui seront utilisées pour améliorer le positionnement absolu du véhicule, améliorant ainsi l'efficacité de la cartographie et des autres composants du système qui l'utilisent comme nous le verrons par ailleurs.

IV - 1. 3. Positionnement par satellite :

Le positionnement par satellite, généralement connu sous le nom de GPS¹¹, utilise le principe de triangulation pour positionner un objet dans l'espace. Sur la surface de la Terre se positionnement se fait en captant les signaux fournis par au moins quatre satellites (il est en effet nécessaire de déterminer le décalage entre l'horloge du récepteur et celles des satellites en plus de la détermination de la position XYZ du récepteur) en orbite autour de la Terre comme le montre la Figure 32.

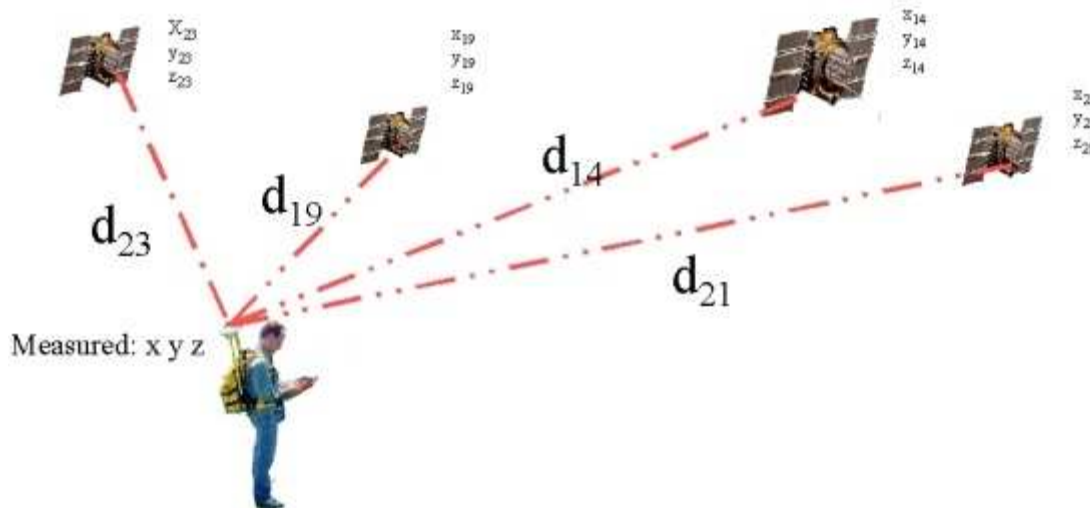


Figure 32 : Principe du positionnement absolu par GPS (d'après [NOAA-NGS])

La constellation GPS est ainsi actuellement composée de 31 satellites en orbite à 20200 km d'altitude. Aujourd'hui, suite à l'abandon du brouillage d'une partie des signaux par les USA en 2000 la précision en localisation à l'aide d'un GPS est de 20 mètres environ. Afin d'améliorer cette précision des évolutions du système ont été créées. Ainsi le système DGPS permet-il d'améliorer la précision de localisation jusqu'à quelques mètres en combinant les données reçues depuis les satellites aux données reçues d'une station fixe au sol dont la position absolue est elle aussi connue comme le montre la Figure 33.

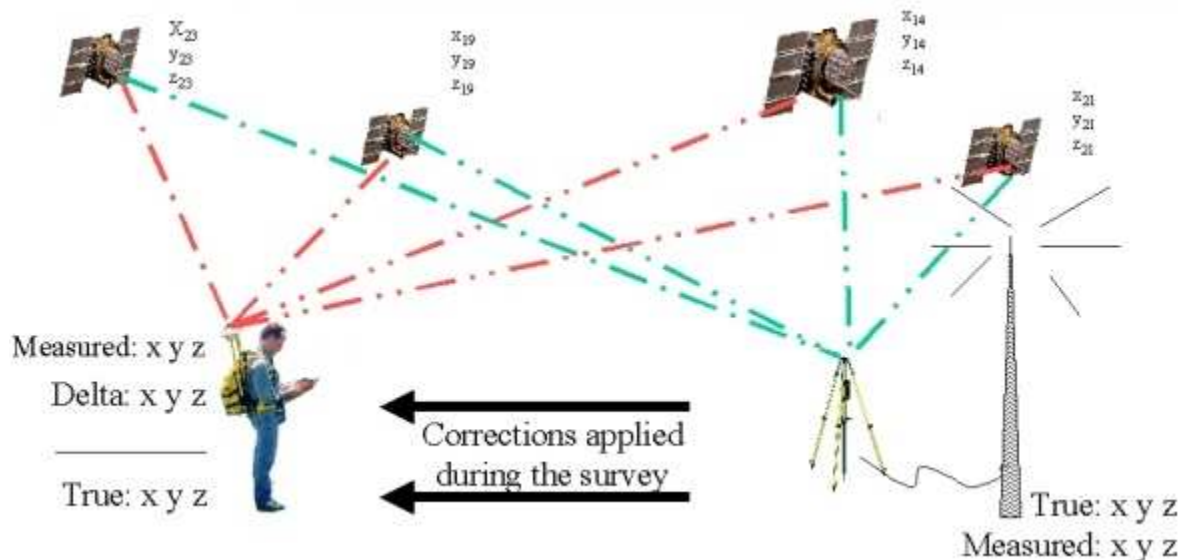


Figure 33 : Principe de la localisation différentielle par DGPS (d'après [NOAA-NGS])

¹¹ Global Positioning System – Nom du système américain de positionnement par satellite dont le GLONASS est le pendant russe et GALILEO la version européenne en cours de déploiement.

Aujourd'hui, le système DGPS est complété dans certaines parties du monde par des satellites géostationnaires qui fournissent ainsi une distance additionnelle permettant d'augmenter la précision jusqu'à quelques dizaines de centimètres. De même, avec le développement des systèmes GALILEO et GLONASS il est possible en utilisant les signaux GPS et d'un de ces deux réseaux de satellites de positionnement d'obtenir le même type de précision.

Enfin, le système RTK-GPS (pour Real-Time Kinematics GPS) permet d'obtenir des précisions de l'ordre de quelques millimètres seulement en mesurant le déphasage entre la porteuse du signal GPS reçue du satellite et la porteuse réémise par une station au sol voisine. Ce système n'est malheureusement disponible qu'autour de ces stations de base (jusqu'à 10 kilomètres) limitant ainsi son utilisation pour l'environnement automobile.

Si les améliorations de la technologie de positionnement par satellite ont permis d'améliorer la précision de positionnement à quelques dizaines de centimètres voir à quelques millimètres localement elle repose néanmoins sur l'hypothèse d'un trajet en ligne directe des signaux reçus. En effet, dans les villes où les immeubles constituent des barrières très efficaces aux signaux GPS il est très difficile d'obtenir un positionnement efficace (l'antenne du récepteur pouvant recevoir aussi bien des signaux directs que des signaux réfléchis sur les constructions alentours). L'une des méthodes pour résoudre ce problème consiste à utiliser plusieurs antennes pour le même récepteur afin d'évaluer le décalage causé par les réflexions. Nous verrons par la suite (au paragraphe IV - 3. 3. 1) comment il est possible d'utiliser d'autres capteurs du véhicule ainsi que des informations géographiques connues à l'avance pour résoudre ce problème sans utiliser plusieurs antennes.

IV - 1. 4. Synthèse :

Nous avons ainsi vu le principe de fonctionnement des trois capteurs principaux liés à la captation des données véhicules. Il existe cependant de nombreux autres capteurs comme on peut le voir sur la Figure 34, il existe aussi de nombreux capteurs à l'intérieur du véhicule. On pense par exemple aux capteurs utilisés par l'ABS (entre autres) pour déterminer la vitesse de rotation de chacune des roues du véhicule. Ces capteurs permettent ainsi de définir la vitesse du véhicule et donc par intégration la distance parcourue. Généralement cette fonction était assurée par des capteurs magnétiques qui repéraient le passage d'un marqueur magnétique pour compter le nombre de tour de roues par unité de temps. Néanmoins, ces capteurs subissent très défavorablement l'effet des perturbations électromagnétiques générées par les moteurs hybrides ainsi que par certains autres capteurs présents dans le véhicule (on a ainsi pu observer des "pulses" parasites causés par un radar monté à l'avant du véhicule). Pour contourner ce problème il peut être utile d'utiliser des capteurs optiques actifs qui ne sont pas perturbés par les rayonnements électromagnétiques externes.

De nombreux autres capteurs existent dans le moteur qui recueillent des données aussi diverses que la température, le niveau d'huile, le régime moteur... Ces informations pourront ainsi servir à évaluer l'état du moteur et éventuellement à repérer une panne imminente.

L'angle volant permet quant à lui de mesurer la direction que souhaite prendre le conducteur, celle –ci peut alors être comparée à la direction réelle du véhicule pour détecter les prémices d'un dérapage par exemple. Les clignotants, phares ... permettent quant à eux d'obtenir des informations sur ce que s'apprête à faire le conducteur. Tous ces capteurs permettent ainsi en plus d'obtenir des informations sur l'état du véhicule et son comportement de tirer des informations sur le comportement du conducteur. Ils sont ainsi à la limite des capteurs comportementaux que nous allons étudier à présent.

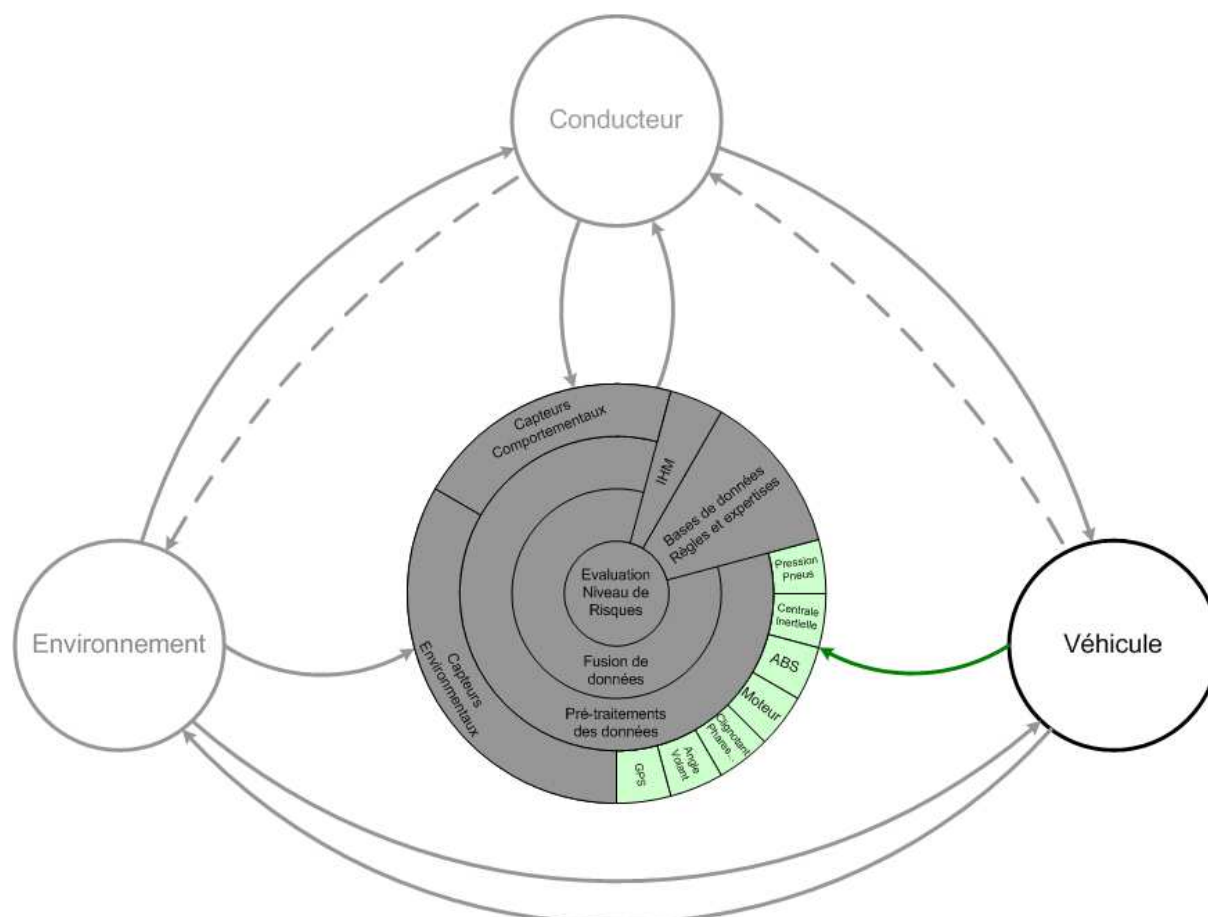


Figure 34 : Récapitulatif des capteurs véhicules

IV - 2. Capteurs de comportement :

Nous venons de donner au cindynamètre les capteurs qui lui sont nécessaires pour évaluer l'état interne du véhicule, mais il nous faut encore être capable de détecter les réactions du conducteur pour essayer d'en tirer le maximum d'informations sur son niveau de vigilance, son état d'esprit (est-il stressé ? énervé ?) et sa façon de conduire. On pourra ainsi déterminer son type de conduite ce qui nous permettra d'adapter les niveaux d'alerte en présence d'un danger à la capacité évaluée du conducteur à détecter ce danger et à y faire face.

Nous allons donc nous intéresser aux différents capteurs qui peuvent être utilisés pour comprendre les réactions du conducteur. Nous ne nous intéresserons pas aux capteurs dits "invasifs" qui nécessitent d'équiper le conducteur de capteurs pour fonctionner. Nous ne pourrions donc étudier que les signes visibles du comportement et non les grandeurs physiologiques internes souvent étudiées dans les laboratoires spécialisés (électroencéphalogramme, électrocardiogramme, ...). On peut néanmoins noter que de nouvelles recherches dans les capteurs embarqués visent à détecter le rythme cardiaque ainsi que d'autres grandeurs physiologiques par le biais de capteurs placés sur le volant ou dans le siège du conducteur [Hartland 02a][Hartland 02b] et qui ne sont donc pas invasives. Ces recherches n'en étant toujours qu'à l'état de recherche nous ne les détaillerons pas plus ici mais elles pourraient être utilisées.

IV - 2. 1. Capteurs de vigilance :

Le rôle de ce type de capteurs est de détecter une chute de vigilance du conducteur afin de pouvoir focaliser son attention sur la route si besoin est ou même de le réveiller dans le cas d'un endormissement. De tels capteurs ont déjà été développés pour des applications où la vigilance du conducteur est critique pour la sécurité des passagers, comme la conduite de trains ou plus récemment pour les chauffeurs de poids lourds. La mesure de l'attention ou de la vigilance du conducteur se fait par l'observation de certaines grandeurs physiologiques trahissant un endormissement par exemple.

IV - 2. 1. 1. Capteurs de pression :

Ces capteurs ont été développés par la SNCF pour équiper les volants des TGV avec le système VACMA (Veille Automatique avec Contrôle du Maintien d'Appui). Ils analysent en permanence la réponse du chauffeur à une sonnerie déclenchée toutes les 50 secondes et qui doit provoquer une augmentation de la pression des mains du conducteur sur le volant. En cas de non-réponse à cette alarme et à une nouvelle intervenant 10 secondes plus tard le freinage d'urgence est déclenché.

L'application de ce système tel quel n'est bien entendu pas envisageable dans un véhicule, qu'il s'agisse d'un camion ou d'une voiture, car il impose des contraintes beaucoup trop fortes au conducteur. De plus, il s'avérerait très vite ennuyeux pour le conducteur et risquerait de provoquer des réactions de rejet de la part de celui-ci.

Pour une application au cindynamètre, il faudrait plutôt utiliser les capteurs de pression au niveau du volant pour déterminer la force exercée par le conducteur sur celui-ci et pouvoir ainsi caractériser une angoisse du conducteur (qui se caractériserait par une très forte prise du volant) ou une baisse de vigilance (prise très légère en position très basse). Le système ainsi modifié permettrait aussi de détecter les réponses du conducteur face aux alarmes éventuellement déclenchées par le cindynamètre.

IV - 2. 1. 2. Caméra:

La recherche sur les baisses de vigilance a été amorcée, dans le secteur automobile, pour trouver un moyen de lutter contre l'endormissement des chauffeurs de poids lourds qui est responsable d'une grande partie des accidents impliquant un véhicule poids lourd. Les résultats de ces recherches ont conduit à la conception d'un capteur vidéo fonctionnant de jour comme de nuit capable de détecter les signes de lassitude chez un conducteur.

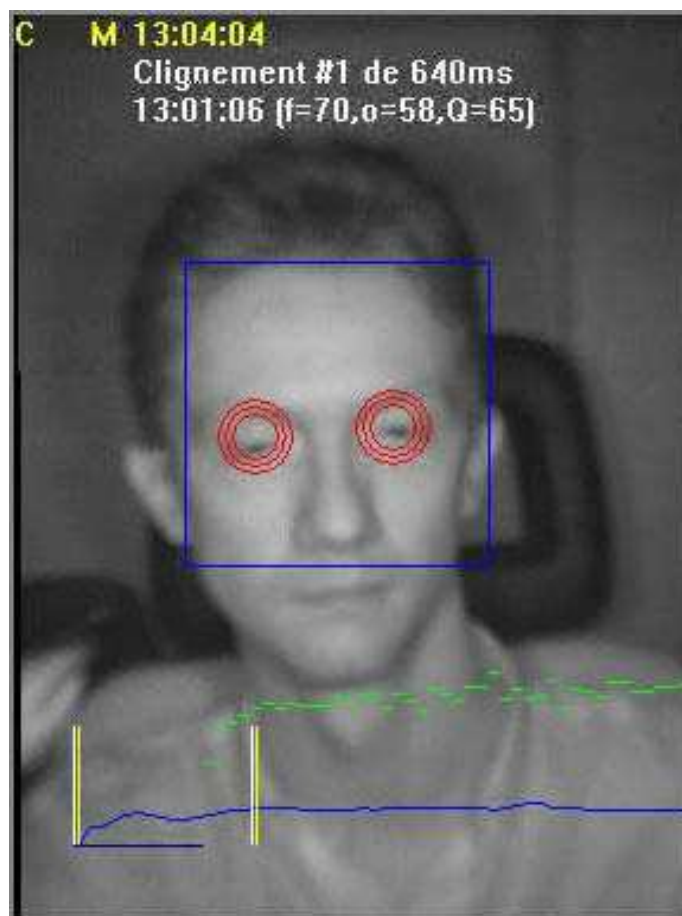


Figure 35 : Exemple de mesure du capteur vidéo de vigilance

L'un de ces systèmes, développé au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris, repose sur une caméra CCD capable de voir dans le proche infrarouge et d'une source étendue de rayonnement infrarouge (il s'agit de plusieurs diodes électroluminescentes émettant dans le proche infrarouge) implantées dans le volant. Un algorithme repère les yeux du conducteur puis calcule la fréquence de clignement et le temps de fermeture des yeux du chauffeur (Figure 35). Au-delà d'un certain seuil, le calculateur déclenche une alarme qui réveille le chauffeur.

Ce système de contrôle de la vigilance par vision présente l'avantage d'être relativement peu cher (une telle caméra étant devenue très courante et donc peu chère, les diodes quant à elles ne valent que quelques centimes d'euros). De plus, ses performances sont assez bonnes au niveau de la détection de chute de vigilance et il fonctionne de jour comme de nuit grâce à l'utilisation de l'éclairage infrarouge.

IV - 2. 2. Capteurs de comportement :

Le risque encouru sur la route dépend le plus souvent de la vigilance du conducteur mais aussi de son comportement et de ses capacités de réaction, il est donc essentiel que le cindynamètre dispose de capteurs capables de le renseigner sur la vigilance du conducteur (avec les capteurs précédemment cités) mais aussi d'identifier le comportement du conducteur tant au niveau des actions prises dans le cas d'un freinage brusque par exemple (s'il débraye avant de freiner, le freinage ne bénéficiera pas du frein moteur) qu'au niveau du comportement envers les autres usagers (refus de priorité, vitesse excessive, ...).

Les capteurs d'évaluation du comportement seront donc principalement des capteurs sur les paramètres de conduite modifiés consciemment ou non par le conducteur (vitesse, changement de voie, dépassement, ...) et sur les actionneurs utilisés (pédalier, boîte de vitesse, clignotants, ...).

IV - 2. 2. 1. Capteur de vitesse :

Il s'agit ici du capteur le plus courant puisqu'il est présent sur tous les véhicules. Ce capteur existe sous différentes formes suivant le type de véhicule et suivant son âge. Nous nous intéressons ici uniquement aux capteurs odométriques qui équipent tous les véhicules équipés d'un système ABS, puisque ceux-ci constituent la cible de notre système. Ceci nous permettra ainsi de disposer des vitesses de chacune des roues du véhicule afin de pouvoir détecter un dérapage par exemple. La vitesse globale du véhicule est donnée comme la moyenne des vitesses calculée sur les roues avant.

Un tel capteur nous permet de mesurer une vitesse non adaptée à une situation donnée et surtout une vitesse excessive par rapport aux limites autorisées, ce qui témoigne d'après plusieurs études anglaises d'un comportement de type "road rage" (comportement à tendance destructrice au volant).

IV - 2. 2. 2. Capteur d'angle volant :

Ce capteur est relativement facile à monter sur un véhicule puisqu'il suffit de monter un engrenage sur l'arbre de direction et de relier celle-ci à un odomètre classique qui comptera les tours de l'axe grâce à un système à fourche optique. Grâce à la démultiplication offerte par l'engrenage utilisé et à la précision des roues codeuses des odomètres, ce système permet d'obtenir une mesure très précise de l'angle du volant ainsi que de son évolution au cours du temps. Les véhicules récents d'un grand nombre de constructeurs disposent de cette information en série sur leur bus CAN (ou bus équivalent).

Ce système a été développé principalement par les équipes de recherche qui visaient à contrôler latéralement le véhicule en agissant sur le volant. Ils pouvaient ainsi obtenir une mesure précise de l'angle volant à tout moment et ils ont donc pu utiliser toutes les méthodes d'asservissement utilisées en automatisme.

La mesure des variations de l'angle volant permet de détecter plusieurs types de comportements éventuellement dangereux. Ainsi, un nouveau conducteur inexpérimenté fixe son regard juste au bout du capot et doit donc corriger très souvent sa trajectoire par rapport à sa position dans la file. Ceci se traduit par des variations de l'angle du volant très fréquentes et relativement fortes. Un tel comportement indique ainsi que le conducteur n'est attentif qu'à ce qui se passe juste quelques mètres devant son véhicule et il aura donc un temps de réaction plus long en cas de freinage brusque d'un obstacle plus lointain. L'identification d'un tel comportement permettra au cindynamètre de moduler la distance de sécurité en fonction du degré d'attention et du temps de réaction estimés du conducteur.

IV - 2. 2. 3. Capteurs de course pédalier :

La vitesse et l'évolution de l'angle volant permettent de reconnaître certains comportements à risques mais il existe d'autres types de comportement qui peuvent s'avérer dangereux et qui n'apparaissent qu'en observant la façon dont le conducteur utilise son pédalier que ce soit pour freiner, pour débrayer ou pour accélérer.

Ainsi, de très nombreux conducteurs débrayent en même temps ou même avant de freiner en cas d'urgence, ce qui se traduit par une augmentation de la distance de freinage puisque le véhicule ne bénéficie plus du frein moteur. Un tel comportement sera aisément identifié avec des capteurs de course sur les pédales de frein et d'embrayage. D'autres comportements pourront aussi être caractérisés par la façon de passer les vitesses ou d'accélérer, leur détermination passe donc obligatoirement par l'équipement des trois pédales avec des capteurs de position.

Les capteurs de course de pédale n'équipent pour l'instant que la pédale d'accélérateur des véhicules les plus récents ainsi que la pédale de frein pour les véhicules équipés d'un système d'aide au freinage d'urgence. Nous pourrions réutiliser les capteurs existants sur les pédales afin d'avoir le maximum d'informations et équiper celles qui ne le sont pas.

Plusieurs types de mesures peuvent être faits pour déterminer la course d'une pédale. On peut mesurer directement la variation angulaire de la position de la pédale en montant un potentiomètre sur l'axe de rotation de celle-ci (voir Figure 36), cette mesure nous donne alors directement l'information recherchée.

FIG. 2

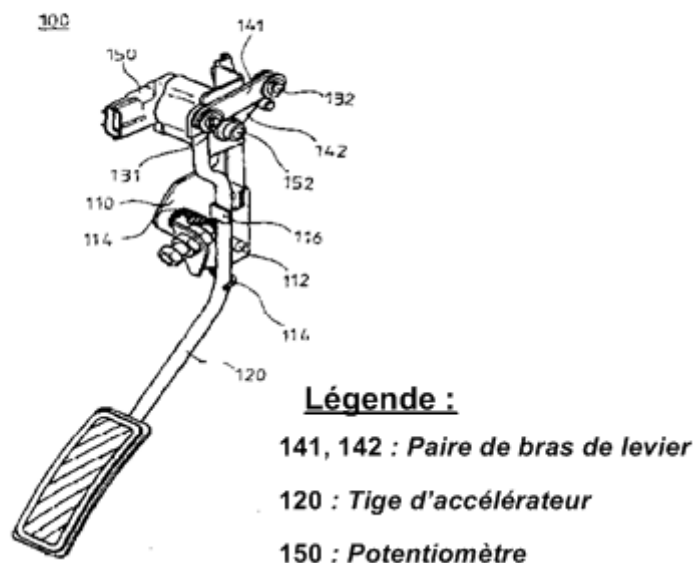


Figure 36 : Schéma descriptif de l'implantation d'un capteur de course sur une pédale d'accélérateur (issu du brevet n° EP1101646)

Une autre mesure appliquée uniquement dans le cas de la pédale de frein, consiste à mesurer la pression dans le maître-cylindre afin de déterminer la course de la pédale, ces deux grandeurs étant totalement dépendantes. Enfin, un dernier type de mesure consiste à utiliser des capteurs magnétiques pour mesurer soit le déplacement linéaire d'une pièce mécanique liée à la pédale soit directement la rotation de la pédale. Ce dernier type de capteur présente l'avantage de ne pas être en contact avec des pièces en mouvement et semble donc plus résistant. Néanmoins, la mesure effectuée est très sensible au bruit magnétique très présent dans un véhicule (allumage, téléphone portable, ...). Nous préférons donc utiliser la mesure de l'angle de rotation de la pédale qui peut être appliquée aux trois pédales contrairement à la mesure de la pression dans le maître-cylindre.

IV - 2. 2. 4. Autres capteurs :

Nous avons vu ici certains des capteurs qui peuvent servir à détecter des comportements dangereux. La détection d'autres types de comportements pourra se faire par analyse des données d'autres capteurs (caméra, télémètre, ...) ainsi que par la lecture des informations transitant sur le bus CAN du véhicule (pour les clignotants ou les changements de vitesse par exemple).

IV - 2. 3. Synthèse

Nous avons ainsi vu comment certains capteurs non invasifs pouvaient être utilisés pour tenter d'évaluer le comportement et la vigilance du conducteur. Bien évidemment cette analyse reste très délicate tant les paramètres varient d'un individu à l'autre voire même en fonction du temps. De plus, nous ne pourrions jamais évaluer ce qui se passe dans la tête du conducteur, en particulier si celui-ci pense à toute autre chose qu'à sa tâche de conduite. Cependant, l'utilisation des capteurs (résumés dans la Figure 37) devrait permettre au cindynamètre d'obtenir une information utile sur l'état du conducteur vis-à-vis de la tâche de conduite même s'il ne peut en comprendre les causes.

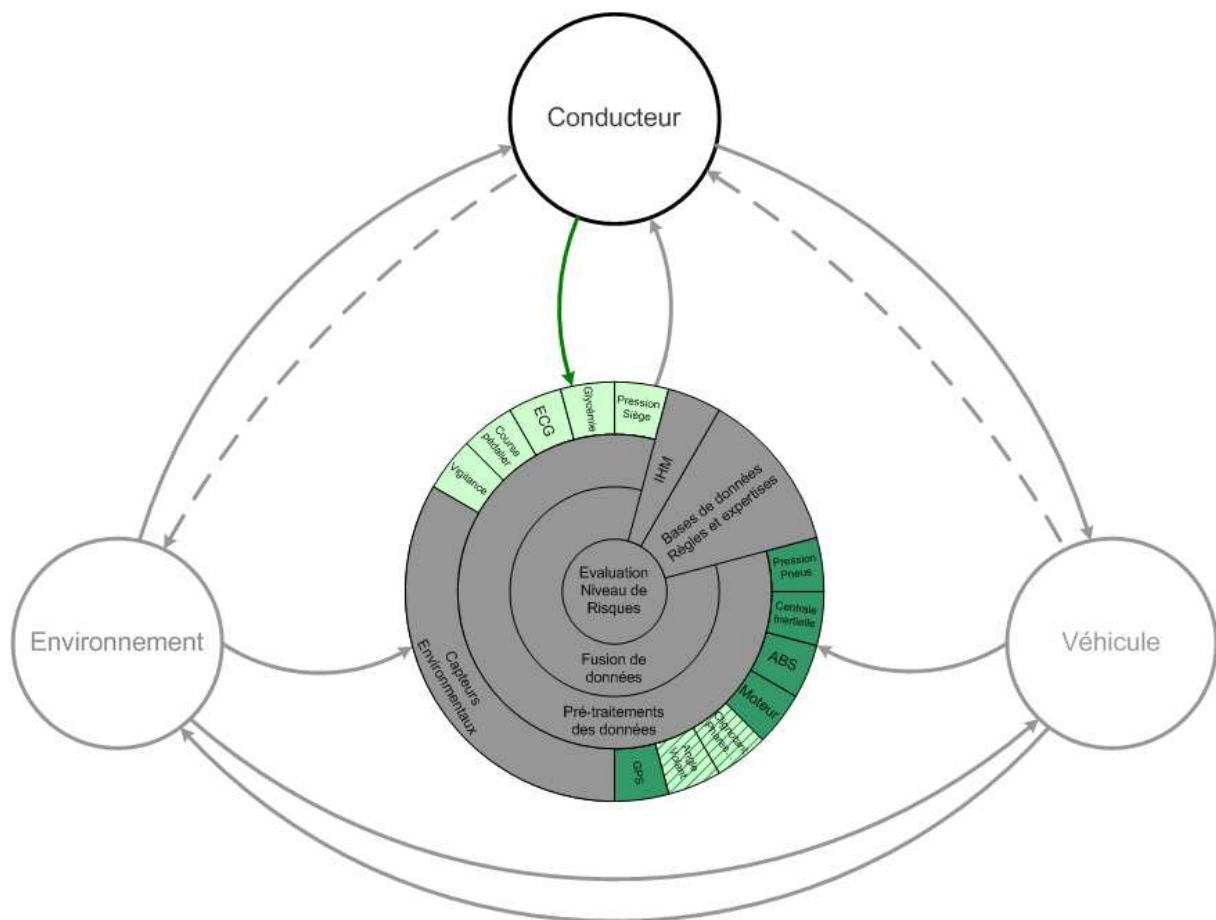


Figure 37 : Récapitulatif des capteurs "humains" proposés

La Figure 37, présente en plus de ces capteurs des capteurs biologiques permettant de mesurer la pression appliquée par le conducteur sur le siège ainsi que la glycémie ou l'électrocardiogramme du conducteur. Ces capteurs se basent sur les récents développements mentionnés en introduction et qui sont actuellement au stade de prototype. La mesure de la pression appliquée au siège permet d'évaluer la position du conducteur pour éventuellement en déduire des signes de fatigues. L'ECG peut être capté de la même façon en mesurant les légères variations de pression causées par le flux sanguins. Enfin la glycémie peut être mesurée par la conductance de la paume des mains sur le volant. Ces mesures permettront ainsi de détecter les signes avant coureurs d'un malaise du conducteur.

IV - 3. Capteurs "environnementaux"

Les capteurs présentés jusqu'ici nous permettent de recevoir les données concernant le comportement du conducteur, son niveau de vigilance, l'état du véhicule et ses paramètres dynamiques. Il nous reste donc à étudier les capteurs qui nous permettront de détecter et de comprendre tous les événements relatifs à l'environnement du véhicule et qui pourraient compromettre sa sécurité. Bien entendu nous limiterons cette étude aux capteurs qui peuvent être embarqués sur un véhicule puisque nous voulons que le cindynamètre ne requière pas d'informations complémentaires de la part de l'infrastructure.

On considère donc ici les capteurs embarqués permettant de connaître la configuration de l'environnement direct (et éventuellement plus lointain) au travers de la détection des véhicules, des voies de circulation, de la forme de la route, de la signalisation horizontale et verticale et des conditions météorologiques.

IV - 3. 1. Télémètres :

Il s'agit ici de capteurs permettant de mesurer la distance à un objet et de retourner éventuellement d'autres informations comme la vitesse relative de la cible. Quatre grandes familles de télémètres existent :

IV - 3. 1. 1. Télémètres à ultrasons :

Ce type de télémètre utilise la mesure du temps de parcours aller-retour d'un signal ultrasonore pour obtenir la distance à une cible. Un tel télémètre utilise un émetteur et un récepteur piézo-électriques pour générer l'onde émise et recevoir l'onde réfléchi.

De conception très simple, ce type de télémètre présente l'avantage d'être très économique et très peu encombrant (un émetteur-récepteur piézo-électrique ne mesure qu'un centimètre de diamètre). Malheureusement, leur principe de base apporte de nombreux désagréments. Tout d'abord, les ultrasons, comme toute onde de pression, ne sont pas directifs ce qui empêche ainsi d'avoir un positionnement précis à grande distance. De plus, la vitesse de propagation du son dans l'air dépend énormément de différents facteurs comme la température, la pression atmosphérique et l'humidité. La mesure de distance obtenue ne sera donc correcte que si la vitesse du son de référence est recalculée en temps réel en fonction de ces facteurs et ne restera, malgré cela, précise que sur un voisinage du capteur.

De tels capteurs ne peuvent donc être utilisés pour la détection d'obstacles à grande distance mais peuvent néanmoins s'avérer utiles dans des applications d'anticollision à très basse vitesse comme le prouve leur intégration sur de nombreux modèles de véhicules en tant qu'aide au parking. Ils ne permettent cependant pas une détection parfaite de tout objet comme l'a récemment montré une étude de la NHTSA [NHTSA 06] dans laquelle des systèmes d'aide au parking à base de capteurs ultrasons ne détectent pas un enfant jouant à l'arrière du véhicule.

Pour notre application, ce capteur pourrait s'avérer intéressant pour de l'anticollision à l'arrière et sur les côtés du véhicule, permettant ainsi de supprimer le problème de l'angle mort.

IV - 3. 1. 2. Télémètres infrarouges :

Il s'agit ici de la version bon marché du capteur suivant (le télémètre laser). Son principe de base repose sur l'émission d'un faisceau infrarouge modulé et la réception du faisceau réfléchi sur un récepteur déporté (voir Figure 38). Le calcul de la distance à la cible se fait alors par triangulation.

Ce capteur présente l'avantage d'être très directif, peu encombrant (plus petit qu'un télémètre à ultrasons), très peu gourmand en énergie (quelques dizaines de mW en émission contre quelques Watts pour l'émetteur ultrason) et d'être quasiment indépendant des conditions extérieures (pression atmosphérique, température, ...) exception faite évidemment des salissures sur le capteur.

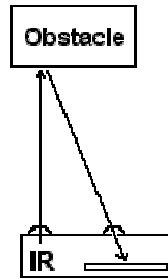


Figure 38 : Principe du télémètre infrarouge

Il présente malheureusement de très gros inconvénients : le principe de triangulation ainsi que la puissance émise lui confère une portée limitée à moins d'un mètre. Sa précision dépend de la distance à la cible et décroît rapidement (conséquence du calcul trigonométrique effectué).

Un deuxième type de télémètre infrarouge existe et utilise quant à lui la puissance réfléchi pour mesurer la distance le séparant d'un objet. Il est en fait basé sur l'émission successive de brefs impulsions infrarouges de puissance croissante. Lorsque le récepteur reçoit un signal il calcule la distance à partir de la dernière puissance émise. Ce type de mesure n'est pas très précis et dépend grandement de la réflectivité de la cible.

Ce type de capteurs est le plus souvent utilisé en robotique mobile, pour de petits robots, l'application la plus médiatisée jusqu'à présent étant l'implantation d'un tel télémètre dans le museau du robot chien Aibo de Sony [Lawton 04]. Nous ne pourrions pas nous servir de ce type de capteur pour faire de la télémétrie.

IV - 3. 1. 3. Télémètres laser :

Comme leur nom l'indique, ce type de capteur utilise un faisceau laser (généralement dans le proche infrarouge) pour mesurer la distance entre l'émetteur et la cible. Deux types de mesures peuvent être effectués selon l'application qui en est faite.

Pour des applications à très courte portée (moins d'un mètre), on utilise des télémètres à triangulation, dont la précision est très forte mais dont la plage de mesure est limitée à moins d'un mètre. Ces télémètres se basent sur le même principe que les télémètres infrarouges à triangulation.

Les télémètres à corrélation de phase ont une plus faible résolution mais une plage de mesure importante (plusieurs km). Ils permettent de s'affranchir de la limite de distance des télémètres à triangulation et ont une meilleure résolution que les télémètres à temps de vol. Malheureusement, cette précision se paie par un temps de réponse long de quelques millisecondes.

Pour des capteurs longue portée, on utilise la mesure du temps de vol qui est alors proportionnelle à la distance aller-retour à la cible. Une telle mesure requiert une horloge très précise permettant de mesurer des temps de l'ordre de la nanoseconde (voir même de la picoseconde) nécessaire à l'obtention d'une précision suffisante. Les avantages liés à l'utilisation d'un faisceau laser sont très nombreux puisque celui-ci est très directif, très rapide (ce qui permet d'effectuer des mesures relativement souvent) et très peu sensible aux variations des conditions atmosphériques. Enfin, la mesure du temps de vol permet de s'affranchir du problème de réflectivité de la cible (bien que celle-ci doive être suffisamment grande pour que le faisceau incident soit assez réfléchi). De plus ce type de télémètres offre actuellement un temps de réponse extrêmement faible.

Ce type de capteurs présente un problème dû à sa directivité qui ne lui permet d'obtenir qu'un point de mesure. Pour remédier à ce problème ont été créés les télémètres lasers à balayage qui reposent sur le principe suivant (voir Figure 39) : le faisceau laser est émis sur un miroir rotatif qui après chaque point de mesure tourne d'un angle donné. Ainsi, on balaye l'espace sur un plan très large.

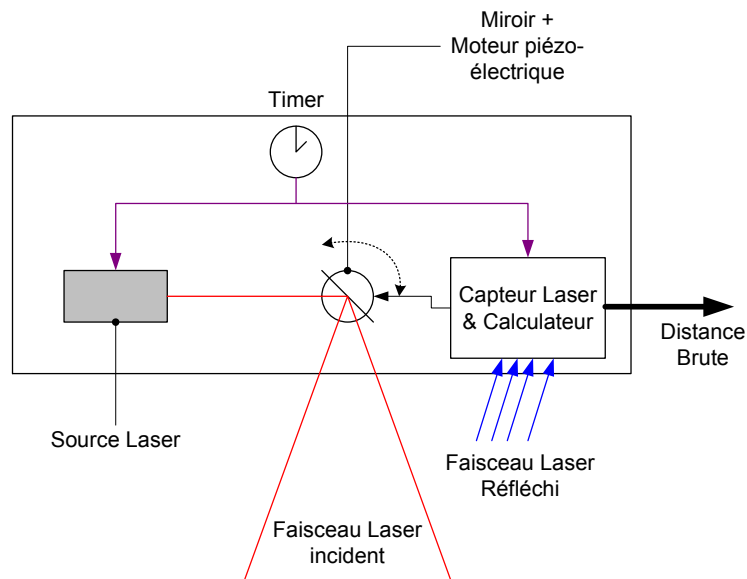


Figure 39 : Schéma de principe du télémètre laser à balayage

Ce balayage a néanmoins l'inconvénient de demander beaucoup plus de place pour loger les parties mécaniques nécessaires à l'animation du miroir. De plus l'utilisation de pièces mécaniques mobiles entraîne une certaine fragilité du dispositif. Enfin, ce système devient extrêmement cher du fait de l'horloge très précise à utiliser, de l'usinage mécanique et du durcissement du dispositif total pour le rendre fiable.

De tels systèmes sont néanmoins utilisés dans de très nombreuses applications (principalement de recherche). Il faut noter que des capteurs à balayage dans les plans horizontaux et verticaux existent mais que ceux-ci se révèlent encore plus fragiles, encombrants, lents et chers.

Un nouveau type de capteur commence actuellement à faire son apparition sur le marché et offre une plus grande fiabilité et une résistance mécanique accrue. Ces capteurs à base de MEMS utilisent des micro-miroirs déplacés par des actionneurs MEMS [Mateus 01].

IV - 3. 1. 4. Radar :

On se base ici sur le radar Doppler, seul type de radar à être utilisé dans le domaine automobile (on ne regardera donc pas le principe du radar à ouverture synthétique utilisé principalement par les satellites de télédétection, ou des radars de type OTH – Over The Horizon – utilisés dans les applications de défense pour la détection d'objets volant au-delà de l'horizon).

Il existe actuellement deux radars utilisés dans le domaine automobile pour assurer les fonctions de régulation de vitesse automatique. Ceux-ci sont utilisés sur les modèles de haut de gamme de certains constructeurs. Le modèle construit par la société anglaise TRW utilise un émetteur à 77 GHz tandis que celui de Delphi utilise un radar à 76 GHz. Ces deux radars détectent des véhicules roulant à plus de 30 km/h. Ces deux appareils aux caractéristiques très proches sont basés sur le principe du radar Doppler qui permet, en mesurant la déviation en fréquence de l'écho, de déterminer la vitesse relative de la cible par rapport au véhicule.

Ce type de radar appliqué à l'automobile a généralement un angle d'ouverture très faible (quelques degrés seulement), le rendant inutile pour des applications de détection de véhicules dans d'autres voies ou dans le cas d'un trajet sur route sinueuse. Cet angle très faible est nécessaire pour réaliser un filtrage temporel des cibles détectées par balayage. Ce filtrage peut ainsi poser des problèmes au niveau du temps de réponse vis à vis d'une cible changeant de direction. Enfin, par son principe même, le radar pose certains problèmes pour la détection de cibles dites "non coopératives" qui ne présentent qu'une très faible surface équivalente radar (cette surface correspond à la surface métallique qui aurait renvoyé le même écho).

Pour compenser les problèmes du radar certains projets ont fusionné les informations obtenues avec un radar et un télémètre laser de façon à couvrir le plus grand angle possible. C'est notamment le cas du projet européen CARSENSE, qui a réalisé la fusion des informations données par deux radars, un télémètre et deux caméras pour une très bonne détection des cibles à l'avant du véhicule.

Depuis quelques années les constructeurs cherchent aussi à développer des radars à courte portée mais grand angle utilisant une émission à 36 GHz. Ces radars restent néanmoins à l'heure actuelle à l'état de prototype et souffrent toujours de problèmes à détecter les cibles non coopératives.

IV - 3. 2. Autres détecteurs d'obstacles :

On considère ici les capteurs autres que les télémètres, capables de détecter des obstacles dans une scène tridimensionnelle. Il s'agit de capteurs bidimensionnels, passifs ou actifs, dont l'exploitation des données permet de déduire la présence d'obstacles et de les positionner dans l'environnement.

IV - 3. 2. 1. Caméras :

Il s'agit du capteur ayant le plus d'applications possibles. La détection d'obstacles se fait de deux manières :

- Par stéréovision. Il s'agit alors de faire de l'appariement de points particuliers sur les images de deux caméras (ou plus) acquises simultanément ou à des instants différents (on parlera alors de "Shape from motion" puisque ce sera le déplacement qui créera la multiplication des points de vue). L'appariement permet alors par rétroprojection d'obtenir la distance entre chaque caméra et tous ces points particuliers. Ce traitement permet d'obtenir une carte tridimensionnelle assez précise de l'environnement présent dans le champ des caméras, mais il s'avère extrêmement lourd en termes de coût de calcul et de contraintes lors de l'implémentation. En effet, pour obtenir une bonne précision sur la carte de profondeur il est impératif de connaître très précisément les paramètres des caméras (distance focale, distorsion, position et direction de l'axe optique, ...), de s'assurer que les caméras sont suffisamment éloignées les unes des autres et de garantir une immobilité de tous ces paramètres au cours du temps. De plus, l'appariement nécessite de trouver des points particuliers facilement détectables dans les deux images, ce qui peut s'avérer fastidieux. De telles contraintes ont longtemps rendu l'utilisation de la stéréovision pour des applications temps réel embarquées difficile. Néanmoins, l'augmentation de la puissance de calcul disponible ainsi que l'amélioration des algorithmes existants ont permis de rendre plus intéressante la stéréovision comme le prouvent l'apparition de produits dédiés chez MobilEye par exemple [MobilEye].
- Par reconnaissance de formes, puis par exploitation des caractéristiques connues de cet obstacle pour rétroprojeter son image dans la scène 3D et ainsi obtenir sa position dans la scène réelle. Un tel traitement se fait généralement dans le cas mono caméra et se révèle assez simple à implémenter, performant et rapide. Malheureusement, il n'est adapté qu'à des cibles dont le modèle est connu et facilement reconnaissable (les voitures sont ainsi un bon type de cible puisque leur largeur – caractéristique utilisée généralement pour la rétroprojection – est à peu près constante sur tous les modèles de tous les constructeurs – entre 1m60 et 1m80) et s'avère assez peu précis par rapport à un télémètre ou à un système stéréo correctement calibré du fait des erreurs sur le modèle.

Le principal avantage de cette méthode de détection d'obstacles réside dans son coût, qui, comparé à celui de télémètres radar ou laser, est très faible puisque l'on peut utiliser ici des caméras assez courantes (certains constructeurs tel Toyota en utilisant déjà dans des modèles commercialisés). De plus ce type de capteur peut être utilisé pour d'autres applications ce qui fait de lui un capteur très polyvalent.

IV - 3. 2. 2. Caméras proche infrarouge :

Il s'agit simplement de caméras dont les CCD sont sensibles dans le domaine du proche infrarouge (780-1000 nm). Cette solution est dite active puisqu'elle nécessite la présence d'une source lumineuse pour fonctionner. Il faudra donc illuminer la scène avec un éclairage infrarouge pour que la solution fonctionne. Un exemple typique de cette solution est le système "nightshot" qui équipe tous les caméscopes SONY depuis quelques années et qui permet de "voir" de nuit.

Cette solution à l'avantage d'être devenue assez courante et donc d'être relativement abordable, de plus elle n'est pas très encombrante. Néanmoins, elle reste sensible aux mêmes problèmes que les caméras "visibles" puisqu'un éclairage à contre sens ou des gouttes de pluie sur l'objectif perturbent grandement les données. Enfin, la portée de tels capteurs est limitée à la portée de l'éclairage ce qui pose des problèmes de portée de détection.

IV - 3. 2. 3. Capteurs thermiques :

Il s'agit ici encore de caméras mais qui, cette fois, ne sont sensibles qu'à l'infrarouge lointain émis par tout corps chaud (longueurs d'ondes : 8 à 12 μm). On montre (Figure 40) un exemple d'image infrarouge sur route, on voit nettement l'intérêt de ce capteur qui permet de détecter de très loin des véhicules ou des piétons même en pleine nuit alors qu'ils sont invisibles autrement.



Figure 40 : exemple d'implémentation d'une aide à la conduite de nuit par caméra thermique

Ces caméras présentent l'avantage d'être très bien adaptées au contexte routier puisque tout véhicule roulant chauffe ses pneus et son échappement, les rendant très facilement détectables sur une image infrarouge. De plus, un tel dispositif permet de détecter les piétons puisque ceux-ci apparaissent encore une fois très clairement du fait de la température de leur corps (de même que tous les animaux à sang chaud pouvant traverser la route). Ces capteurs offrent une fréquence d'acquisition (30 Hertz pour les plus courants) comparable à celle des caméras classiques et permettent de reprendre le même type de traitements (certains groupes de recherche proposent d'ailleurs des prototypes de stéréovision par camera infrarouge pour la détection d'obstacles depuis quelques temps [Bertozzi 05] [Tsuji 02]). Ils ne sont sensibles ni à un éblouissement par d'autres véhicules, ni à la présence d'eau sur l'objectif, ce qui fait d'eux des capteurs très robustes. Enfin, les caméras thermiques permettent comme nous l'avons vu de détecter des obstacles non éclairés même de nuit et sans éclairage supplémentaire, ce qui présente un avantage de sécurité non négligeable.

Malheureusement, ces capteurs thermiques non refroidis sont encore extrêmement chers puisqu'on les trouve en vente à plus de 10.000 dollars, ils ne permettent pas de détecter les objets froids (voiture arrêtée par exemple) et ne peuvent être placés dans l'habitacle du véhicule puisque le pare-brise n'est pas transparent à ces longueurs d'ondes. Il existe d'autres capteurs thermiques refroidis qui présentent l'avantage d'être moins bruyants mais plus encombrants et beaucoup plus chers.

Enfin, ces capteurs sont sensibles aux conditions de température extérieure qui peuvent limiter leur utilité. Ainsi, en période de forte chaleur le contraste entre être humain, air chaud et objets environnants (y compris la surface de la route) devient très faible limitant ainsi la détectabilité des objets. Ainsi la Figure 41 montre-t-elle les différences de contraste dans une image thermique pouvant exister suivant les conditions climatiques. On y voit aussi apparaître le bruit très élevé présent dans de telles images.



Figure 41 : Images thermiques capturées à différents jours et différentes heures [Davis 05]

IV - 3. 3. Détection de la route et de la signalisation

Nous considérons dans cette partie tous les capteurs qui permettent de détecter la route, les voies de circulation, ainsi que l'approche du véhicule sur une infrastructure potentiellement dangereuse (virage, intersection, ...). Ces capteurs doivent aussi permettre de détecter et d'interpréter correctement les éléments de signalisation qui renseignent sur les limitations et sur les éventuels dangers présents plus loin. Il existe en fait deux types de capteurs qui s'avèrent complémentaires pour réaliser ces deux fonctions, ceux qui connaissent à l'avance le trajet de la route et la signalisation et peuvent donc prédire sa forme, et ceux qui "découvrent" la route et qui la détectent véritablement.

IV - 3. 3. 1. Systèmes de navigation :

Il ne s'agit pas à proprement parler d'un capteur mais plutôt de la fusion des données recueillies auprès de plusieurs capteurs. Les systèmes de navigation sont en effet composés au minimum d'une base de données géographiques, regroupant toutes les informations routières (nom des rues, sens de circulation, position et courbures des virages, nombre de voies, ...), et d'un système permettant le positionnement géographique précis du véhicule.

L'exploitation des données de localisation se fait au travers de la base de données géographique qui permet, grâce au procédé de map-matching, de faire correspondre à la position mesurée une position sur une route présente dans la cartographie. Ceci se fait généralement en associant à une position le segment (correspondant à un morceau de route) le plus proche dans la cartographie. D'autres méthodes permettent de raffiner cette mise en correspondance en étudiant la succession de points mesurés (segments de trajectoire) et en la comparant aux différents segments de routes présents dans la cartographie.

Les bases de données géographiques devront être complétées avec la signalisation présente sur la route. Cette application sera d'ailleurs une sous partie "visible" du cindynomètre sous la forme de la signalétique embarquée qui permet de présenter au conducteur la signalisation à l'avance évitant ainsi que des erreurs de conduite (dépassement de la vitesse autorisée, refus de priorité, ...) ne soient commises à cause d'une faute d'inattention, du masquage d'un panneau par la végétation ou par un autre véhicule (Figure 42).

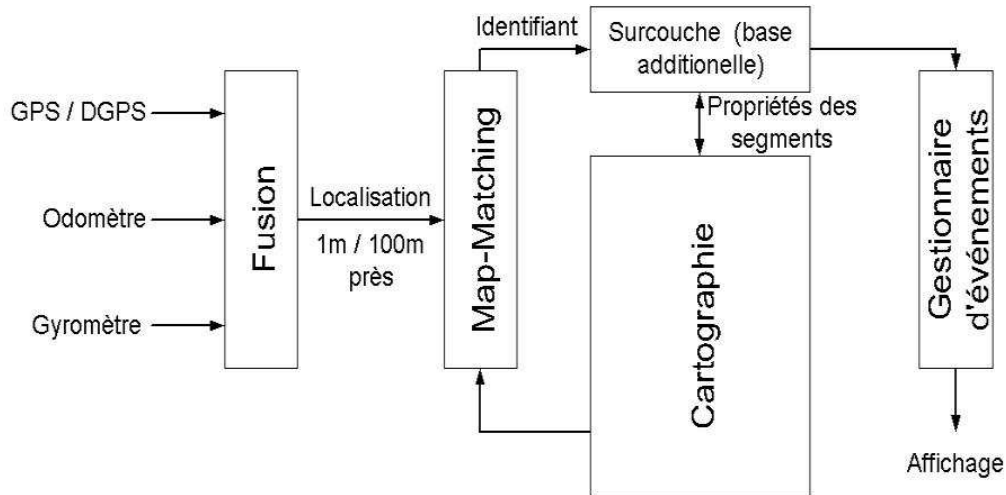


Figure 42 : Schéma de principe de la signalétique embarquée

Le système de base utilisé dans tous les systèmes de navigation commerciaux actuels est le GPS. Certains systèmes récents rajoutent quant à eux les informations d'une centrale inertielle et éventuellement des odomètres pour obtenir un positionnement extrêmement précis. Celle-ci permet de corriger en temps réel les dérives et erreurs de ces trois capteurs, ainsi que de continuer à avoir la trajectoire du véhicule même lorsque le GPS ne peut plus déterminer sa position (pas assez de satellites visibles par exemple). Il arrive aussi que le GPS introduise de très grandes erreurs de position en ville qui pourrait mener à une erreur de navigation. Ces erreurs sont dues à la proximité des rues dans les zones urbaines et aux échos des signaux des satellites qui peuvent induire en erreur le GPS.

Ces systèmes de navigation hybridés présentent de nombreux avantages pour nous du fait de l'efficacité du positionnement (on cherche en effet à obtenir une précision sub-métrique sur le positionnement) et donc de la quantité d'informations disponibles au travers de la base de données géographiques. En effet, il n'est pas obligatoire de se limiter à la forme des routes et à la signalisation, il pourrait être intéressant pour le cindynomètre de disposer par exemple des informations sur le trafic moyen sur une route ou des "points noirs" – lieux avec un très grand nombre d'accidents recensés.

Ces systèmes présentent néanmoins certains inconvénients majeurs. Le premier, et non le moindre, repose sur l'état de développement de ces systèmes, qui ne sont pas encore au stade commercial et dont la fiabilité n'est pas encore parfaite. Un deuxième problème provient de la nécessité de disposer de bases de données géographiques complètes et exactes ; donc d'une mise à jour régulière de ces informations. Ce problème apparaît nettement lorsque l'on considère une zone de travaux par exemple : la signalisation temporaire qui en découle n'apparaît pas sur les bases de données géographiques tout comme les éventuelles modifications de la forme de la route. Ce problème pourra être résolu soit par l'ajout d'un système de mises à jour régulières (ou lorsqu'elles deviennent nécessaires) par le biais d'une connexion sans fil à un serveur (via une liaison Internet sans fil par exemple), soit par l'utilisation d'un système de détection optique. Enfin, ces systèmes de navigation hybridés coûtent extrêmement chers à cause des composants utilisés. En effet, une centrale inertielle de bonne qualité coûte environ plusieurs milliers d'euros, de même qu'un DGPS (GPS différentiel permettant d'obtenir une meilleure précision) et sa base de données auquel il faut ajouter un abonnement annuel pour bénéficier du service DGPS.

IV - 3. 3. 2. Systèmes optiques :

Il s'agit en fait d'un système utilisant une ou plusieurs caméras couplées à un ordinateur permettant de détecter la route, les voies et la signalisation. Un tel système n'existe actuellement qu'au stade de la recherche mais plusieurs laboratoires obtiennent d'ores et déjà des résultats probants (Figure 43). Nous présenterons par la suite un tel système à un niveau plus abouti utilisé pour réaliser une sous fonction du cindynamètre : la "bande de roulement virtuelle" qui permettra de prévenir le conducteur s'il sort involontairement (par lassitude ou par inattention) de sa file (virtuelle dans le cas de l'absence de marquages au sol ou réelle dans le cas contraire).

De tels systèmes se basent généralement sur le principe de la détection de lignes dans l'image et sur leur rétroprojection (toujours en utilisant la connaissance des paramètres de la caméra obtenus par calibration) dans la scène 3D pour faciliter leur interprétation.



Figure 43 : Exemple de détection de marquage au sol à partir d'une image vidéo

Le principal problème inhérent à ce système optique est la nécessité d'être capable d'extraire de l'image toutes les informations nécessaires. Ceci ne pourra être fait qu'à l'aide d'algorithmes qui requièrent souvent beaucoup de puissance de calcul, ce qui pourrait être problématique pour l'exécution en temps réel de tous les sous-systèmes du cindynamètre avec un ordinateur courant. Il pourrait s'avérer nécessaire d'utiliser une ou plusieurs machines très puissantes pour obtenir de bons résultats. On nuancera néanmoins ce problème car la puissance des ordinateurs est en constante augmentation alors que leur prix baisse, des machines courantes suffisamment puissantes pour réaliser ces tâches seront donc probablement disponibles dans quelques mois. Ainsi, le constructeur Opel propose-t-il depuis la fin 2008 un système de reconnaissances des panneaux de limitations de vitesse sur l'un de ses modèles.

IV - 3. 3. 3. Synthèse

Nous constatons l'intérêt que présente l'utilisation conjointe d'un système de navigation et d'un système optique pour réaliser une détection fiable de l'environnement routier (forme de la route, marquage au sol, signalisation, ...). Les bases de données géographiques permettent en effet de disposer d'informations de dangerosité de la route qui ne sont pas perceptibles visuellement, ainsi que d'informations sur la route quelques centaines de mètres voir quelques kilomètres à l'avance, bien au-delà de la portée d'une caméra ou de l'œil humain. Le système de vision permet quant à lui, de détecter des modifications apportées à la route depuis la dernière mise à jour des bases de données, permettant ainsi de prendre en compte les zones de travaux, qui sont souvent des zones dangereuses.

IV - 3. 4. Capteurs météorologiques :

Le cindynamètre doit pouvoir évaluer le risque pris sur la route par tout temps. Pour ce faire, il doit disposer de capteurs capables de le renseigner assez régulièrement sur les conditions météorologiques (pluie, givre, neige, brouillard, humidité de la chaussée, ...). En effet, le niveau de danger ne sera pas le même suivant que le conducteur roule sur autoroute à 110 km/h par temps clair ou dans le brouillard. C'est pourquoi le cindynamètre doit être doté de capteurs météorologiques efficaces.

Ce type de capteurs a été développé pour des applications aéronautiques, de surveillance routière et des applications météorologiques à partir de bases fixes. Néanmoins certains de ces capteurs ont été ou sont actuellement adaptés pour des applications embarquées et pourraient ainsi constituer des systèmes intéressants pour la réalisation complète du cindynamètre.

IV - 3. 4. 1. Capteurs de pluie :

Il s'agit ici de l'un des capteurs les plus en vogue actuellement puisqu'il permet de détecter la présence de pluie sur le pare-brise et d'activer les essuie-glaces à une fréquence adaptée aux précipitations. Un tel capteur est très intéressant pour le cindynamètre, puisqu'il détecte la présence de la pluie et peut mesurer l'intensité des précipitations, pour réduire les vitesses maximales autorisées, prendre en compte une gêne du conducteur due à la baisse de visibilité et éventuellement modifier le type d'algorithme utilisé pour la détection de l'environnement.

Ces capteurs fonctionnent par réflexion d'ondes lumineuses (émises par le capteur) sur le pare-brise. Lorsque le pare-brise est mouillé, son coefficient de réflexion est modifié en fonction de la surface mouillée sur le pare-brise. En effet, lorsque l'eau entre en contact avec le pare-brise, une partie de la lumière est diffractée vers l'extérieur, le système mesure alors la chute d'intensité lumineuse reçue. Le système augmente alors la vitesse des essuie-glaces en fonction du besoin. En échantillonnant très rapidement (moins d'un dixième de seconde) ces mesures, le système peut ainsi permettre de détecter très rapidement une gerbe d'eau envoyée par un véhicule voisin et ainsi réduire le temps "d'aveuglement" du conducteur.

Une deuxième méthode pour détecter la pluie consiste à utiliser un capteur capacitif sous une plaque de verre et à mesurer le changement de charge induit par la chute de gouttes de pluie sur cette plaque de verre. Ce système permet lui aussi d'obtenir une détection relativement bonne de la pluie. Il n'est malgré tout que très peu utilisé dans les applications automobiles et reste donc confiné aux stations météorologiques fixes.

De tels capteurs apparaissent extrêmement avantageux dans la mesure où ils permettent de détecter des conditions souvent dangereuses, ou du moins potentiellement, tout en étant devenus très courants, facilement implantables, peu chers et très peu encombrants. Leur utilisation dans le cindynamètre semble donc particulièrement conseillée.

IV - 3. 4. 2. Capteurs de visibilité :

La visibilité est un des aspects majeurs pour l'amélioration de la sécurité routière. En effet, le taux d'accidents graves augmente de façon très significative lorsque les conditions de visibilité sont réduites car les conducteurs n'adaptent pas tous leur vitesse à la distance de visibilité. Par condition de brouillard ou de fortes pluies, la distance de visibilité, définie comme la distance au-delà de laquelle les obstacles ne sont plus détectés par le conducteur, peut chuter à quelques mètres seulement. Dans de telles conditions, le conducteur n'a que très peu de temps pour réagir si le véhicule le précédant freine, il faut donc que sa vitesse soit faible à ce moment. La présence d'une caméra thermique pour la détection d'obstacles en conditions de mauvaise visibilité pourrait permettre de donner au conducteur une meilleure visibilité puisqu'elle n'est pas gênée par la pluie. Néanmoins, il faut considérer le fait que tous les véhicules ne sont pas équipés de tels systèmes et que l'on n'a pas intérêt à inciter le conducteur à rouler plus vite dans de telles conditions. En effet, une caméra thermique fonctionne très bien pour des obstacles chauds mais elle ne permet pas de distinguer précisément les bords de la route, la glissière de sécurité ou des obstacles fixes et froids. La caméra thermique pourra donc être exploitée pour essayer de repérer des obstacles beaucoup plus tôt mais sa sortie ne devra pas être représentée au conducteur.

Le cindynamètre doit donc être capable de détecter la présence d'un masque à la visibilité, de mesurer la distance de visibilité et d'inciter le conducteur à réduire sa vitesse, tout en gardant au maximum ses facultés de détection des obstacles et des dangers proches.

Il n'existe que très peu de capteurs capables de mesurer la distance de visibilité et la plupart sont utilisés pour la gestion des files d'attente des avions sur les aéroports. En effet, il est essentiel pour un aéroport de disposer d'une mesure correcte de la visibilité au sol afin d'informer les pilotes de celle-ci et de planifier les vols en conséquence. De plus, la législation impose une fermeture des aéroports pour raisons de sécurité lorsque la visibilité devient trop mauvaise¹². Ces capteurs sont aussi utilisés par les stations météorologiques automatiques près des grands axes routiers ou ferroviaires pour avertir à l'avance les usagers ou les cheminots de la présence de zones de brouillard. La plupart des capteurs de visibilité sont donc utilisés sur des stations fixes, leur utilisation en mode embarqué risque donc de poser certains problèmes.

Ces capteurs, de type dit "forward-scattering", reposent sur le principe de la mesure de la dispersion d'un faisceau laser par les molécules d'eau contenu dans l'air. Cette dispersion est d'autant plus forte que le nombre de molécules d'eau est grand, ainsi une très grande partie du faisceau incident sera dispersée dans un brouillard très dense alors que le faisceau ne sera pratiquement pas dispersé par temps clair. Le principe de fonctionnement de ce capteur est donné dans la Figure 44.

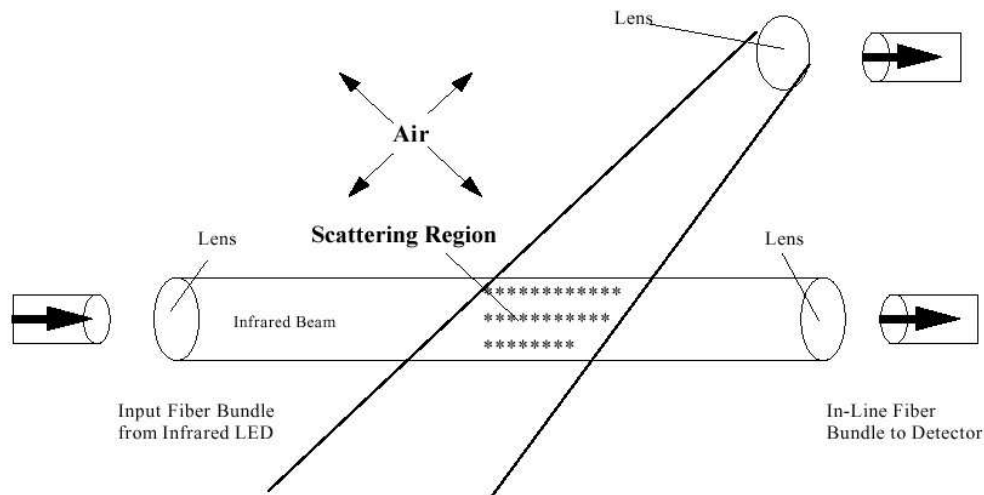


Figure 44 : Schéma de principe d'un capteur de visibilité de type "forward-scattering"

¹² Sauf si les appareils sont équipés de systèmes appropriés ; l'approche et l'atterrissage sont alors automatiques

Ce type de capteur a l'avantage d'être assez précis, d'avoir une très grande plage de détection (la visibilité peut-être mesurée jusqu'à 200km, bien que cela nous soit inutile) et d'être commercialisé. Le principe de fonctionnement est donc très connu et très bien maîtrisé, ce qui nous permettrait de réduire sensiblement les coûts d'installation, de mise au point et de calibrage de ce capteur. Malheureusement, d'autres contraintes rendent son utilisation quasiment impossible pour une application embarquée. Tout d'abord, ces systèmes sont assez encombrants puisqu'ils occupent un espace de 0.4*0.7*0.2 mètres. Deuxièmement, ces capteurs sont prévus pour donner une mesure locale de la visibilité et ils ne permettent donc pas de déterminer si l'on arrive sur une zone de très faible visibilité. De plus, ils ont été conçus pour être utilisés sur des bases fixes, leur utilisation sur un véhicule roulant pourrait poser des problèmes dus aux vibrations et au mouvement de l'air. Enfin, ces capteurs étant destinés à un secteur d'activité très restreint, ils sont extrêmement chers. Ces capteurs pourraient néanmoins être utilisés dans le cindynamètre s'il était prouvé que ni les vibrations ni les mouvements de l'air induits par le déplacement du véhicule ne gênent la mesure.

IV - 3. 4. 3. Caméras :

Nous retrouvons ici encore ces capteurs dont le nombre d'applications possibles est très grand. Dans le cadre des capteurs météorologiques, une caméra pourrait être utilisée pour déterminer la présence de mauvaises conditions climatiques grâce à l'utilisation d'algorithmes appropriés. Ainsi, des chercheurs allemands ont développé une méthode à base d'ondelettes pour déterminer la distance de visibilité à partir des images fournies par une caméra de surveillance [Busch 98]. Les Figure 45 et Figure 46 donnent une idée des résultats obtenus, les traits horizontaux de la Figure 46 indiquant les limites de visibilité. Dans le cadre du contrat européen CARSENSE, le LIVIC a développé un algorithme de modélisation du brouillard par traitement d'images et d'estimation de la visibilité [Hautière 03].



Figure 45 : Images obtenues par temps clair et par brouillard

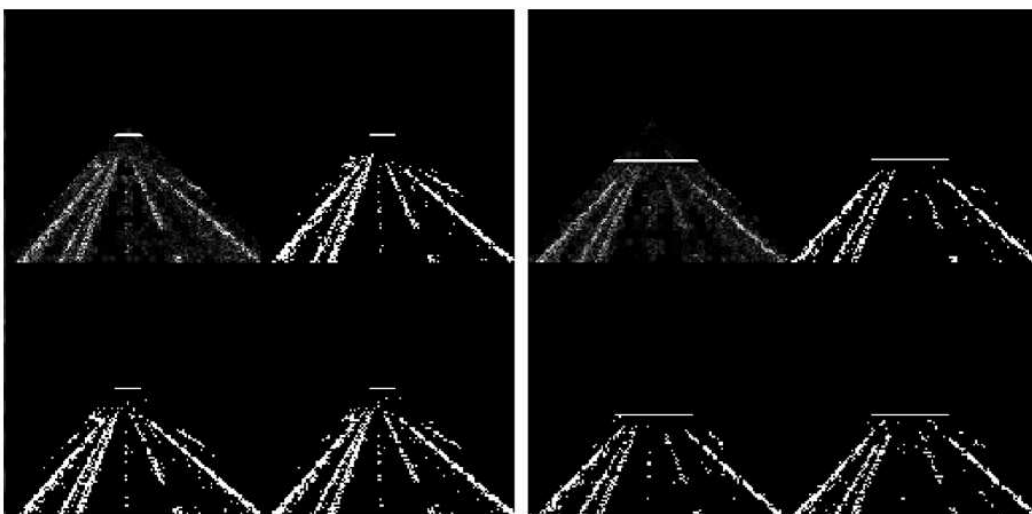


Figure 46 : Images après traitement par ondelettes

On voit sur les deux figures précédentes que l'utilisation de la vidéo pour la détermination de la distance de visibilité est faisable dans le cadre de la vidéosurveillance. L'adaptation d'un tel système pourrait se faire assez bien sur un système embarqué même si elle nécessite quelques évolutions des algorithmes utilisés.

L'utilisation de la vidéo apporte de plus l'avantage de ne pas nécessiter de capteurs supplémentaires ce qui réduit les coûts du système. Une caméra pourra aussi détecter la présence de pluie sur le pare-brise et pourra donc servir de capteur de conditions météorologiques même si ses performances sont forcément moins bonnes qu'un capteur spécialisé, tant en termes de quantification des conditions climatiques, qu'en termes de rapidité.

IV - 3. 5. Evaluation de l'état de surface de la route

Les capteurs météorologiques devraient permettre au cindynamètre de détecter la présence de mauvaises conditions climatiques perturbant la conduite du fait d'une réduction de la visibilité ou de l'humidification de la route pendant une averse. Néanmoins, sans système d'évaluation de l'état de surface de la chaussée, le cindynamètre n'a aucun moyen de déterminer le coefficient d'adhérence des pneus par rapport à la chaussée, or celui-ci est essentiel pour déterminer le risque encouru. Il nous faut donc pouvoir détecter la présence de "contaminants" (eau, neige, glace, huile, ...) sur la route et en déduire son adhérence minimum sur le trajet du véhicule. Il existe de nombreux capteurs fixes (généralement placés dans le bitume) qui permettent de détecter la présence de ces "contaminants" mais il y a beaucoup moins de capteurs embarqués pour évaluer l'état de surface de la route. De nombreux constructeurs, tels que BMW par exemple, essaient actuellement de combler ce retard et développent des systèmes d'évaluation du coefficient d'adhérence du véhicule à la route.

La technique la plus courante dans les détecteurs embarqués repose sur les différences de propriétés physiques entre l'eau et la glace, que l'on retrouve dans les spectres d'absorption dans l'infrarouge, comme le montre les Figure 47 et Figure 48.

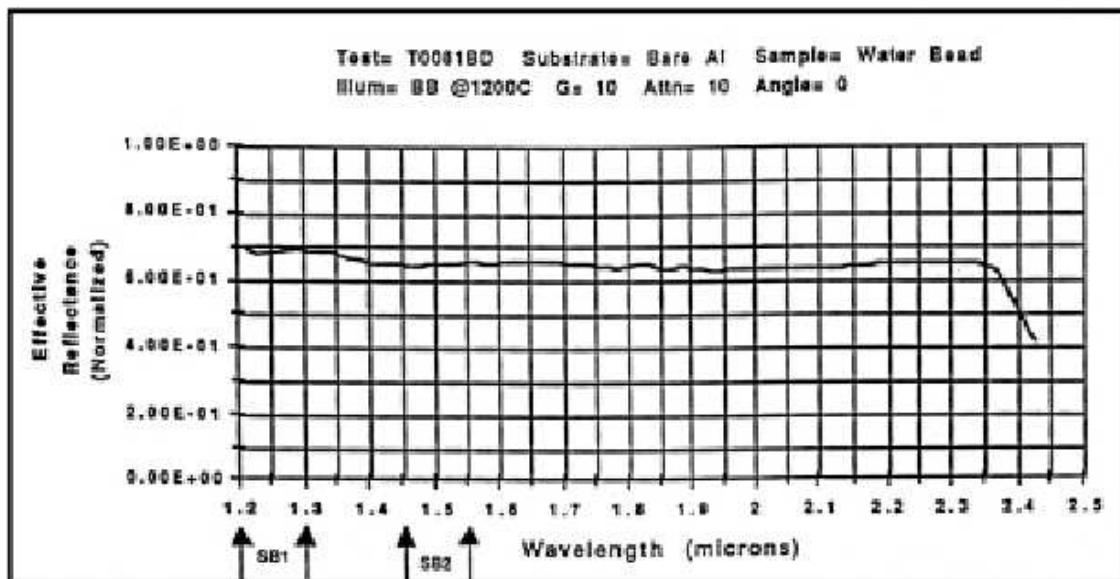


Figure 47 : Courbe d'absorption de l'eau dans le proche IR

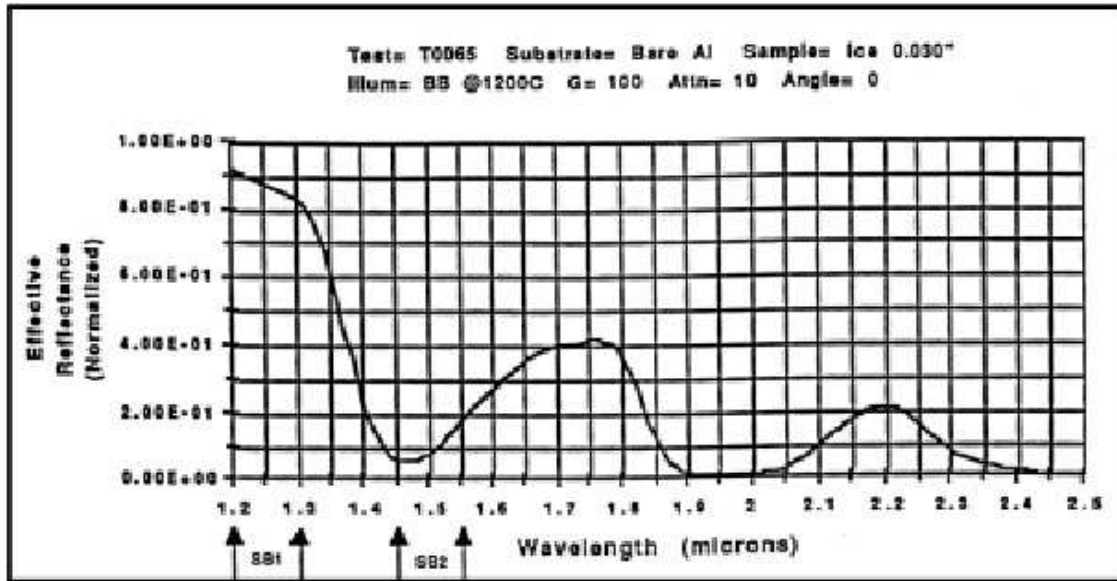
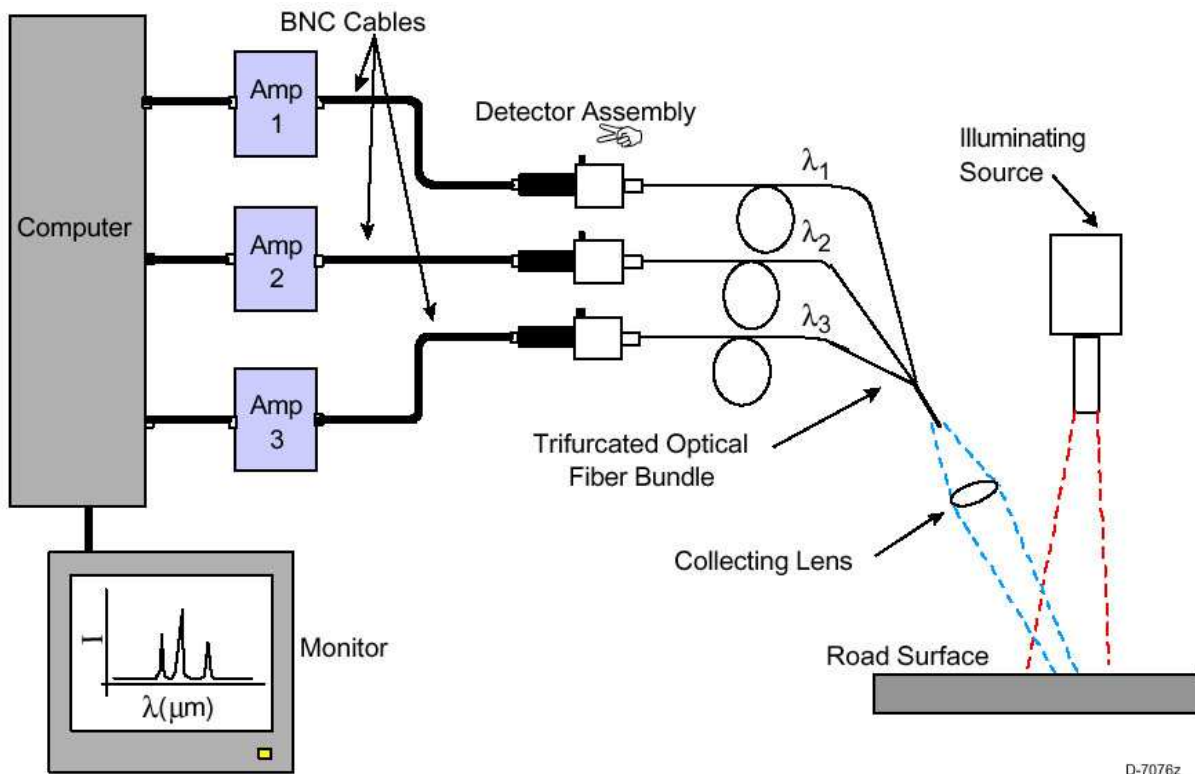


Figure 48 : Courbe d'absorption de la glace dans le proche IR

IV - 3. 5. 1. Capteurs infrarouges actifs :

Il s'agit ici du type de capteurs le plus étudié actuellement pour une application automobile embarquée car ils sont très petits et peu chers. De tels capteurs émettent un faisceau infrarouge et mesurent la puissance du flux réfléchi sur certaines longueurs d'ondes caractéristiques des "polluants" (voir Figure 49).



D-7076z

Figure 49 : Schéma de principe d'un capteur infrarouge actif

Ce système permet de caractériser le "polluant" majoritaire et même de déterminer relativement précisément le taux de chaque polluant sur le bitume. Malheureusement, ce type de capteurs doit être protégé des pollutions extérieures et n'offre une distance de détection que de quelques dizaines de centimètres. Il ne pourra donc être utilisé qu'à l'avant du véhicule pour déterminer l'état local de la route au niveau du véhicule mais ne permettra pas de prévenir le conducteur de l'arrivée d'une zone humide ou verglacée. Ce type de capteur est néanmoins utilisé par BMW pour améliorer les systèmes de contrôles de freinage et d'antipatinage en les informant sur l'adhérence de la route (Figure 50).

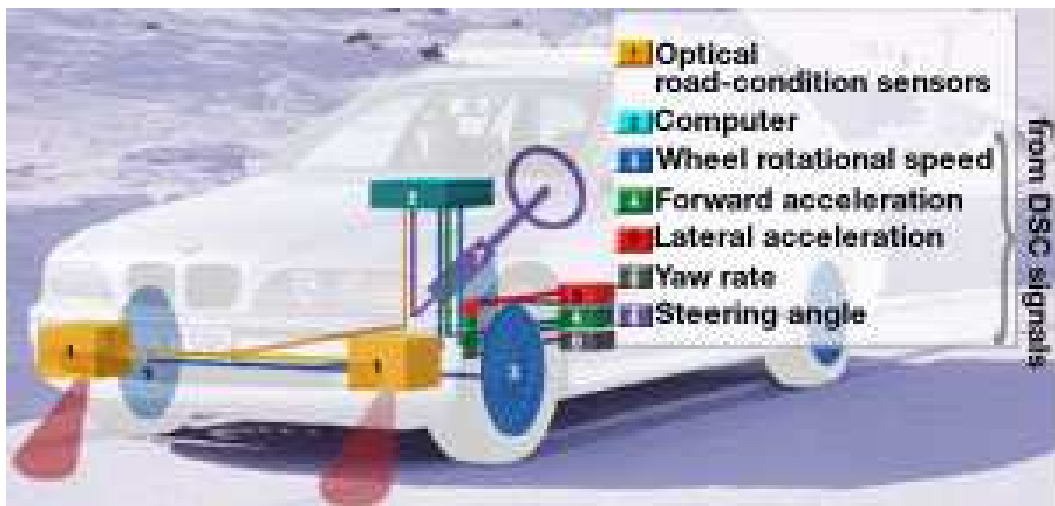


Figure 50 : Exemple d'utilisation de capteurs IR actifs par BMW

IV - 3. 5. 2. Capteurs infrarouges passifs :

Il s'agit ici d'utiliser une caméra infrarouge passive capable de détecter la présence d'eau, de neige et de glace sur une route sans utiliser de source lumineuse. Un tel détecteur est actuellement en cours de finalisation au Canada dans une "spin-off" de la société M.D Robotics. La Figure 51 montre les résultats obtenus avec une première version de ce capteur, les taches de neige sont bien détectées.

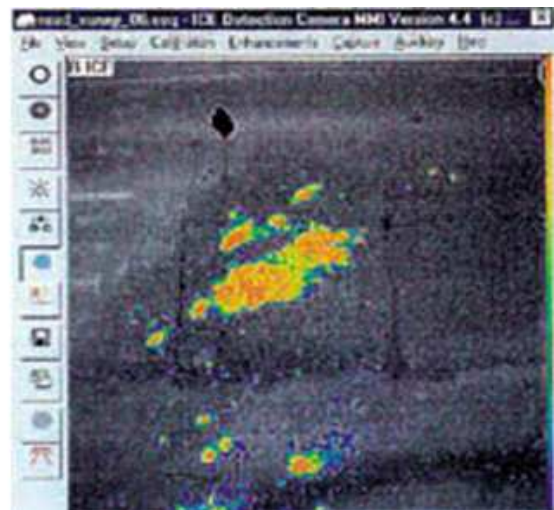


Figure 51 : Exemple de détection de verglas par une caméra infrarouge passive

Un tel capteur apporte plusieurs avantages par rapport à une solution active. Tout d'abord il peut être utilisé à très grande distance comme l'a prouvé une expérience menée dans le cadre du projet américain ITS-IDEA - projet n° 34 : Remote Passive Road Ice Sensor System (RPRISS) – qui a permis de détecter une tâche de neige de 3 mètres de diamètre à 700 mètres de distance à partir d'un mât de 20 mètres de haut. Appliqué sur un véhicule un tel système pourrait détecter des zones verglacées à 50 mètres de distance laissant ainsi largement le temps au conducteur de ralentir ou même d'éviter cette plaque de verglas. De plus, il est beaucoup moins sensible aux perturbations induites par un éclairage extérieur et son placement en hauteur sur le véhicule l'expose beaucoup moins aux diverses pollutions (éclaboussures, poussières, ...) que l'on rencontre avec un capteur actif monté sur le châssis du véhicule. Ce placement pose néanmoins un problème d'intégration dans le véhicule du point de vue esthétique et pratique puisqu'il faut réaliser une coque protectrice transparente aux infrarouges sur le toit du véhicule.

Ce type de capteurs pose néanmoins certains problèmes car ils demandent des traitements beaucoup plus lourds (même si ceux-ci peuvent être réalisés par un DSP embarqué dans la caméra) et comme nous l'avons vu précédemment avec les caméras thermiques, le capteur en lui-même est beaucoup plus cher. De plus, la détection se fait grâce à l'éclairage naturel externe ce qui pourrait poser des problèmes dans des conditions de mauvaise visibilité ou de nuit.

IV - 3. 5. 3. Autres approches :

Les deux méthodes que nous avons exposées précédemment permettent par des mesures physiques directes de détecter la présence de "polluants" sur la route et d'en déduire approximativement le coefficient d'adhérence de la route. Ce calcul se fait grâce à des tables donnant le coefficient d'adhérence moyen selon les "polluants" présents sur la route, mais il ne prend pas en compte le type de revêtement considéré. En effet, chaque type de revêtement a un comportement différent selon les conditions climatiques. De même, le coefficient d'adhérence sera très différent selon que l'on le mesure sur le goudron, sur du béton ou sur des pavés par exemple. Une méthode pour se départir de ce problème consisterait à calculer le coefficient d'adhérence non pas à l'aide de tables d'adhérence moyennes mais en se basant sur le pire cas. Ceci reviendrait néanmoins, à alerter le conducteur beaucoup trop souvent et risquerait donc de détourner son attention.

Pour pallier ces problèmes plusieurs approches sont actuellement en cours de développement qui consistent à mesurer le coefficient d'adhérence local de la route grâce à divers types de mesures.

Une première approche vise à "écouter" le bruit du contact pneu sol et à en déduire le coefficient d'adhérence. Cette approche semble relativement logique si l'on pense aux différents bruits que fait un véhicule selon qu'il roule sur un revêtement lisse et sec, ou très granuleux et mouillé. Elle est néanmoins très difficilement applicable dans le cadre du cindynamètre car elle nécessiterait une calibration pour chaque type de pneu et de sol et poserait de nombreux problèmes dus à la modification du bruit avec l'usure des pneus ou simplement à l'apparition d'échos dans les tunnels ou près des murs. La mesure du bruit de contact pneu sol est actuellement utilisée principalement pour des applications d'amélioration du confort des usagers et des riverains, son application à la mesure du coefficient de frottement restant soumise à beaucoup trop de contraintes.

Une deuxième approche actuellement développée chez certains constructeurs vise à déterminer le coefficient d'adhérence de la route grâce à des caméras ultrarapides. Il s'agit alors de pouvoir mesurer précisément la taille des aspérités du goudron et d'en déduire l'adhérence qui en découle. Cette application du traitement d'images n'est encore qu'à l'état de projet de recherches et pose donc de nombreux problèmes qui restent à résoudre (traitement à utiliser, protection contre les pollutions, ...).

Enfin, l'approche la plus courante consiste à interpréter les paramètres dynamiques du véhicule ainsi que la vitesse de rotation de ses roues pour en déduire le taux de glissement de chaque roue. Ce procédé est utilisé dans les systèmes actuels d'antipatinage et de contrôle de stabilité.

IV - 3. 6. Synthèse :

Il existe comme nous l'avons vu une très grande variété de capteurs visant à détecter les éléments de l'environnement du véhicule. Cette profusion s'explique aussi bien par la nécessité de disposer de ces données pour aider le conducteur que par la variabilité de ces données. On constate en effet qu'alors qu'il n'existe que quelques types de capteurs dédiés au véhicule ou au conducteur, il existe de très nombreux capteurs pour détecter le moindre type d'obstacles dans l'environnement par exemple. La Figure 52, reprend ainsi les différents capteurs environnementaux présentés ainsi que certains des prétraitements qui leur sont associés.

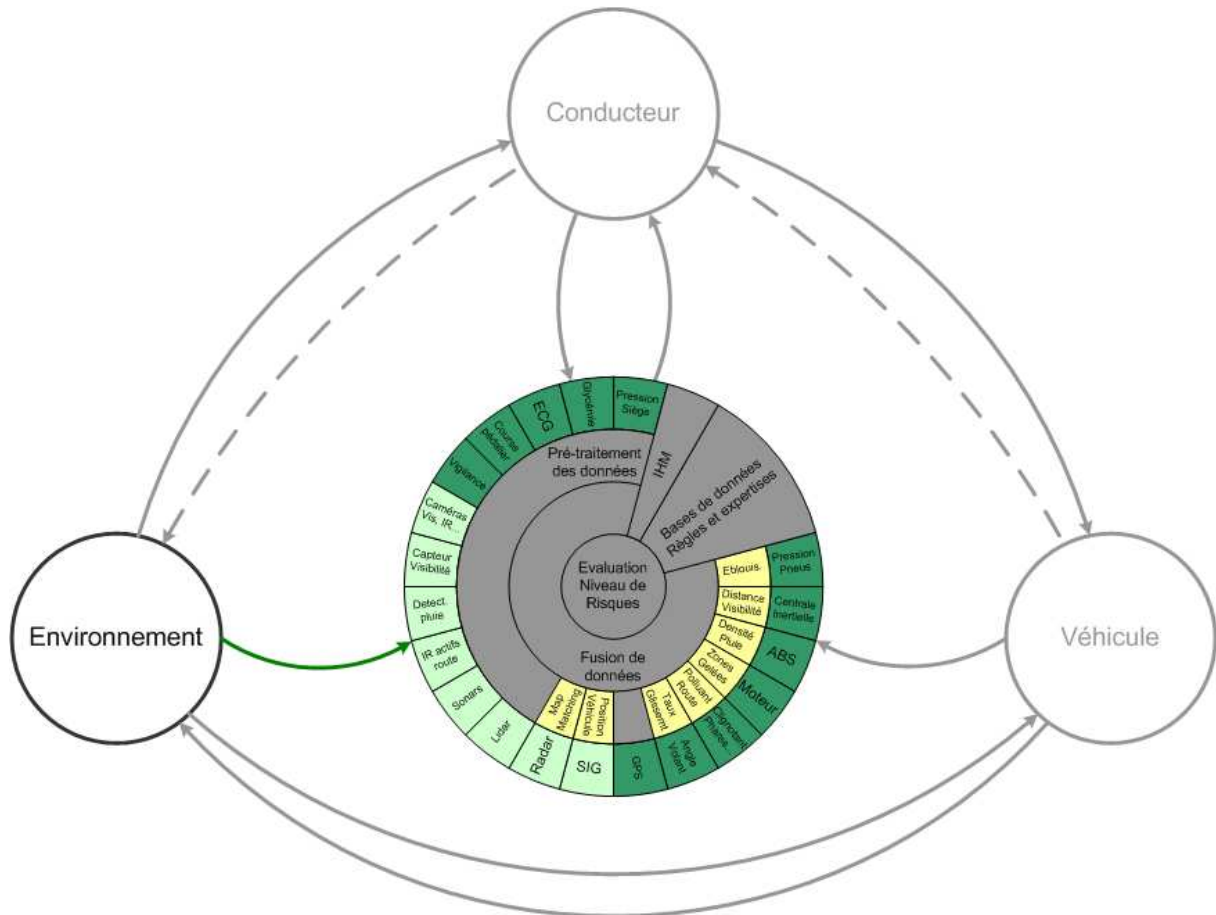


Figure 52 : Récapitulatif des capteurs environnementaux

IV - 4. Communications avec l'environnement

Il ne s'agit plus ici de capteurs à proprement parler mais plutôt de techniques permettant d'échanger et de recevoir des informations entre véhicules ou entre le véhicule et son environnement. Ces communications entre les différents acteurs de la conduite (véhicules et infrastructure principalement) se font de façon sans-fil par le biais de protocoles type Wifi. Les protocoles de communications sans fil utilisés font actuellement l'objet de nombreuses études de part le monde. Le choix du protocole doit en effet se faire en fonction de la portée désirée, du type de communication (un émetteur pour de nombreux récepteurs, liaison point à point, ...) et de sa robustesse aux perturbations dues à l'environnement (autres sources électromagnétiques, problèmes de trajets multiples dus aux réflexions en ville, déplacement du véhicule...). Nous n'entrerons évidemment pas dans ces détails qui constituent un domaine de recherche à eux seuls mais nous intéresserons plutôt aux deux grands types de communications possibles avec l'environnement : communication inter véhicules et communication avec l'infrastructure.

IV - 4. 1. Communications avec l'infrastructure

Dans ce mode, l'infrastructure communique avec le véhicule de façon à lui transmettre des informations concernant cette infrastructure. L'exemple le plus simple consiste à imaginer un panneau de limitation de vitesse qui émettrait en parallèle la valeur de sa limitation au véhicule. De la même façon, la transmission de l'état d'un feu de signalisation aux véhicules remplit le même rôle que ce feu sans nécessiter la détection de l'état du feu (qui nécessite aussi sa localisation) par le véhicule.

Un deuxième type d'information transmise par l'infrastructure peut être des informations de danger en amont d'une route. Les autoroutes françaises transmettent ainsi, par le biais des radios autoroutières, des informations sur les travaux, les bouchons, les accidents ou la présence de danger (animal égaré, objet sur la chaussée, ...). Ces informations sont reçues par le conducteur qui écoute la radio mais aussi par les systèmes de navigation au travers d'informations spécifiques codées dans le flux radio.

Enfin, un troisième type d'information transmise par l'infrastructure est spécifique aux intersections. Il permet à l'intersection de détecter et localiser tous les véhicules entrant dans l'intersection et d'en avertir les usagers. Cette détection peut se faire de façon active (par le biais de télémètres tels que présentés précédemment, de caméras surveillant les accès à l'intersection ou de boucles magnétiques dans le sol qui permettent de détecter de façon simple le passage de véhicule) ou passive en supposant que chaque véhicule transmette sa position à l'intersection. Toutes les informations recueillies sont ensuite fusionnées et transmises ce qui permet de connaître la position des différents mobiles en approche de l'intersection même s'ils sont cachés (par un immeuble par exemple).

IV - 4. 2. Communications inter véhiculaires

Ce second mode de communication se fait entre véhicules, chacun transmettant autour de lui de nombreuses informations le concernant. Ce mode de communication vise à simplifier la détection des autres véhicules mais aussi à réduire le temps de réaction sur un freinage par exemple. En effet, un véhicule qui transmet sa position autour de lui permet aux autres véhicules de savoir où il se trouve par rapport à eux et ainsi anticiper un freinage dans une courbe sans visibilité par exemple. De la même façon la transmission de l'information de freinage permet aux véhicules suivants d'anticiper un danger ayant provoqué un freinage.

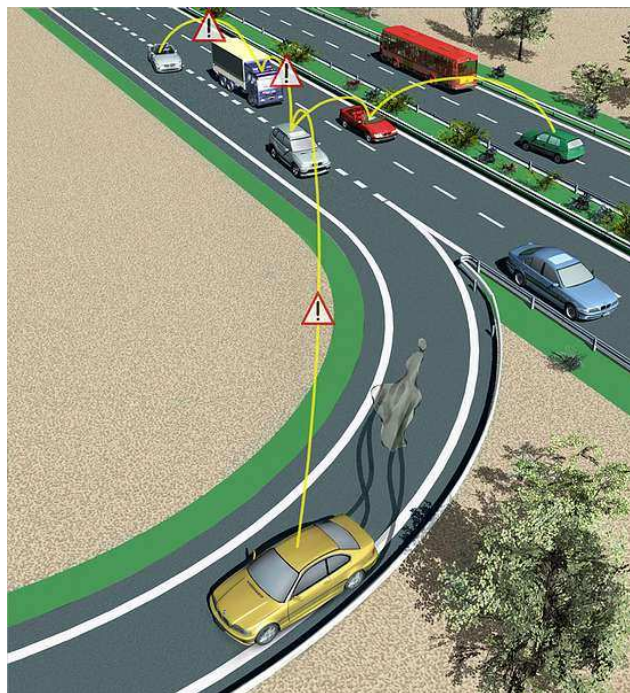


Figure 53 : Exemple d'utilisation de la communication inter véhiculaires pour éviter les sur-accidents (d'après [CAR2CAR])

Ce type de communication commence à être mis en place actuellement comme système de transmission d'alertes entre véhicules. Un véhicule accidenté transmet ainsi sa position aux véhicules autour de lui afin que ceux-ci puissent prévenir leur conducteur de l'imminence d'un danger (le véhicule accidenté pouvant être dans un virage par exemple comme le montre la Figure 53). Ce même système permet de compléter avantageusement les warnings en queue d'embouteillage.

IV - 4. 3. Synthèse

D'une certaine manière ces méthodes de communication s'apparentent à un capteur environnemental omnipotent puisque capable de fournir des informations sur les autres usagers de la route avant même que ceux-ci ne soit visibles. Ces communications permettraient ainsi au cindynamètre de percevoir un environnement beaucoup plus vaste que celui détectable par ces propres capteurs tout en ne requérant qu'une fraction des ressources nécessaires autrement.

Néanmoins, ces communications seules ne sauraient constituer la solution absolue au problème de la détection de l'environnement. En effet, la communication inter véhiculaire ne fonctionne que si tous les véhicules en sont équipés. La communication véhicule-infrastructure quant à elle nécessiterait l'équipement de l'intégralité du réseau routier, or celui-ci compte plusieurs millions de kilomètres de route pour la France uniquement.

Il apparaît donc que ces communications entre véhicule et environnement offrent un complément d'information aux capteurs environnementaux mais ne sauraient s'y substituer (à moyen terme du moins) entièrement. L'utilisation de ces communications n'apparaît donc qu'optionnel pour la réalisation du cindynamètre.

IV - 5. Conclusions :

Nous avons présenté ici de nombreux capteurs qui permettent de détecter et de mesurer les différents paramètres nécessaires à la bonne compréhension de la situation de conduite par le cindynamètre. Ces paramètres peuvent se classer en trois catégories distinctes :

- Les paramètres liés au conducteur, qui nous permettront d'évaluer son comportement et sa vigilance et ainsi de nous faire une idée de ses capacités de réaction à une situation dangereuse, de même que son aptitude à provoquer de telles situations.
- Les paramètres liés au véhicule qui nous permettent d'évaluer la position et la dynamique du véhicule vis-à-vis de son environnement. Ces paramètres pourront aussi nous permettre d'avertir le conducteur en cas de problème mécanique rendant la conduite dangereuse.
- Les paramètres liés à l'environnement, dont on essaie de tirer le maximum d'information de façon à pouvoir comprendre au mieux la configuration extérieure pour en déduire les sources potentielles de danger pour le véhicule et ses passagers.

Nous avons aussi vu apparaître un nouveau mode de perception de l'environnement par le biais de la communication entre véhicules et entre véhicule et environnement. Ce mode de perception prometteur apparaît comme un complément d'information afin d'élargir le champ de perception du cindynamètre.

Nous avons vu au travers de cette étude que plusieurs techniques peuvent être utilisées pour évaluer un même paramètre. Le choix des capteurs du cindynamètre se fera donc dans un premier temps sur la base d'un compromis coût / efficacité. Par la suite, ce compromis pourra être revu afin d'avoir une redondance des données concernant certains paramètres critiques.

Concernant la réalisation du système, les capteurs que nous venons d'étudier fournissent les informations nécessaires au cindynamètre pour compléter le système tripartite exposé Figure 23. Il est nécessaire de traiter ces informations et les exploiter pour en tirer un maximum d'informations sur la situation de conduite actuelle. Nous allons donc maintenant nous intéresser aux modules de fusion des données recueillies par ces capteurs. Après quoi nous nous intéresserons à la représentation du niveau de danger, des risques potentiels et éventuellement des conseils pour réduire le risque d'accident ainsi qu'aux problèmes posés par cette représentation.

CHAPITRE V – COMPREHENSION DE LA SITUATION DE CONDUITE

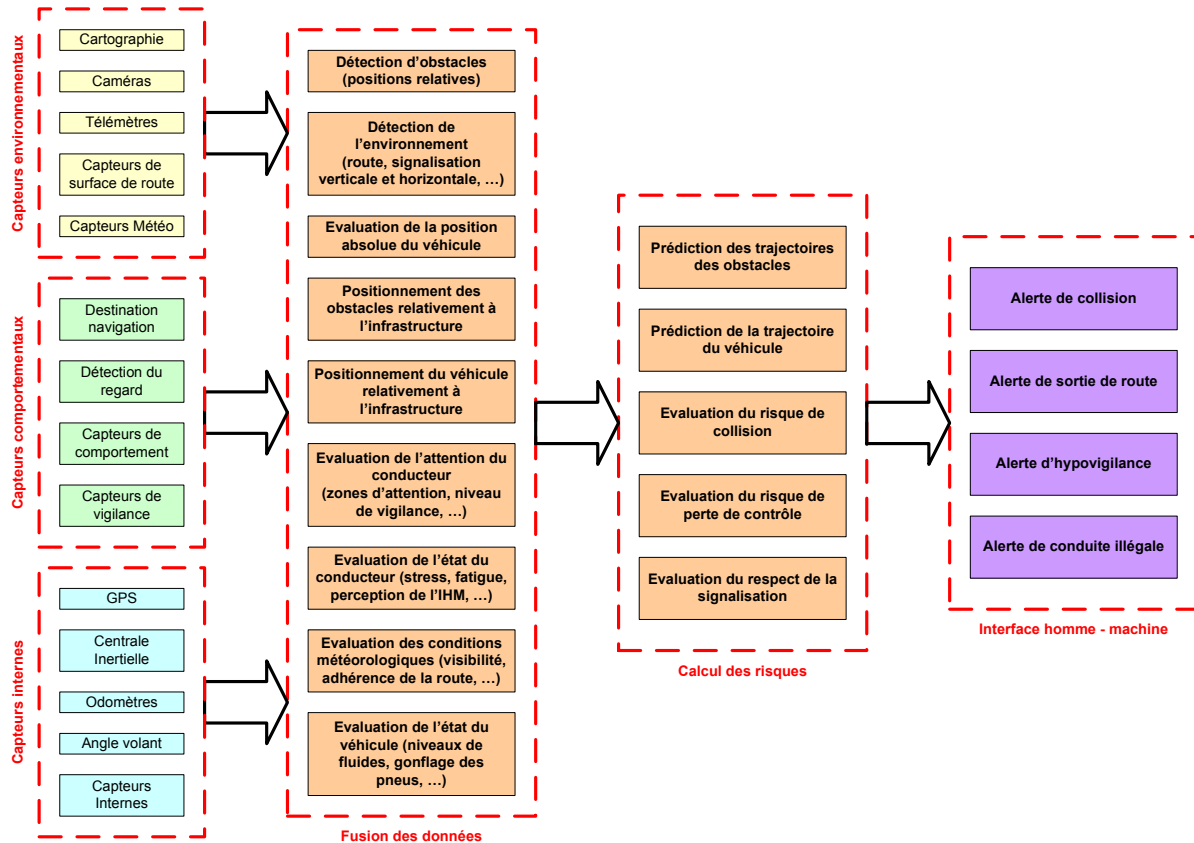


Figure 54 : Schéma générique de l'implémentation du cindynomètre

La réalisation du cindynomètre pour l'automobile passe, comme nous l'avons vu, par la création d'un ensemble d'algorithmes de traitement et de fusion des données recueillies par les capteurs installés. Le schéma d'architecture (rappelé dans la Figure 54) donnait une vue d'ensemble du cindynomètre. Dans cette architecture nous proposons les modules de traitement permettant la réalisation des fonctions suivantes nécessaires au cindynomètre pour la conduite automobile :

- Détection d'obstacles fixes et mobiles par rapport au véhicule équipé du cindynomètre
- Détection de la forme de la route, des marquages au sol et de la signalisation
- Evaluation de la position absolue du véhicule équipé afin de recalculer sa position ainsi que celle des obstacles détectés par rapport à l'infrastructure routière
- Evaluation de l'attention du conducteur et de sa vigilance
- Evaluation des conditions météorologiques et de la visibilité pour le conducteur

Il s'agit là des cinq principales tâches de traitement des données pour le cindynamètre. En effet, à partir de leurs résultats, il est possible de prédire les trajectoires des obstacles ainsi que celle du véhicule équipé et donc d'en inférer les risques de collisions. De même, la prédiction de la trajectoire du véhicule comparée à la forme de la route permet d'évaluer les risques de sortie de route. Nous verrons les possibilités ainsi offertes dans le chapitre suivant et détaillons ici les implémentations proposées pour les modules de traitement de données ainsi que les résultats obtenus pour les modules déjà réalisés¹³.

Le lecteur aura noté le grand nombre de capteurs proposés pour la réalisation des fonctions d'acquisition du cindynamètre et pourrait se demander avec raison la faisabilité technique et commerciale d'un tel système. Il est en effet actuellement inconcevable d'utiliser autant de capteurs dans un véhicule de série mais il faut néanmoins garder à l'esprit l'évolution très rapide des technologies et la réduction des coûts qui en découlent. Ces deux paramètres pourraient permettre à terme l'implantation de tous ces capteurs au sein d'un même véhicule de série. Enfin, afin d'accélérer ce processus, nous avons essayé de minimiser au maximum l'utilisation de nouveaux capteurs en réutilisant les capteurs déjà présents de série (capteurs de pluie, odomètres, information circulant sur le bus CAN, caméra de recul, ...) et en ne rajoutant que les capteurs essentiels dont les données ne peuvent être obtenues autrement.

V - 1. Evaluation des conditions météorologiques

Les conditions météorologiques jouent un rôle primordial dans la complexité de la tâche de conduite. Elles peuvent en effet perturber à la fois :

- La visibilité de l'environnement. Les fortes pluies, les chutes de neige, le brouillard, les projections d'eau provenant d'autres véhicules ou l'éblouissement réduisent ainsi fortement la capacité du conducteur à percevoir son environnement à longue distance.
- L'adhérence de la surface de la route. Une route mouillée ou verglacée offre ainsi une adhérence beaucoup plus faible que la même route sèche. Le risque de perte de contrôle du véhicule se trouve ainsi fortement accru en conditions dégradées.
- Le comportement du conducteur en le soumettant à un stress plus important dû à la nécessité d'être plus attentif et plus prudent.

La conduite automobile par mauvaises conditions météorologiques ou de nuit est ainsi bien plus risquée dû fait de l'attention bien plus grande qu'elle demande au conducteur. Malgré cela, nous avons considéré l'évaluation des conditions climatiques comme secondaire dans la réalisation du cindynamètre. En effet, nous devons tout d'abord disposer d'une architecture fiable du cindynamètre en conditions "normales" – route sèche, bonne visibilité – avant de nous intéresser aux conditions plus délicates constituées par les conditions dégradées de conduite (nuit, fortes intempéries, brouillard...). Nous n'avons donc pas réalisé de module permettant cette évaluation des conditions météorologiques. Nous proposons cependant un schéma de réalisation en deux modules permettant :

- La détection des conditions climatiques difficiles (nuit, pluie, neige brouillard...) et l'évaluation de la distance de visibilité.
- L'évaluation des conditions d'adhérence locale (i.e. sur la partie de la route proche sur laquelle le véhicule s'apprête à rouler) de la route.

Ces fonctions peuvent être réalisées à l'aide de nombreux capteurs comme nous l'avons vu précédemment, nous présentons donc le schéma fonctionnel complet de réalisation de ces fonctions sans prendre en compte la disponibilité de ces capteurs (voir Figure 55).

¹³ Les résultats présentés sont issus des travaux réalisés au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris et proviennent soit de l'auteur du manuscrit soit d'autres chercheurs du centre auquel cas la paternité leur en est évidemment attribuée dans le texte.

V - 1. 1. Détection des conditions climatiques difficiles

Déterminer l'existence de conditions climatiques difficiles qui nuisent à la visibilité requiert de pouvoir détecter les intempéries, la présence d'importantes projections, le brouillard mais aussi la nuit. Ces détections très différentes peuvent se faire à l'aide de certains des capteurs présentés précédemment.

Ainsi, les capteurs de pluie, installés dans la plupart des véhicules récents, permettent-ils d'évaluer la densité de gouttes d'eau reçues sur le pare-brise, et donc une évaluation grossière de l'importance des intempéries en cours et des projections reçues. De même, le capteur d'illumination utilisé pour allumer automatiquement les phares d'un véhicule renseigne-t-il sur les conditions locales d'illumination. Evidemment, l'horloge du véhicule permet aussi de déterminer si le véhicule est ou non en conditions nocturnes.

Si ces capteurs permettent la réalisation de fonctions de confort (allumage automatique des feux et activation automatique des essuie-glaces) de façon relativement fiable, ils ne permettent cependant pas de fournir une information précise et fiable sur la présence de brouillard ou un éblouissement du conducteur (du fait de la position du soleil ou d'un usager venant en sens inverse par exemple) et ne permettent pas non plus de déterminer la distance de visibilité courante.

Pour pallier ces manques nous proposons l'utilisation d'une ou plusieurs caméras montées à l'avant du véhicule et permettant grâce aux traitements présentés précédemment (section IV - 3. 4. 3) de détecter la présence de brouillard et de projections limitant la distance de visibilité et de mesurer celle-ci. De plus la détection de l'éblouissement se fait de façon simple par le biais de la caméra ou d'un autre capteur optoélectronique détectant une sur-illumination. De tels systèmes sont actuellement utilisés pour réguler automatiquement la réflectivité des rétroviseurs afin de limiter la gêne causée par les usagers derrière le véhicule (de nombreux brevets existent sur ces systèmes tels [Eckardt 05] ou [Mickeler 04] par exemple).

Alternativement, l'utilisation d'un capteur de visibilité tel que présenté précédemment (section IV - 3. 4. 2) permettrait d'obtenir directement la mesure de la visibilité. Ces capteurs restent néanmoins encombrants et chers à l'heure actuelle et n'ont pas été conçu pour les applications automobiles.

A la sortie de ce module le cindynamètre doit donc être capable de déterminer quels types de conditions climatiques il rencontre ainsi que la distance de visibilité courante. Ces informations pourront alors aider à la compréhension du comportement du conducteur, à l'évaluation de la prise de risques courante (en évaluant si la vitesse du véhicule est compatible avec la distance de visibilité par exemple) mais aussi à l'évaluation des conditions locales d'adhérence (la présence de projections montrant que la route est mouillée par exemple).

V - 1. 2. Evaluation des conditions locales d'adhérence

Le coefficient d'adhérence de la surface de la route dépend de nombreux facteurs liés au type de bitume utilisé, à la structure microscopique et macroscopique du revêtement mais aussi à la présence éventuelle de polluants sur celui-ci. Ainsi, il apparaît évident qu'une route sèche procure plus d'adhérence que la même route couverte d'une couche de verglas ou d'une flaque d'huile par exemple.

La détection de ces polluants à l'avance permettrait donc au cindynamètre d'anticiper l'adhérence de la route et ainsi d'avertir le conducteur du danger représenté par une plaque de verglas ou une flaque de gazoil qu'il pourrait ne pas avoir vu. De plus, en évaluant le taux d'adhérence de la route, le cindynamètre peut déterminer les distances de sécurité nécessaire à une conduite sûre. Enfin, la détection de grandes zones couvertes d'eau peut permettre d'avertir le conducteur d'un risque fort d'aquaplaning.

Pour réaliser cette fonction nous proposons d'utiliser les résultats de l'évaluation des conditions climatiques (présentée précédemment) et de coupler ceux-ci aux données fournies par les capteurs spécifiques présentés précédemment (section IV - 3. 5).

L'utilisation d'une caméra thermique permettrait ainsi de repérer les zones de la route sur lesquelles du verglas pourrait être présent. De plus, les capteurs infrarouges actifs proposés par BMW (voir section IV - 3. 5. 1) permettent d'évaluer le taux (et éventuellement leur type) de polluants présents sur la route proche des roues du véhicule. En couplant cette information aux images de la route capturées précédemment (par une caméra infrarouge et/ou normale) il peut être possible d'apprendre l'apparence de la route en fonction du taux de polluants permettant ainsi d'étendre les possibilités de détection de ces capteurs. Cette solution demande cependant à être validée expérimentalement. De même, l'utilisation des données fournies par l'ESP ainsi que les données ABS et inertielles permet de déterminer si le véhicule subit une perte d'adhérence, il sera alors avantageux d'utiliser cette information couplée aux images de la route obtenue précédemment pour enrichir l'apprentissage automatique des conditions d'adhérence en fonction de l'apparence de la surface de la route.

En utilisant l'ensemble de ces données, il est possible d'établir une carte locale de l'adhérence de la route, de détecter ainsi des zones de faible adhérence qui pourraient provoquer une perte de contrôle du véhicule et d'en avertir ainsi le conducteur.

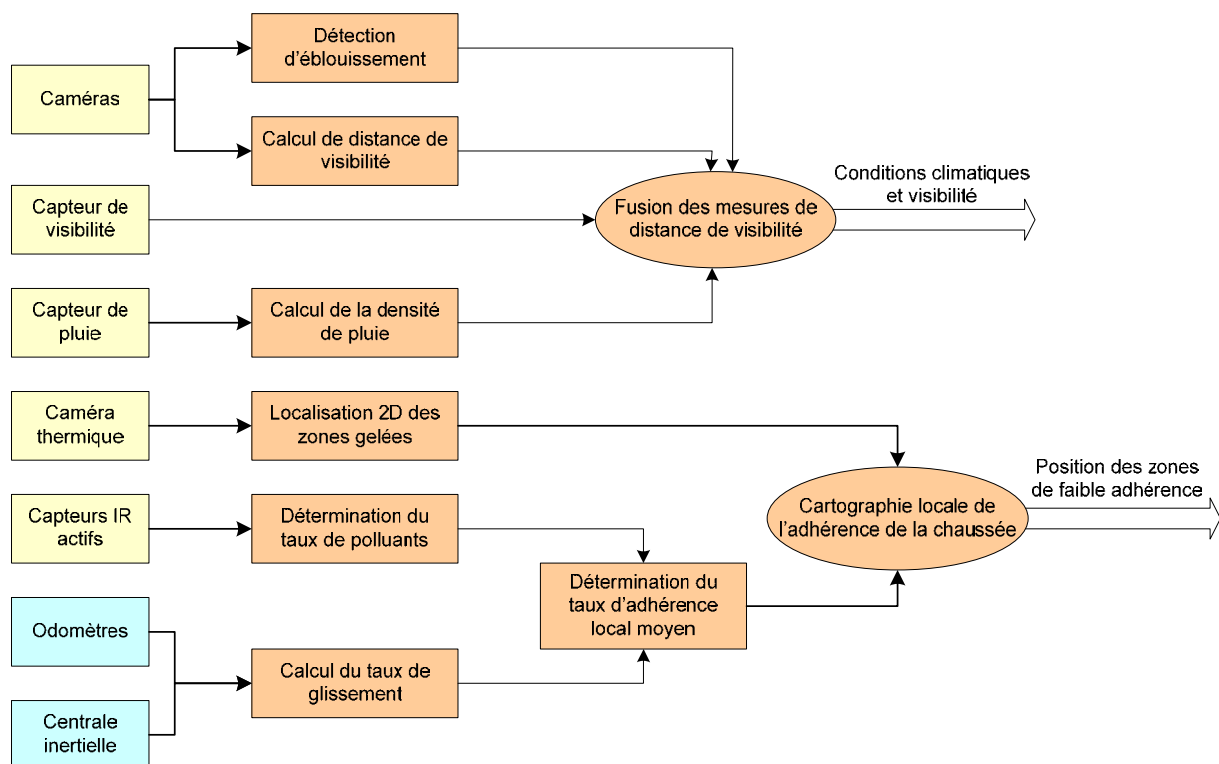


Figure 55 : Schéma de principe de l'évaluation des conditions météorologiques

V - 1. 3. Synthèse

La fonction d'évaluation des conditions météorologiques est donc réalisée grâce à plusieurs algorithmes de traitement et de fusion de données qui permettent de déterminer à la fois l'adhérence de la chaussée et les conditions climatiques et de visibilité. On remarque aussi que ce module permet de détecter un éblouissement éventuel du conducteur, à cause d'un véhicule roulant en sens inverse ou à cause d'un reflet ou d'un soleil rasant. Cette fonction permettra de prendre en compte la possibilité que le conducteur n'ait pas vu un obstacle ou une indication à cause de l'éblouissement.

La Figure 56, résume ainsi les différents modules utilisés pour réaliser les fonctions liées à la détermination des conditions météorologiques ainsi que les différents niveaux de traitement de données utilisés. On voit ainsi qu'il est nécessaire d'utiliser à la fois les données captées par les capteurs environnementaux (tels que les caméras par exemple) mais aussi les capteurs véhicules qui permettent alors l'apprentissage des conditions météorologiques et d'adhérence en observant le comportement du véhicule.

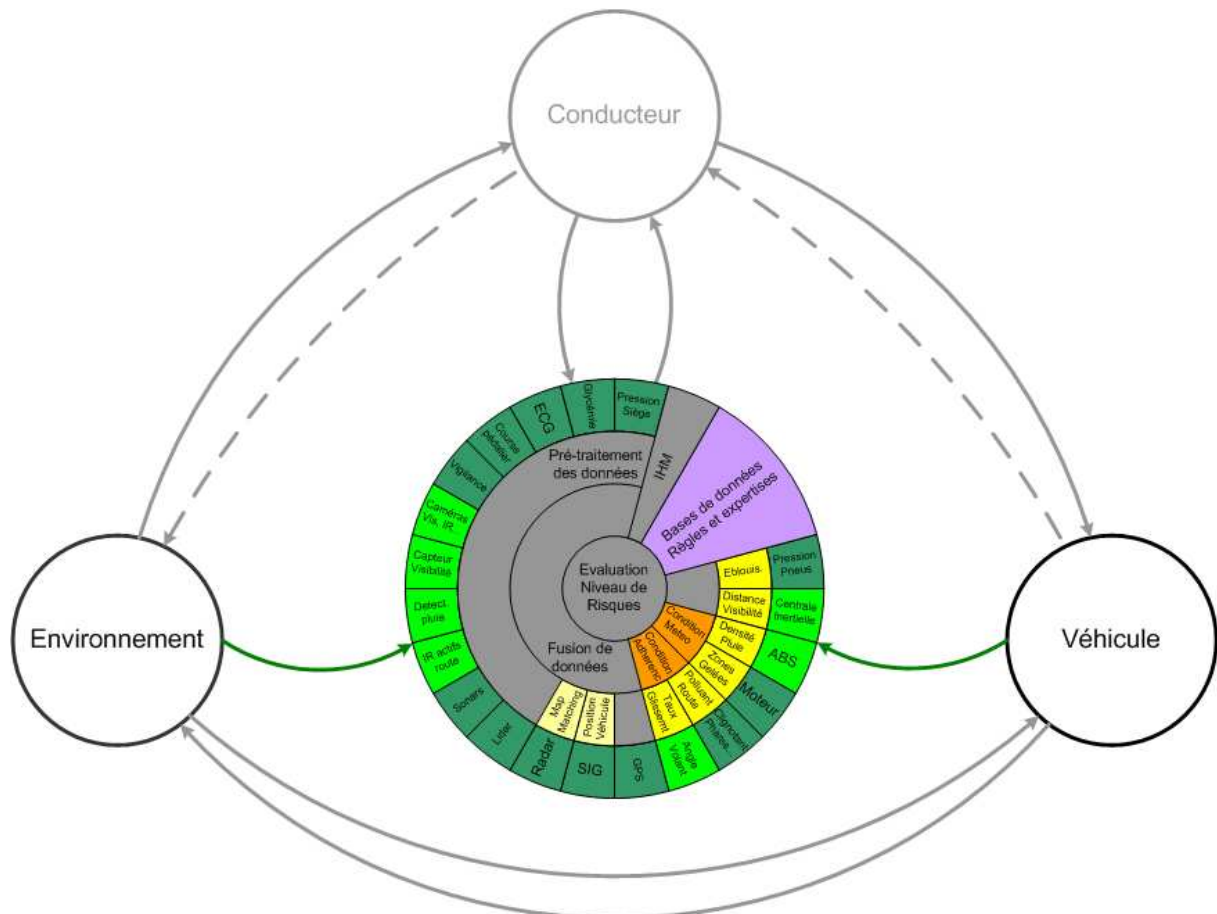


Figure 56 : Détermination des conditions météorologiques dans le cindynamètre

Les algorithmes mentionnés ci-dessus n'ont malheureusement pas pu être développés dans le cadre de ce travail de thèse du fait de l'aspect moins prioritaires qu'ils revêtent et de la non disponibilité de certains de ces capteurs (caméra thermique, capteurs infrarouge, capteur de visibilité).

V - 2. Evaluation de l'attention du conducteur et de sa vigilance

L'évaluation du conducteur est le module qui pose le plus de problèmes. En effet, il doit, à partir de nombreux capteurs non dédiés et de données qualitatives et quantitatives, évaluer le comportement du conducteur vis-à-vis des autres usagers de la route et du code de la route. Il doit aussi être capable d'évaluer "l'état d'esprit" du conducteur à tout moment pour déterminer le type de réaction qu'il peut avoir en face d'une situation (un conducteur stressé aura des réactions beaucoup plus brusques que s'il ne l'avait pas été par exemple). Ce module, doit enfin évaluer la vigilance du conducteur pour l'avertir en cas de chute du niveau attentionnel et éventuellement pour évaluer ses capacités à détecter et à réagir à une situation dangereuse. On donne le schéma fonctionnel global de ce module dans la Figure 57.

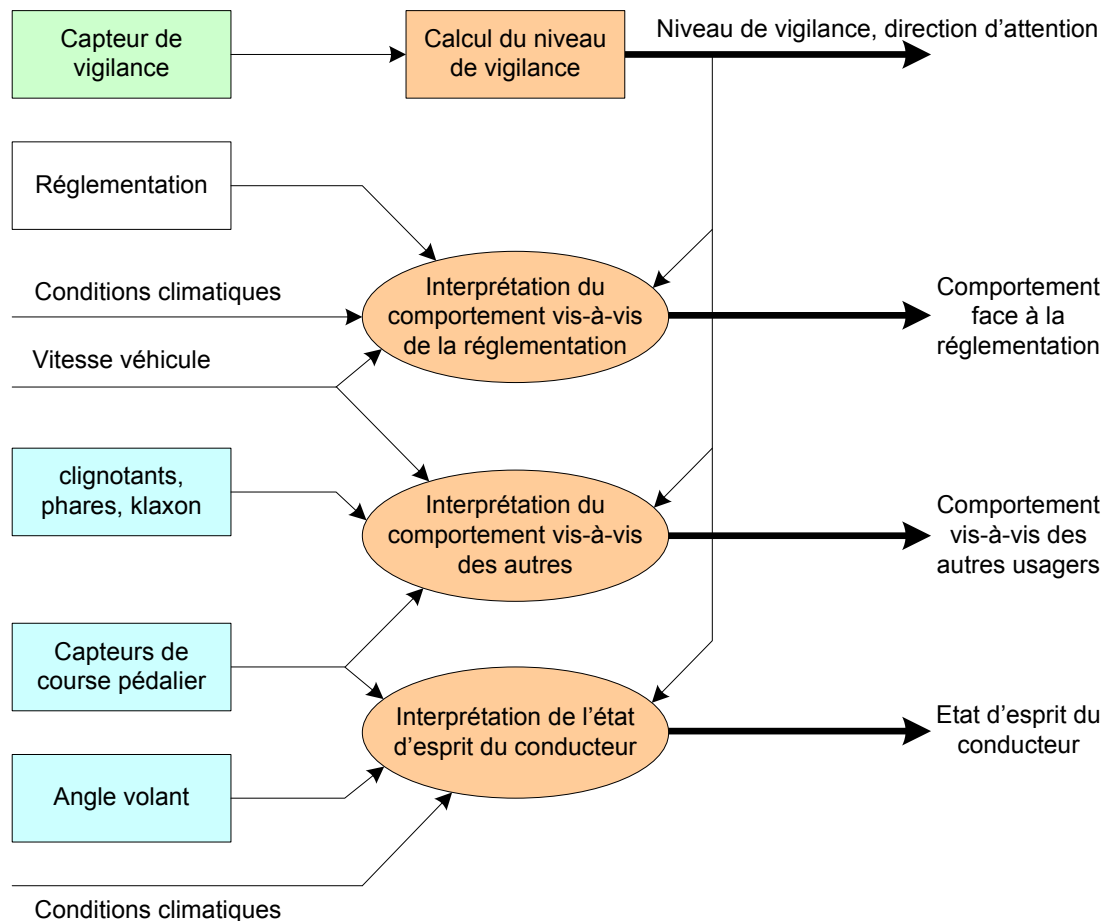


Figure 57 : Principe du module d'évaluation du conducteur

L'importance du calcul de la vigilance et des conditions climatiques apparaît clairement dans ce schéma. En effet, la détermination du niveau de vigilance du conducteur permet de mieux étalonner l'interprétation de son comportement et ainsi de mieux qualifier son état d'esprit actuel et son attitude vis-à-vis des autres usagers et de la réglementation. De même, l'utilisation des données portant sur les conditions climatiques permet de mieux évaluer l'état d'esprit du conducteur mais surtout d'observer le respect du code de la route dans de mauvaises conditions climatiques.

Les différents moteurs d'interprétation devront être conçus de façon à qualifier le comportement et à le classer selon des classes prédéfinies. Les comportements vis-à-vis de la réglementation pourront donc être "infractions volontaires", "infractions par habitude", "infractions par inattention", "respect du code de la route" par exemple. Ces catégories seront créées en fonction des besoins ultérieurs. Par ailleurs, on pourra émettre plusieurs choix de comportements en sortie de ce module avec une probabilité liée à chacun. Ainsi, on pourra prendre en compte l'incertitude inhérente à la classification du comportement humain.

La partie la plus importante de ce module provient du calcul du niveau de vigilance qui non seulement doit évaluer l'attention globale du conducteur (c'est-à-dire déterminer si le conducteur s'endort ou présente des signes de fatigue) mais aussi la direction de son regard afin de déterminer quelles sont les directions de l'espace auxquelles le conducteur est attentif. On retrouve ainsi les problèmes de détection de la direction du regard relativement classiques dans la littérature ([Betke 99] [Pérez 03] par exemple). Nous n'avons pas développé nous même de tels algorithmes néanmoins il existe un certain nombre de systèmes permettant la réalisation de cette tâche (le système FaceLab¹⁴ par exemple est couramment utilisé dans la recherche automobile). Dans l'optique d'une réalisation complète du cindynamètre, on utilisera donc un de ces systèmes existants afin d'être capable d'évaluer au moins la direction d'attention du conducteur.

¹⁴ Descriptif disponible sur le site : <http://www.seeingmachines.com/product/faceLab/>

Enfin, la disponibilité progressive de capteurs physiologiques devrait permettre au cindynamètre de déterminer les conditions dans lesquelles le conducteur conduit son véhicule en utilisant des informations telles que son niveau de glycémie ou son rythme cardiaque. De la même façon les capteurs de pression sur le siège en cours de développement ainsi que l'observation du conducteur, par les caméras situées dans le cockpit, devraient permettre de déterminer la position de conduite du conducteur et ainsi de déterminer s'il est attentif à la route ou à un élément de son véhicule ou à l'un de ses passagers.

La Figure 58, résume ainsi les différents modules utilisés pour évaluer le comportement du conducteur ainsi que sa position de conduite et donc en déduire les conditions de conduite. On remarquera que cette détermination se fait par l'utilisation directe des capteurs dédiés au conducteur mais aussi à l'utilisation indirecte des capteurs dédiés au véhicule et à l'environnement au travers des résultats de la détermination des conditions météorologiques. On notera enfin que certains capteurs véhicules tels que l'angle volant par exemple sont utilisés à la fois pour la détermination des conditions météorologiques mais aussi pour la détermination du comportement du conducteur. En effet, les variations temporelles de l'angle volant peuvent trahir une certaine nervosité du conducteur alors que la valeur instantanée de cet angle est utilisée pour évaluer le glissement courant du véhicule.

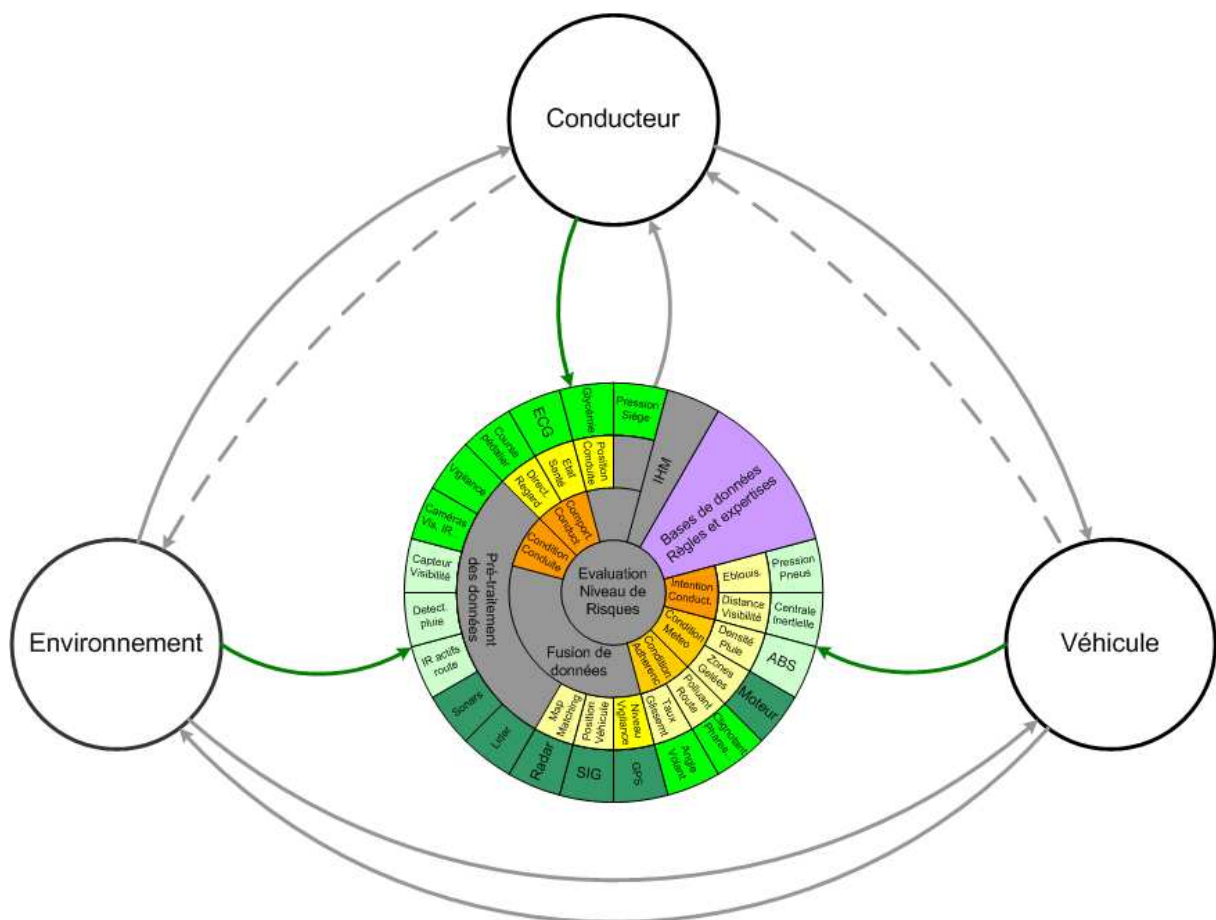


Figure 58 : Modules nécessaires à l'évaluation du comportement du conducteur

V - 3. Evaluation de la position du véhicule

Le calcul de la position du véhicule consiste à évaluer tout d'abord la position absolue du véhicule dans le monde dans le repère absolu (latitude et longitude) afin de pouvoir ensuite déterminer précisément sa position dans l'infrastructure routière par un procédé dit de "Map-matching" consistant à mettre en relation la position du véhicule avec la base de données cartographiques disponible dans le véhicule. Ces informations permettent d'aider le conducteur dans sa navigation mais aussi de prédire le type et la forme de l'infrastructure à venir.

V - 3. 1. Calcul de la position absolue par hybridation :

Le module d'hybridation est utilisé pour améliorer le positionnement absolu (dans le repère terrestre) du véhicule fourni par le DGPS¹⁵. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le DGPS n'offre qu'une précision de positionnement comprise entre 1 et 10 mètres (voir Figure 59). Cette précision ne nous permet pas d'obtenir un positionnement suffisamment fiable pour utiliser sans trop de problèmes les informations cartographiques dont on a besoin pour réaliser des fonctions telles que la signalétique embarquée par exemple. De plus, l'utilisation d'un DGPS seul pose un grave problème de disponibilité des données puisqu'il arrive que le récepteur GPS ne parvienne pas à se localiser à cause d'un nombre trop faible de satellites visibles ou simplement lors du passage dans un tunnel, dans une vallée très encaissée ou dans les rues étroites d'une ville. En effet, les échos en zone urbaine peuvent perturber la localisation comme on le voit sur la Figure 60.

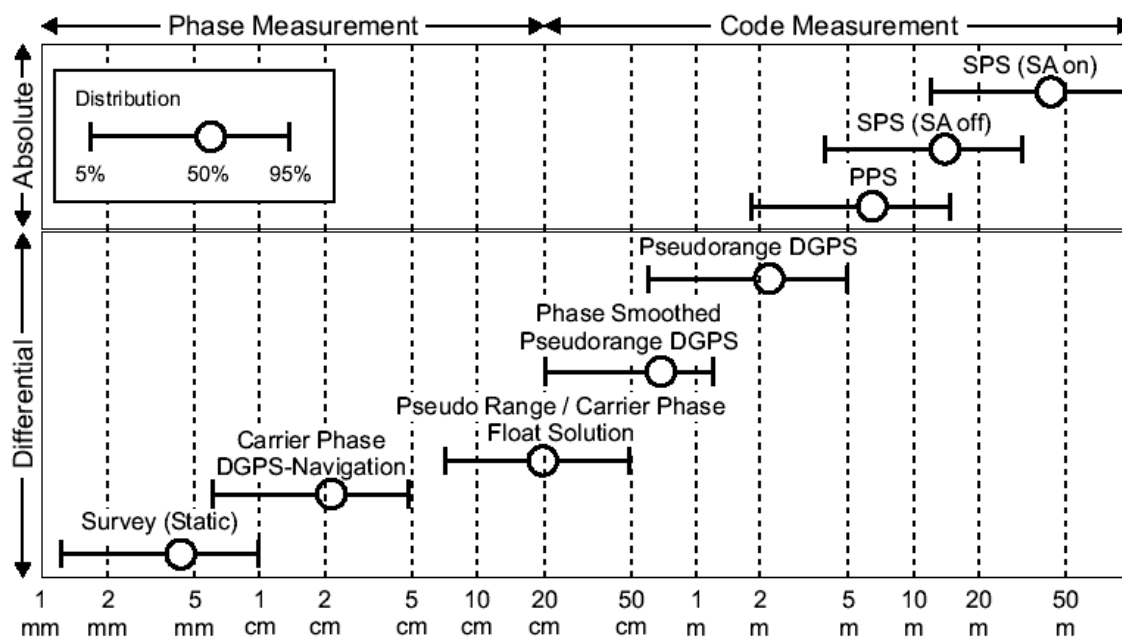


Figure 59 : Erreur de positionnement horizontal [Hein 00]

PPS : Precise Positioning Service

SPS : Standard Positioning Service

SA : Selective Availability

¹⁵ On utilise pour cela les résultats de D. Gamme [Gamme 01] et I. Abouhadros [Abouhadros 03a].

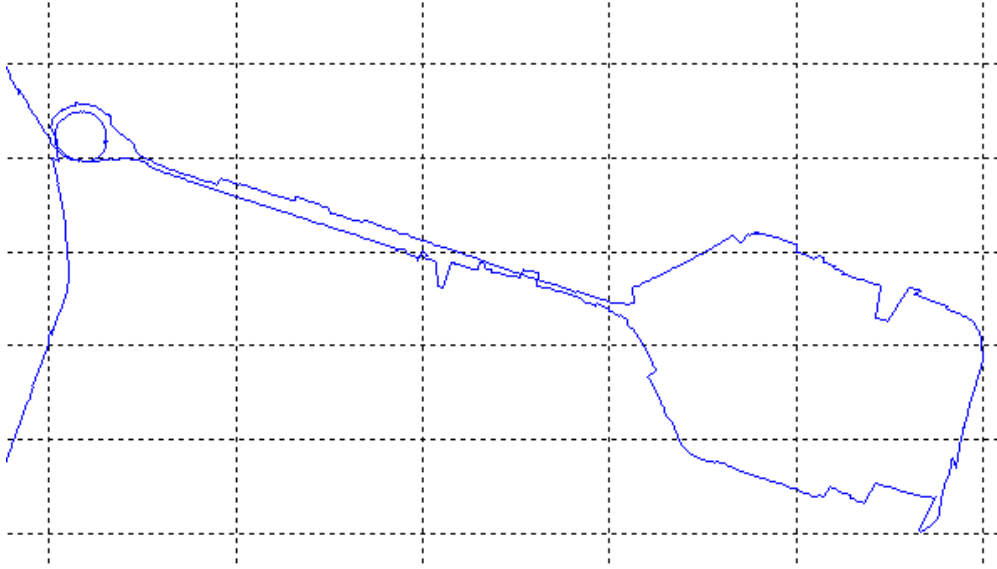


Figure 60 : Trajectoire en milieu urbain obtenue avec un DGPS seul

On voit sur cette dernière figure des sauts de plusieurs mètres de la trajectoire qui sont dus aux échos des signaux satellites qui perturbent la bonne localisation du véhicule. Cette trajectoire représente la montée de la rue Soufflot et le tour de la place du Panthéon dans le V^e arrondissement de Paris (dont on peut voir une vue aérienne dans la Figure 61).

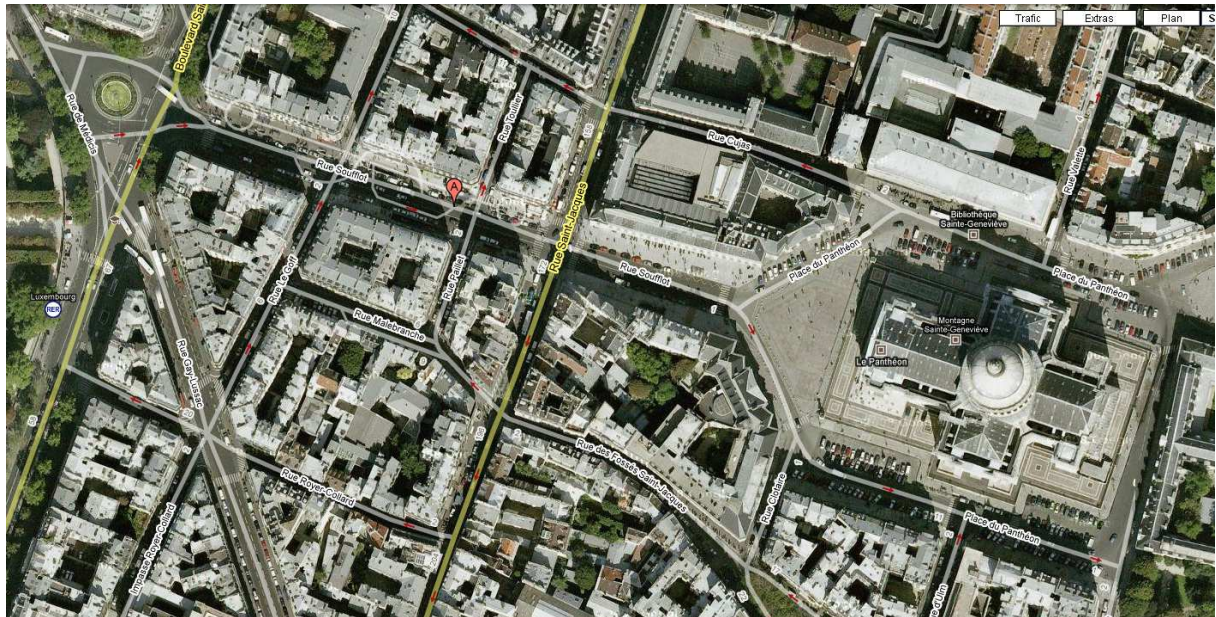


Figure 61 : Vue aérienne de la rue Soufflot à Paris (d'après Google Maps)

L'amélioration de la précision et de la disponibilité du positionnement du véhicule passe donc par la fusion des données fournies par le DGPS avec d'autres données. En l'absence d'une autre constellation de satellites (le réseau européen Galileo n'existait pas à l'époque des tests et n'est toujours pas disponible), nous devons utiliser les informations concernant la dynamique du véhicule. Ainsi, nous avons été amenés à utiliser en plus du DGPS les informations provenant de la centrale inertielle et des odomètres présents sur le véhicule. On trouvera une description des algorithmes utilisés, une étude plus complète des erreurs introduites par ces capteurs et les moyens de compensation de ces erreurs dans [Unterhinninghofen 02], [Gamme 01], [Abuhadrous 03a] et [Abuhadrous 03b]. On présente l'architecture d'un module d'hybridation DGPS dans la Figure 62.

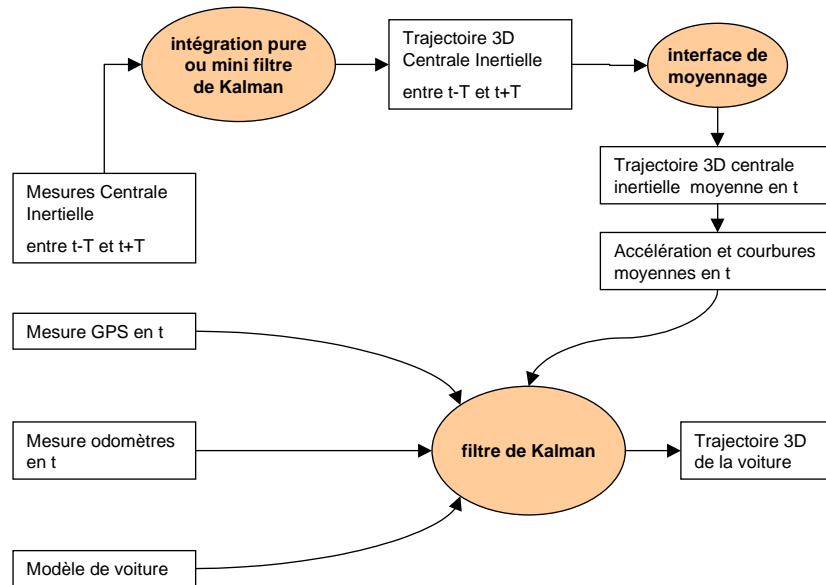


Figure 62 : Principe de fonctionnement du module d'hybridation [Gamme 01]

Le principe de l'algorithme d'hybridation DGPS repose entièrement, comme on peut le voir sur le schéma précédent, sur le filtrage de Kalman qui permet de corriger les erreurs introduites par les différents capteurs. Malgré sa simplicité apparente, cet algorithme reste relativement difficile à réaliser efficacement et pose certains problèmes. En effet, cette implantation repose sur l'hypothèse que le mouvement moyen de la caisse est parallèle au sol, cette hypothèse reste le plus souvent vérifiée mais peut parfois être mise en défaut. De plus, il est nécessaire de disposer des mesures GPS et odomètres au même instant pour que le filtrage de Kalman soit efficace, il est donc nécessaire d'interpoler les mesures obtenues pour utiliser les données reçues au même instant. Enfin, l'efficacité du filtrage de Kalman est fortement liée à la précision du modèle dynamique du véhicule utilisé ce qui pourrait poser problème. L'hybridation DGPS réalisée par D. Gamme [Gamme 01] et I. Abuhadrous [Abuhadrous 03a] a néanmoins permis d'obtenir des résultats satisfaisants comme le montre la Figure 63.

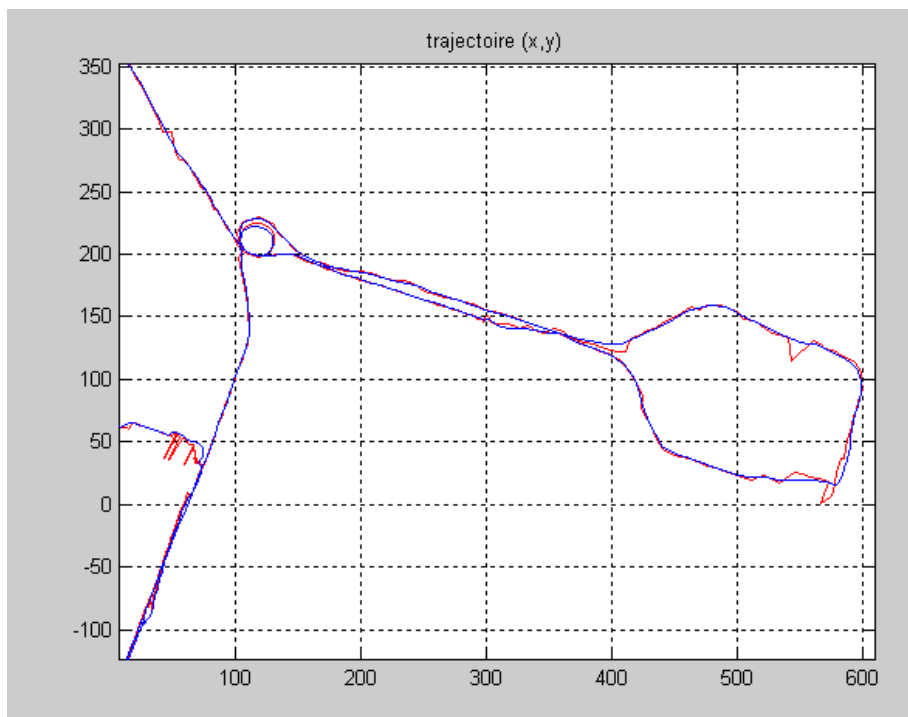


Figure 63 : Comparaison de la trajectoire avec DGPS seul (en rouge) et après Hybridation

V - 3. 2. Map-matching :

Le module de Map-Matching est utilisé pour lier la position absolue du véhicule à la cartographie de la zone. De cette façon on connaît à tout moment l'infrastructure routière qui nous entoure et on peut donc prévoir les éventuelles zones dangereuses que l'on pourrait rencontrer. De plus, l'utilisation de la cartographie permet d'obtenir des informations beaucoup plus riches si de telles informations sont disponibles. Les informations concernant les panneaux de signalisation permettront par exemple de réaliser la fonction de signalétique embarquée qui permettra d'afficher et de traiter les différentes indications, limitations de vitesse, interdiction, ... que le conducteur aurait pu ne pas voir à cause d'un masquage par exemple. De telles informations permettront aussi de prendre en compte le caractère prioritaire d'une route mais aussi, via l'utilisation des statistiques d'accidentologie, le caractère dangereux d'un virage ou d'une intersection.

La réalisation du module de Map-matching, essentielle pour disposer d'informations utiles sur l'infrastructure et donc pour pouvoir prévoir les comportements des véhicules, apparaît relativement aisée. En effet, il suffirait de projeter la position absolue du véhicule, calculée par hybridation, sur la cartographie et d'en déduire sur quelle voie de circulation on se trouve. Malheureusement, cette fonction de Map-matching n'est pas aussi évidente. En effet, la projection de la position absolue tombe rarement sur une voie de circulation (du fait des erreurs de positionnement commises mais aussi parfois à cause de l'imprécision des cartes), il faut alors évaluer quelle est la voie de circulation qui correspond à notre position. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes plus ou moins élaborées. Une première méthode repose simplement sur une mesure de distance orthogonale du point de projection aux différents segments de la cartographie, le segment choisi est alors le plus proche. Cette méthode est relativement efficace lorsque la densité de segments est faible mais elle pose de nombreux problèmes dans le cas contraire, car on risque de choisir un mauvais segment. Pour corriger ce défaut une deuxième méthode propose de prendre en compte l'historique récent des positions absolues calculées et de comparer le ou les segments ainsi obtenus aux segments de la cartographie (comparaison de ces deux méthodes Figure 64). Cette méthode donne de très bons résultats et sera donc utilisée par la suite. On pourra trouver d'autres méthodes de Map-matching plus élaborées dans [Revue 03].

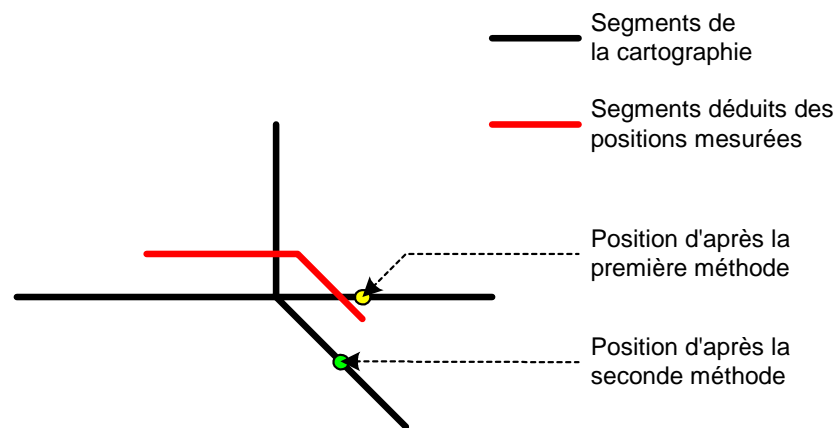


Figure 64 : Comparaison des deux méthodes de Map-matching

L'architecture du module de Map-matching repose donc sur la détermination de la voie de circulation actuellement utilisée et sur le calcul des éléments d'infrastructure autour du véhicule équipé mais aussi autour des véhicules détectés lors de la détection d'obstacles. On pourra ainsi mieux prédire leurs mouvements futurs. On donne le schéma global du module de Map-matching Figure 65.

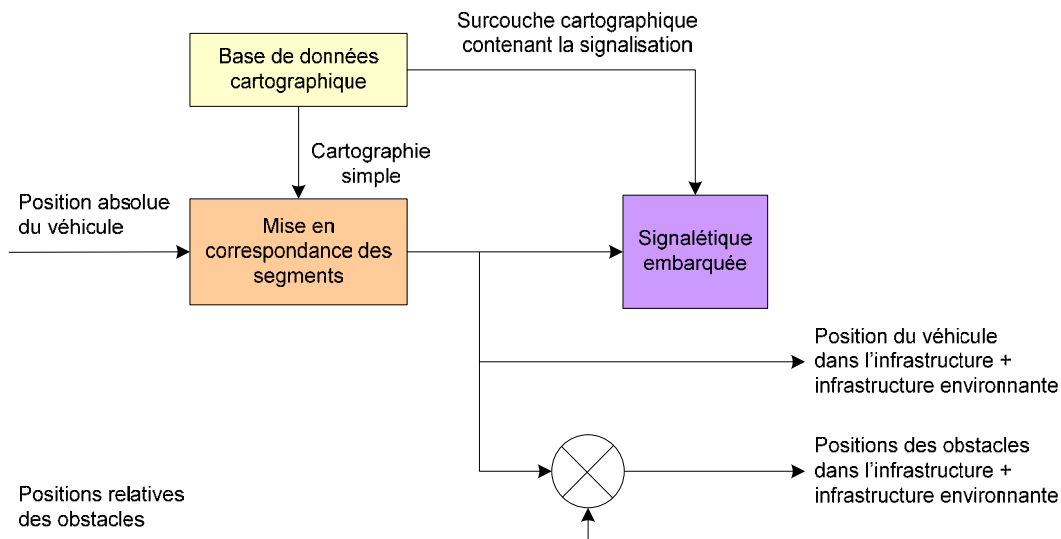


Figure 65 : Schéma de principe du module de Map-matching

V - 3. 3. Synthèse

Nous avons vu lors de l'étude du capteur GPS (section IV - 1. 3) que l'information fournie pouvait présenter une erreur relativement conséquente en particulier en environnement urbain. La Figure 60 en offre ainsi un exemple frappant montrant les différents sauts de position connus par le GPS en fonction de la réception de nouveaux satellites ou de réflexions sur l'un des bâtiments alentours. Ces problèmes pourraient évidemment être partiellement compensés par l'utilisation de capteur GPS plus onéreux (type RTK GPS par exemple) mais la zone de couverture s'en trouverait alors sensiblement réduite.

Au contraire, l'utilisation de capteurs véhicules qui fournissent une information relativement fiable sur la position relative du véhicule pendant une période relativement courte (l'odométrie seule a un taux de dérive d'environ 1% - i.e. 1m tout les 100m – alors que la centrale inertielle à une dérive d'environ 1° d'angle par heure) permet de corriger les erreurs de positionnement du GPS et d'obtenir ainsi une mesure de la position absolue du véhicule beaucoup plus fiable.

Couplée à un système d'information géographique (SIG), cette position absolue permet alors d'obtenir par Map-Matching la position du véhicule dans son infrastructure et de réaliser ainsi des fonctions d'information du conducteur telles que la signalétique embarquée, qui rappelle au conducteur la signalisation qui s'applique sur le segment de route emprunté. En parallèle le cindynamètre pourra ainsi connaître facilement la signalisation s'appliquant à la route empruntée par le conducteur. Cette information ne sera néanmoins disponible, par le biais de la base de données cartographique, que lorsque les informations de signalisation seront disponibles (ce qui n'est pas encore le cas) et en l'absence de travaux (les signalisations temporaires ne pouvant être intégrées à l'avance à la base de données sauf si cette base de données peut être mise à jour en temps réel par le biais d'une connexion Internet sans fil).

L'intégration de la position du véhicule dans l'infrastructure ainsi que de sa position absolue permettra enfin de suivre la trajectoire du véhicule au cours du temps aidant ainsi à prévoir sa trajectoire future. Il est ainsi possible à l'aide d'une poignée de capteurs seulement d'obtenir une information détaillée sur l'évolution de la trajectoire du véhicule par rapport à l'infrastructure comme on le voit dans la Figure 66.

- Les radars offrent une très bonne précision longitudinale ainsi que la mesure instantanée de la composante longitudinale de la vitesse (par effet Doppler) mais une mauvaise résolution en localisation latérale ainsi que sur la forme des objets. Enfin, les radars ne perçoivent pas ou très peu les obstacles non métalliques dont l'écho est très faible.
- Les télémètres laser offrent quant à eux une très bonne précision en localisation ainsi que sur la forme des objets mais ne permettent pas d'identifier les obstacles ou de percevoir leurs intentions. Enfin, ils ne permettent pas de détecter correctement les obstacles dits "non coopératifs" tels que les obstacles absorbant le rayonnement infrarouge ou ne dispersant que très peu le signal réfléchi (la part du rayonnement incident réfléchi vers le capteur étant alors très faible ou nulle lorsque l'obstacle n'est pas orthogonal à la direction du rayon).

Afin de pallier les défauts des différents types de capteurs il apparaît nécessaire de réaliser une fusion de données multi capteurs entre des données télémétriques et des données issues de caméras. La plupart des télémètres (radar ou laser) offrent déjà un prétraitement des données afin d'en extraire les informations utiles sur les obstacles détectés, aussi nous ne nous sommes intéressés en premier lieu qu'à la partie traitement des données image.

V - 4. 1. Détection d'obstacles par la vision

La détection d'obstacles par vision par ordinateur peut se faire de très nombreuses façons (comme nous l'avons brièvement rappelé lors de la présentation des caméras comme capteurs du cindynamètre) à partir d'une ou plusieurs caméras. Nous nous sommes volontairement limités au cas monoculaire afin de réduire la charge de calcul nécessaire au cindynamètre et de limiter aussi le nombre de capteurs utilisés. Ce choix peut sembler discutable compte tenu de la progression des puissances de calcul disponibles et de l'efficacité des méthodes basées sur la stéréo vision. Cependant, l'utilisation massive de systèmes stéréo nécessiterait le doublement du nombre de caméras embarquées rendant l'acquisition et le traitement de leurs informations difficiles et leur maintenance hasardeuse. De plus, les systèmes de vision stéréoscopiques présentent une moins grande résistance aux conditions automobiles (vibrations, températures, chocs...) du fait de la nécessité de garder une très grande rigidité dans la position relative des deux caméras. Il sera malgré tout possible par la suite de remplacer tout ou partie des algorithmes présentés par des systèmes stéréo.

Nous avons aussi choisi de limiter nos développements dans un premier temps aux obstacles très proches du véhicule qui ne constituent un risque qu'à vitesse faible, principalement lors des manœuvres de parking. On se base alors sur des caméras ayant une très faible focale (et donc un très grand angle de vue) afin de surveiller une zone beaucoup plus large autour du véhicule. Nous verrons aussi que bien que les conditions soient moins cindynogènes pour le conducteur du véhicule, elles peuvent néanmoins mener à de très graves accidents.

Dans un deuxième temps nous traitons la détection d'obstacles à l'avant du véhicule (pour des véhicules relativement lointains – de 10 à 100 mètres de distance environ) puisque les obstacles présents dans cette zone constituent une des sources principales des risques encourus par le conducteur. Les différences de conditions (vitesse du véhicule, proximité des obstacles, taille de la zone surveillée et caractéristiques de la caméra) justifient l'usage d'algorithmes de traitement différents par rapport à la détection d'obstacles proches.

Les développements sont présentés ici pour des zones proches à l'arrière du véhicule et lointaines à l'avant de celui-ci, il est cependant aisé d'appliquer ces traitements à d'autres zones du véhicule (avant proche, arrière lointain mais aussi sur les côtés du véhicule).

V - 4. 1. 1. Détection d'obstacles proches du véhicule

Lors de manœuvres à basse vitesse (situation de parking par exemple, sortie de garage, ...) les obstacles lointains ne représentent pas (en règle générale) de grands dangers. Au contraire, il est alors nécessaire de surveiller attentivement les alentours proches du véhicule puisque de telles manœuvres se font généralement très près d'obstacles. Nous proposons donc tout d'abord de nous intéresser à la détection des obstacles proches du véhicule.

L'intérêt d'un tel système nous a été confirmé par un rapport récent de la NHTSA [NHTSA 06] montrant que les systèmes actuels uniquement basés sur les sonars ne permettent pas d'éviter nombre d'accidents, principalement avec des enfants ou des personnes âgées (et bien entendu nombre d'accidents avec des obstacles statiques bien moins graves évidemment), qui causent la mort de plusieurs centaines de personnes chaque année.

L'objectif de la détection des obstacles proches du véhicule est d'obtenir une cartographie suffisamment précise de l'environnement immédiat du véhicule pour permettre d'effectuer les manœuvres souhaitées en toute sécurité. Il s'agit donc d'offrir une cartographie complète de l'environnement. Ainsi on ne pourra pas se contenter de détecter uniquement les véhicules (puisque en situation de parking les obstacles peuvent être aussi divers que des murs, des poteaux, des humains, des vélos, ...). Enfin, la précision de cette cartographie doit être bonne, on ne pourra pas non plus se contenter de donner la forme des obstacles distants de 2m du véhicule avec une précision d'un mètre.

Pour répondre à ces contraintes à l'aide d'une unique caméra montée sur le véhicule nous utilisons l'approche dite "Shape from motion" qui consiste à utiliser le mouvement de la caméra pour reconstruire son environnement en créant des paires stéréo virtuelles. [Fintzel 04] et [Vestri 05] présentent ainsi les travaux de la société IMRA Europe autour de cette technique dans le cas d'environnements statiques. Nous rappelons ici brièvement les résultats présentés puis les développements additionnels que nous avons effectués afin de pouvoir appliquer cette méthode dans un environnement où tous les obstacles ne sont pas statiques. On a ainsi cherché à rendre le système opérationnel dans des conditions réelles.

V - 4. 1. 1. 1. Détection et reconstruction des obstacles statiques

La détection d'obstacles statiques par le biais d'une approche "Shape from motion" repose sur la mise en correspondance d'un maximum de points d'intérêts sur les différents obstacles entre au moins deux images. Une fois cette mise en correspondance effectuée on compare le déplacement des points entre deux images au déplacement effectué par la caméra entre ces deux images. A partir de cette comparaison il est alors possible de déterminer la position tridimensionnelle de chaque point ainsi apparié. Afin d'augmenter la précision de ces reconstructions nous avons ajouté une étape de suivi des points d'intérêts. Une fois cette étape effectuée, les points tridimensionnels obtenus sont réunis en fonction de leur proximité géométrique afin de créer des ensembles de points correspondant aux différents obstacles de la scène. Les détails de l'approche suivie sont présentés dans [Fintzel 04] et [Vestri 05].

V - 4. 1. 1. 1. a/ Points critiques pour la détection d'obstacles statiques

L'efficacité de la détection et de la reconstruction des obstacles repose ainsi sur plusieurs critères:

- L'efficacité de l'appariement des points d'intérêts entre plusieurs images. On utilise pour cela un détecteur classique présenté dans [Shi 94].
- L'efficacité du suivi des points. On utilise ici une approche classique par "template matching", c'est-à-dire que l'on cherche à appairer les voisinages de points d'intérêts dans 2 images distinctes.
- La précision de la détermination du mouvement de la caméra entre les différentes images. On utilise ici simplement l'intégration des données odométriques du véhicule. Ce choix se justifie par la vitesse très faible du déplacement (qui limite donc les problèmes de glissement des roues) et la longueur de celui-ci (qui limite donc l'influence de la dérive). On notera cependant qu'en l'absence de capteur de hauteur ou d'angles il ne nous est possible d'évaluer que le déplacement plan de la caméra. La reconstruction est donc dégradée lorsque la route n'est pas plane (présence de ralentisseur par exemple) et que l'information sur les variations de tangage et de hauteur n'est pas disponible.
- L'absence d'objets en mouvement ou la connaissance du mouvement de ces obstacles. On a en effet vérifié que la connaissance précise du mouvement d'un obstacle permet de reconstruire précisément sa forme tridimensionnelle. Dans le cas contraire, la reconstruction des obstacles en mouvement n'est plus possible comme le montre la Figure 67. On voit dans cette figure que l'appariement de points d'intérêt au niveau du piéton en mouvement a généré des points tridimensionnels faux beaucoup plus proches que la position réelle du piéton.

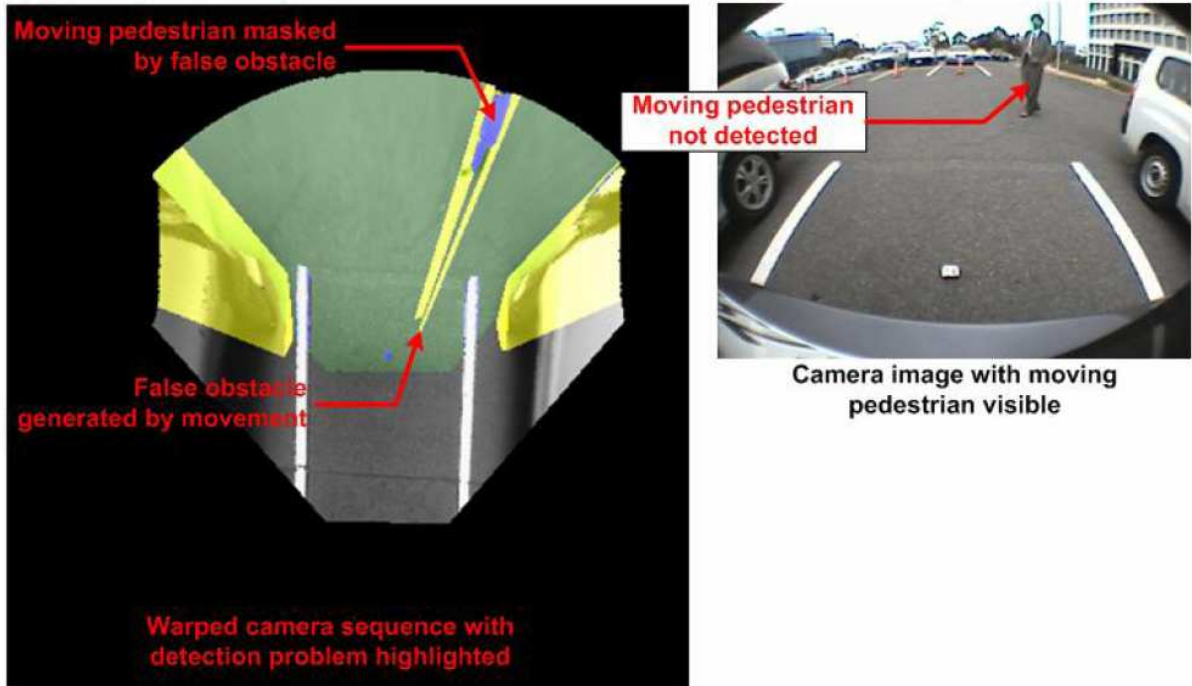


Figure 67 : Problèmes de reconstruction tridimensionnelle causés par la présence d'obstacles en mouvement. A gauche vue de dessus, à droite image correspondante (d'après [Wybo 06])

V - 4. 1. 1. b/ Analyse des résultats obtenus

Les tests auxquels nous avons procédé à l'IMRA ont montré de bons résultats dans des conditions réelles (situation classique de parking en créneau) et en l'absence d'objets en mouvement. La Figure 68 montre ainsi un exemple des reconstructions tridimensionnelles obtenues à l'aide de cette méthode. Tous les obstacles statiques de la scène sont correctement reconstruits par notre algorithme bien que la triangulation des obstacles ne permette pas une retranscription fidèle des formes des obstacles.

Il arrive cependant, pour certains types d'obstacles (poteaux, obstacles non texturés ou présentant des textures très répétitives tels que les grillages), que la reconstruction échoue. Nous développons actuellement à l'IMRA des solutions à ces différents problèmes. Il n'est cependant pas possible de présenter ici ces développements pour des raisons évidentes de confidentialité.

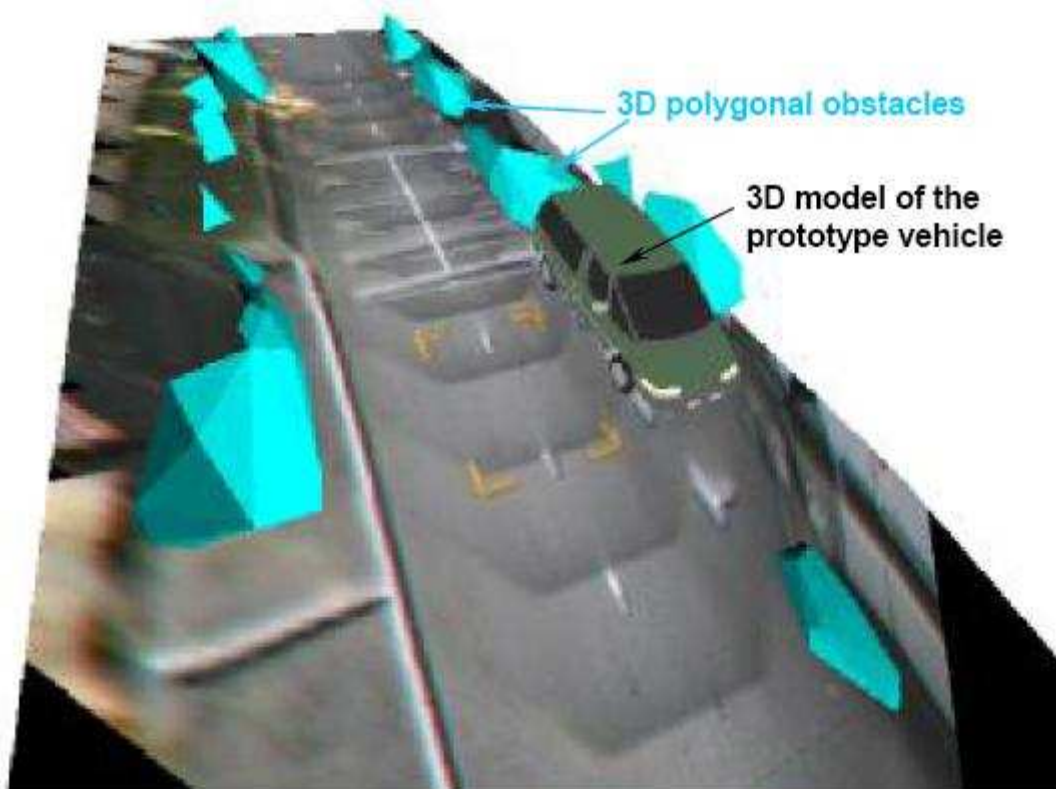


Figure 68: Exemple de résultats obtenus (d'après [Fintzel 04])

V - 4. 1. 1. 1. c/ Conclusion

Les résultats obtenus par ce détecteur d'obstacles statiques nous apparaissent très prometteurs d'autant plus que nous avons montré qu'il était possible (par le biais de nombreuses optimisations du code) d'obtenir ces résultats à l'aide d'un simple processeur RISC cadencé à 80 MHz, très loin donc de la puissance offerte par les processeurs disponibles sur le marché. Cet algorithme ainsi que les développements actuellement en cours à l'IMRA pourront ainsi être utilisés très facilement dans le cadre du cindynamètre sans imposer une charge de calcul trop importante.

V - 4. 1. 1. 2. Détection des obstacles en mouvement

Nous avons vu que le détecteur d'obstacles statiques proposé permettait d'obtenir de bons résultats lorsque la scène ne présente pas d'obstacles en mouvement. Cependant, la détection des obstacles en mouvement est essentielle pour permettre d'éviter les accidents avec des piétons, des enfants ou des cyclistes. Nous nous sommes donc intéressés à la détection de ces obstacles en mouvement selon la méthode que nous avons présenté dans [Wybo 06] et [Wybo 07]. Il est important de noter que la caméra utilisée pour la détection des obstacles proches du véhicule est nécessairement grand angle afin de voir les mouvements proches des coins arrière du véhicule. La Figure 67 donne ainsi un exemple des images recueillies par une telle caméra. On voit nettement la distorsion très importante de l'image apparaître due à la caméra.

V - 4. 1. 1. 2. a/ Analyse des principales méthodes existantes

La détection d'obstacles en mouvement à partir d'une unique caméra monoculaire dans un environnement inconnu a été abordée de nombreuses façons dans la littérature. Un certain nombre de méthodes sont directement issues du domaine de la vidéosurveillance et s'appuie ainsi sur la différenciation d'images entre l'image courante et une image précédente [Lipton 98] ou l'image de fond (généralement construite par accumulation de plusieurs images précédentes) [Masoud 97], [Lee 03]. Ces méthodes bien que très simples à programmer ne peuvent être appliquées dans notre cas puisqu'elles sont très fortement perturbées par le fort mouvement apparent¹⁶ que génère le déplacement d'une caméra grand angle lorsque des obstacles statiques sont proches.

D'autres méthodes s'appuient sur l'analyse du flot optique dans l'image et cherchent à distinguer le flot optique généré par le déplacement de la caméra de celui généré par les obstacles en mouvements. Ces méthodes que l'on retrouve dans [Lefaix 02], [Franke 02] et [Fablet 02] par exemple donnent de bons résultats mais nécessitent cependant beaucoup de calculs pour donner des résultats fiables et denses. De plus, de telles approches ne permettent pas de détecter les objets se déplaçant de façon identique (parallèlement et à la même vitesse) au mouvement de la caméra (le flot optique généré par ces objets est alors nul et peut correspondre aussi bien à un objet statique très lointain qu'à un obstacle très proche).

Enfin, des méthodes moins génériques basées sur la reconnaissance d'objets ont été proposées. Elles cherchent alors à détecter un ou plusieurs types d'objets particuliers dans les images. Ces méthodes présentent l'avantage de détecter les obstacles statiques et en mouvement même partiellement occultés. Elles ne permettent malheureusement pas de détecter les objets en mouvement d'un type différent des types recherchés et ne sont donc pas applicables aux cas réels où de très nombreux objets peuvent apparaître. De plus la variabilité d'apparence des humains très proches d'une caméra grand angle rend ces approches beaucoup moins efficaces.

V - 4. 1. 1. 2. b/ Méthode proposée

Pour compenser les problèmes apparaissant avec les méthodes à base de différenciation d'images, nous avons proposé un algorithme de détection du mouvement basé sur la transformation perspective inverse dans le plan du sol¹⁷ telle que proposée dans [Mallot 91]. Cette méthode consiste à inverser la transformation projective ayant créé l'image en supposant que les pixels forment l'image des points appartenant au plan du sol. Le principe de cette méthode est présenté dans la Figure 69 : P se projette en P'_I dans l'image I . La transformation perspective inverse considère que P'_I provient de P'_G . Elle crée ainsi une image I' du sol dont chaque pixel P'_G contient la couleur du P'_I correspondant.

¹⁶ Le mouvement apparent est créé par le déplacement des objets statiques dans l'image obtenue à partir d'une caméra mobile. On parle donc de mouvement apparent pour distinguer le flot optique créé par des obstacles statiques du flot optique généré par le mouvement d'objets dans la scène.

¹⁷ Cette méthode est appelée GPT pour "Ground Plane Transformation" en anglais

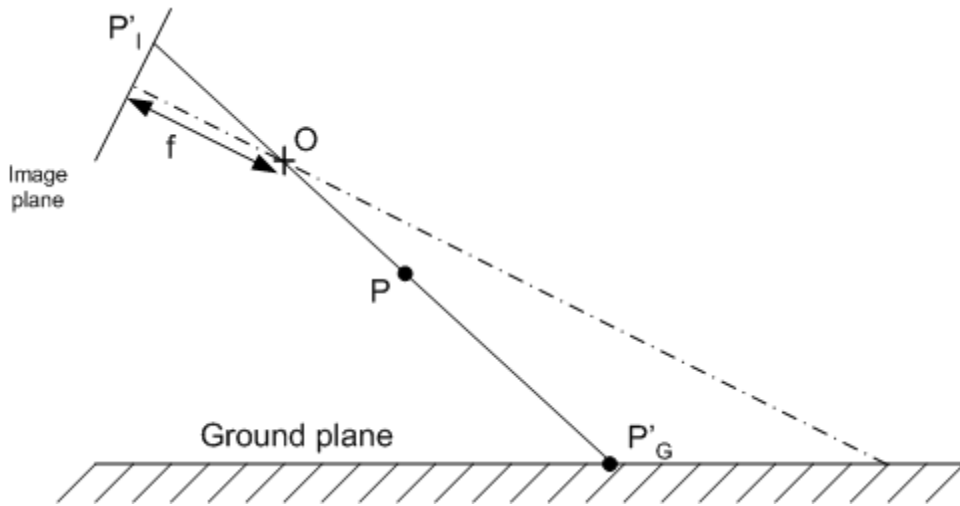


Figure 69: Illustration de la transformation perspective inverse GPT [Wybo 07].

En déplaçant l'image I' selon le déplacement de la caméra on s'assure que tous les points P'_G de I' correspondant réellement à un point P du sol contiennent à chaque instant la même couleur issue de P comme le montre la Figure 70. Ainsi, grâce à cette transformation l'image du sol reste complètement statique. Les objets n'appartenant pas au plan du sol apparaissent quant à eux d'autant plus distordus qu'ils sont hauts. La Figure 71 montre ainsi comment est modifiée l'apparence d'un objet haut (ici un piéton entrant dans le champ de vision de la caméra) alors que l'apparence d'une marque au sol n'est pas du tout modifiée.

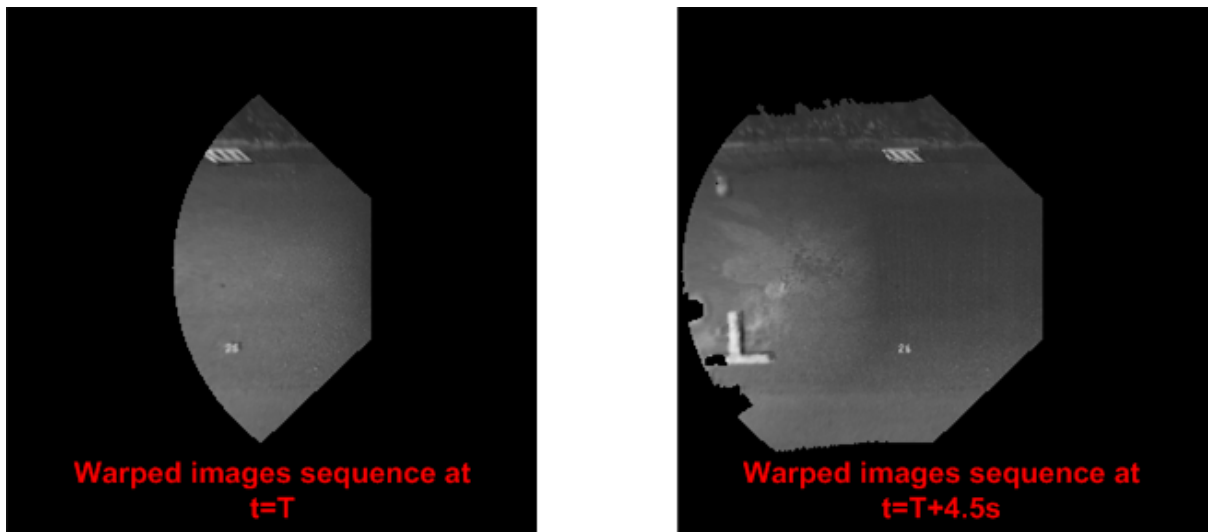


Figure 70 : Compensation du mouvement du véhicule sur une séquence de 45 images [Wybo 07]

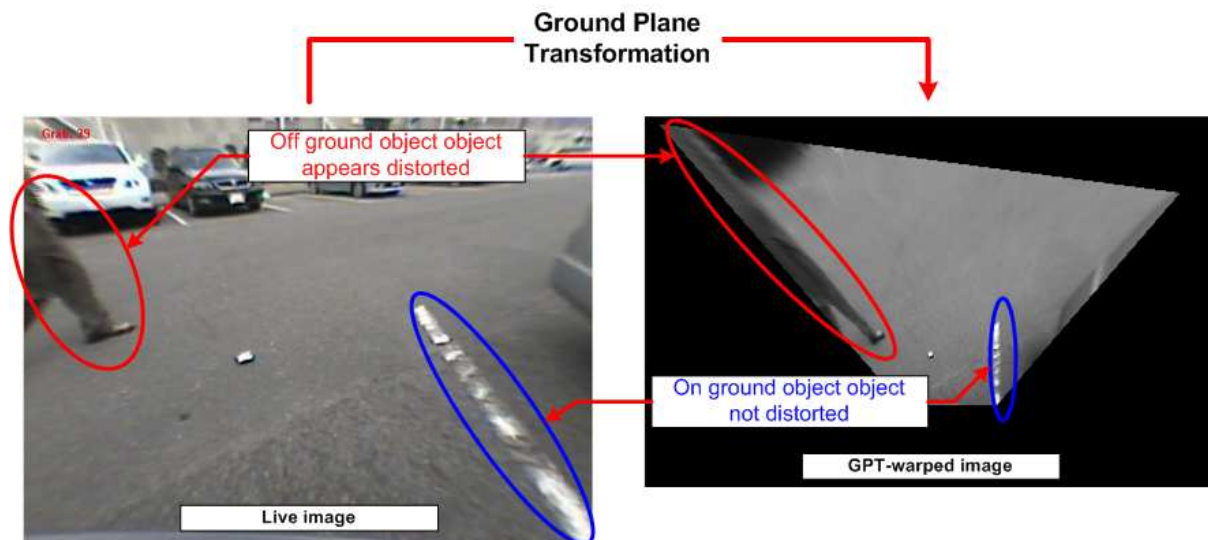


Figure 71 : Exemple de déformation des objets par transformation perspective inverse [Wybo 07]

L'avantage de cette méthode est de donner naturellement une image de référence (correspondant à l'image du sol lorsqu'aucun obstacle en mouvement n'est présent). Évidemment, tout obstacle en mouvement peut alors facilement être distingué alors puisqu'il modifiera la couleur des points P'_G dans l'image courante par rapport aux points P'_G de l'image de référence. Ceci s'applique malheureusement aussi aux changements d'illumination ou aux ombres en mouvements bien évidemment.

Un deuxième avantage de cette méthode est de permettre de localiser précisément la position de tout point du sol puisqu'il existe une correspondance directe entre position dans l'image I' et position réelle sur le sol. Il devient ainsi possible de localiser précisément la position des obstacles dès lors qu'ils sont posés sur le sol et que ce ou ces points de contact avec le sol sont correctement détectés.

Nous avons donc proposé de détecter les obstacles en mouvement par différenciation d'images avec une image de référence créée par accumulation d'images, puis de localiser ces obstacles en calculant la position du point le plus proche de la caméra dans l'image I' qui se trouve être généralement le point de contact avec le sol¹⁸.

V - 4. 1. 1. 2. c/ Algorithme de détection du mouvement

Le choix de la méthode de détection du mouvement s'est fait sur la base de 4 critères essentiels :

- Faible coût de calcul pour pouvoir être utilisé même sur une cible embarquée.
- Robustesse au déplacement de la caméra
- Capacité à localiser les mouvements pour déterminer la dangerosité de ceux-ci
- Adaptabilité aux conditions réelles (changements d'illumination, de type de mouvements, ...) ce qui suppose donc l'utilisation de très peu d'hypothèses à la fois sur la scène et sur les objets à détecter.

On l'a vu, les 3 premiers critères nous ont amené à choisir une méthode basée sur la transformation perspective inverse GPT et sur la différenciation d'images avec une image de référence générée par accumulation des images. La dernière condition nous a permis d'éliminer les solutions à base de reconnaissance de formes mais a aussi conditionné les algorithmes que nous avons utilisés. En effet, l'utilisation seule de la GPT ne permet pas, d'elle-même, une adaptabilité correcte aux changements de conditions :

¹⁸ En fait, lorsque ce point le plus proche n'est pas le point de contact avec le sol on ne fait que sous estimer légèrement la distance à l'obstacle, ce qui, dans une application de sécurité automobile n'est pas dramatique.

- Les modifications d'illumination (dues au passage de nuages par exemple) par exemple créent, si elles ne sont pas compensées, un changement dans toute l'image qui peut être perçu comme un mouvement.
- Le bruit de la caméra crée des changements locaux dans l'image I' qui apparaissent alors comme des mouvements.
- La non planéité du sol ainsi que les mouvements de caisse non captés qui introduisent des changements dans la pose de la caméra, modifient la position de projection des points du sol d'une image sur l'autre introduisant de petits déplacements pouvant être perçus comme des mouvements.
- Le déplacement du véhicule dans une scène contenant des obstacles statiques entraîne la modification de la forme des obstacles, ce qui peut là aussi créer une impression de mouvement.
- Enfin, les obstacles en mouvement peuvent présenter dans I' certaines parties ayant la même couleur que dans l'image de référence, séparant ainsi un mouvement en de nombreux mouvements plus petits.

Nous avons donc utilisé une approche multicritères pour robustifier l'algorithme de détection du mouvement. Cette approche permet dans un premier temps de déterminer la probabilité qu'un pixel de I' appartienne à un objet en mouvement, puis, en groupant les pixels ayant une probabilité non nulle de mouvement, de déterminer quelles zones de l'image correspondent effectivement à un objet en mouvement dont on peut alors déterminer la position.

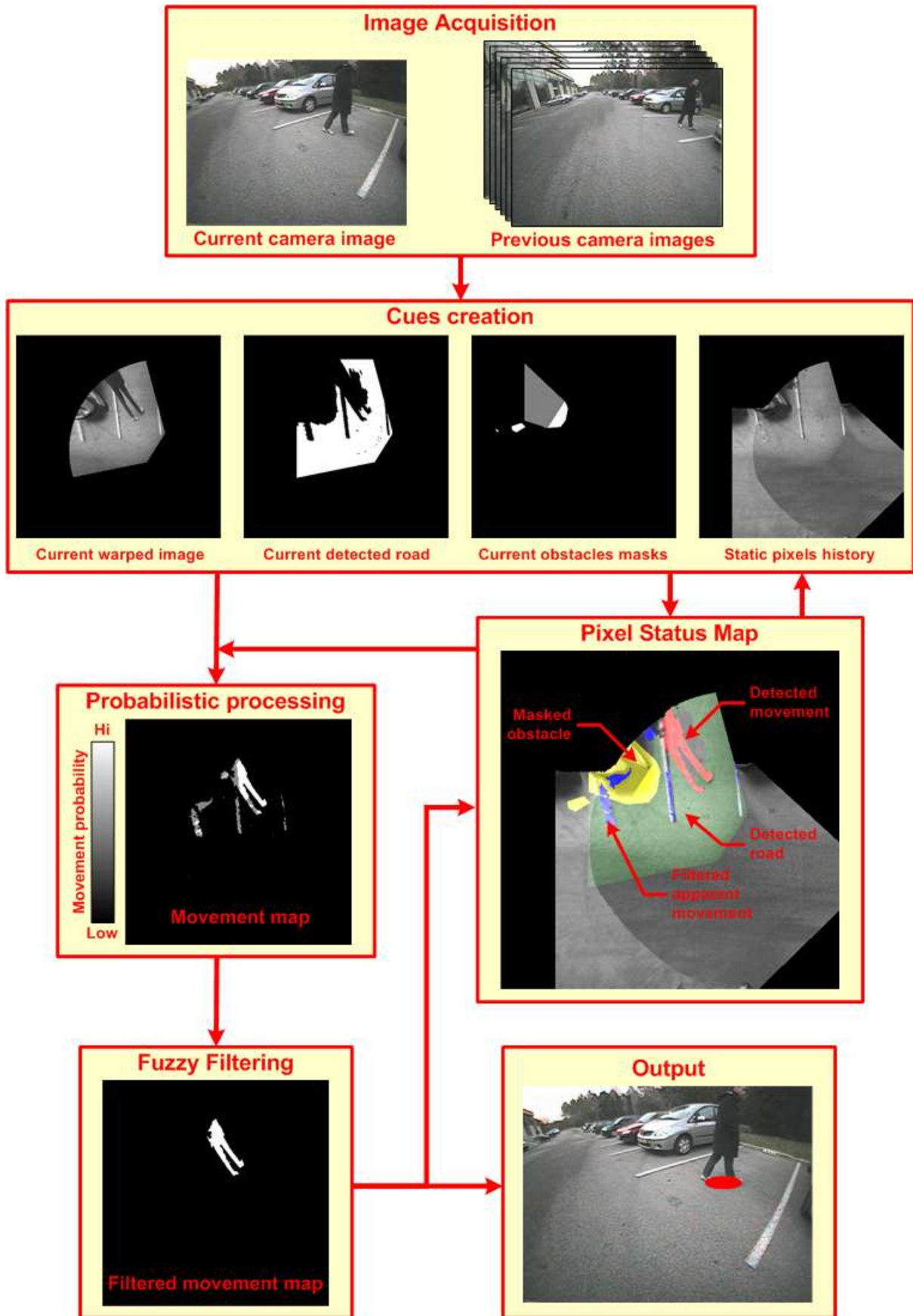


Figure 72 : Schématisation de l'algorithme de détection du mouvement [Wybo 07]

La Figure 72 présente ainsi une vue globale de l'algorithme de détection du mouvement que nous avons créé :

1. On applique tout d'abord la transformation perspective inverse à l'image acquise, comme montré dans la Figure 71, afin de travailler dans le domaine des images I' .
2. On crée un masque des obstacles statiques détectés précédemment. Pour chaque obstacle, tous les pixels de I' appartenant à l'enveloppe convexe trouvée se voit attribuer une forte probabilité d'appartenir à un obstacle statique. Tous les pixels derrière cette enveloppe convexe reçoivent une probabilité plus faible d'appartenance à un objet statique. Ce dernier point est nécessaire pour prendre en compte la détection parfois incomplète dans la profondeur de la forme des obstacles statiques ainsi que la modification de leur forme qu'introduit la transformation perspective inverse. La Figure 73 illustre ce masquage des obstacles à partir d'un enregistrement réel et des résultats de détection d'obstacles statiques que nous avons obtenus. On notera de plus que le masquage des pixels derrière l'enveloppe convexe est limité par la hauteur de l'obstacle détecté. Ainsi un objet bas masque beaucoup moins de pixels qu'un objet très haut. On améliore ainsi la détection des obstacles en mouvement derrière des objets statiques.

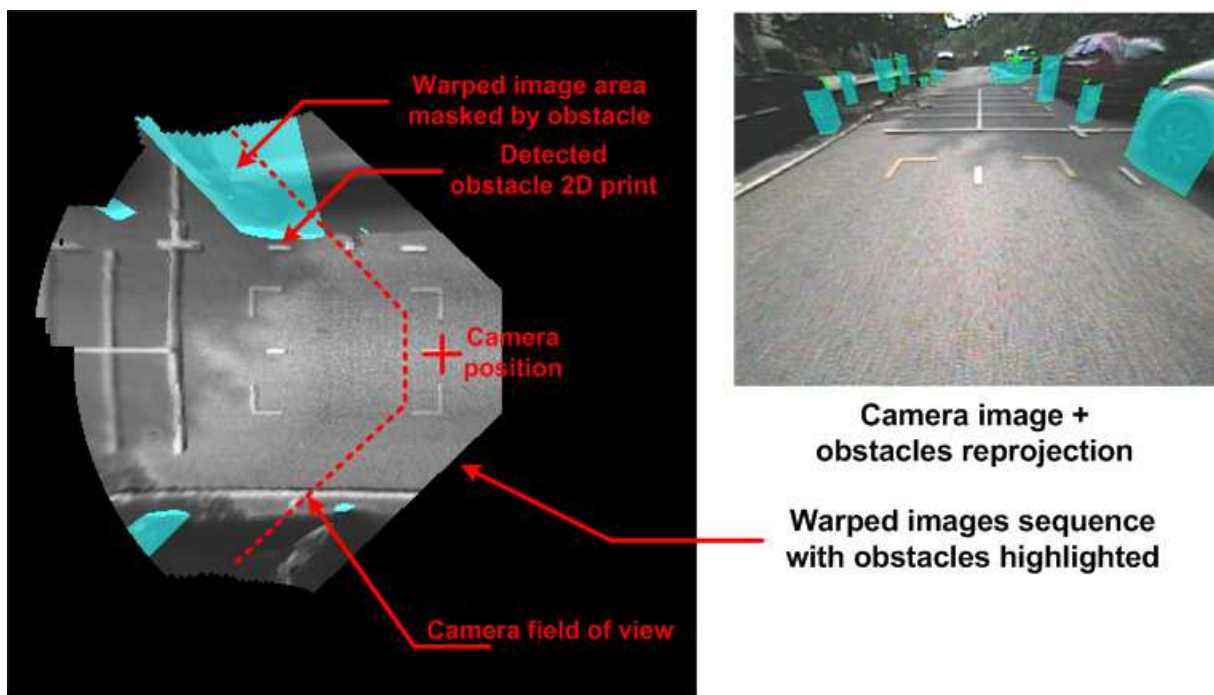


Figure 73 : Illustration du masquage des obstacles statiques

3. On détecte ensuite dans l'image I' tous les pixels supposés correspondre à des points de la route. On sait en effet que les pixels de la route sont par définition statiques. La détermination de l'appartenance d'un pixel au plan du sol se fait ici par le biais d'un algorithme de croissance de région uniforme appliqué à partir de points (appelés points sources ou "seeds") de l'image I' proches de la caméra et ayant été déterminé comme ne faisant partie ni d'un obstacle en mouvement, ni d'un obstacle statique (dont on connaît la position grâce à l'algorithme présenté précédemment). L'utilisation de plusieurs points sources permet de prendre en compte au maximum la texture éventuelle de la route (ombres portées marquages au sol, ...). Ceci nous permet donc de supprimer les problèmes dus aux changements d'illumination globale de la scène et souvent les problèmes d'ombres en léger mouvement (vent faisant bouger les feuilles d'un arbre par exemple). La Figure 74 montre le fonctionnement de cet algorithme de façon théorique et pratique.

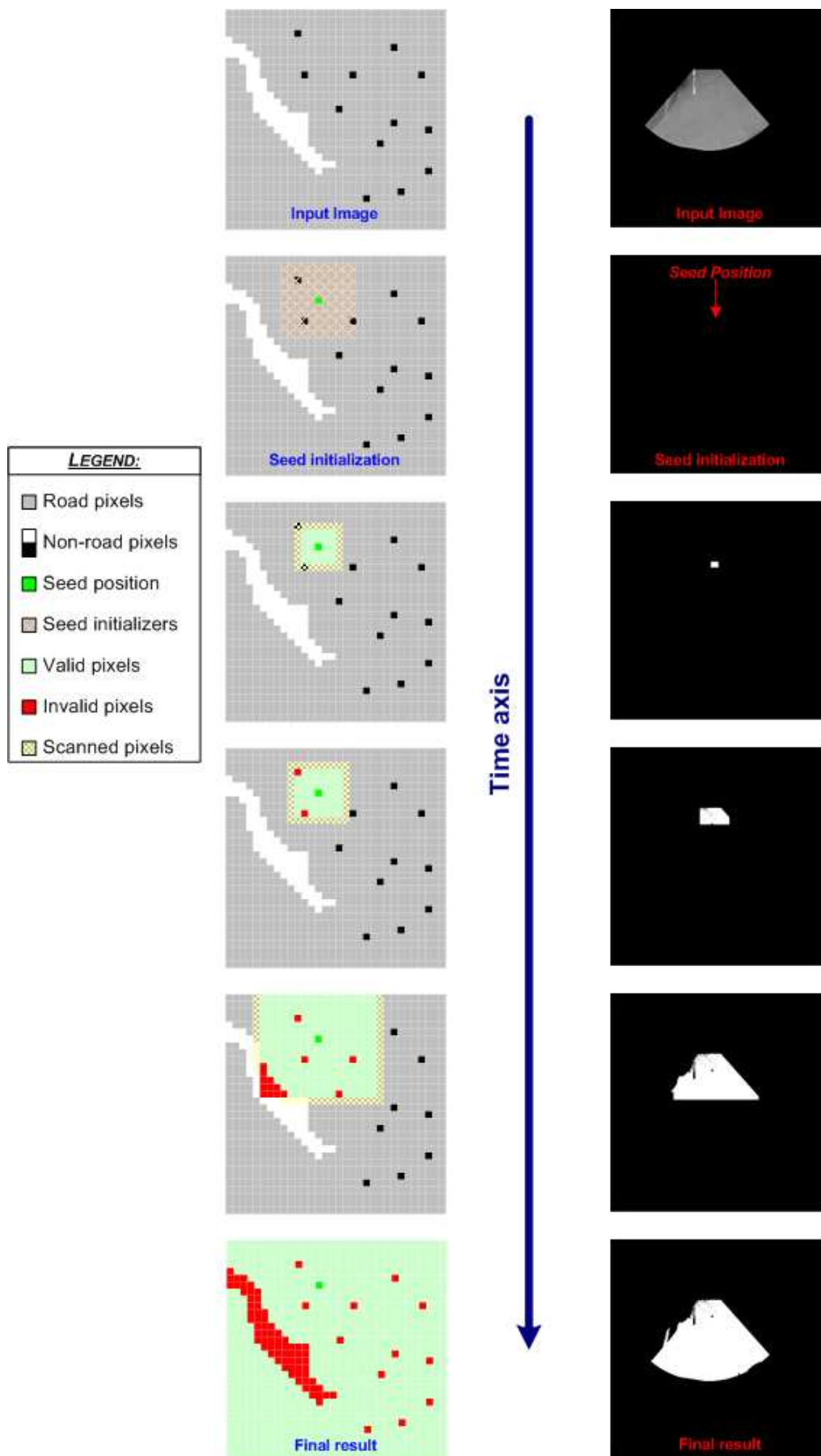


Figure 74 : Principe (gauche) et exemple (droite) de la détection de la route

4. L'image de référence est constituée par l'accumulation au cours du temps des pixels n'ayant pas été marqués précédemment comme appartenant à un mouvement. On cherche ainsi à s'assurer de ne pas inclure tout ou partie d'un mouvement dans l'image de référence.
5. Une fois ces 4 premières étapes effectuées on détermine la probabilité a priori pour chaque pixel de faire partie d'un mouvement. On crée ainsi une carte de probabilité de mouvement dont chaque pixel correspond à un pixel de l' et donc à une petite région du sol. Cette probabilité est calculée en fonction des critères suivants :
 - Historique de l'état de ce pixel dans les images précédentes. Un pixel ayant changé très souvent de couleur précédemment ne peut apporter une contribution aussi fiable qu'un pixel ayant toujours eu la même couleur et qui vient d'en changer subitement.
 - Historique de l'état du pixel (route, obstacles statiques, en mouvement, ...). Un pixel ayant toujours appartenu à la route et dont la couleur change brusquement et qui n'appartient plus à la route est probablement en mouvement. Un pixel appartenant à un obstacle statique précédemment et qui n'en fait soudainement plus partie est probablement toujours membre de cet obstacle qui n'est plus entièrement détecté.
 - Etat courant du pixel. Un pixel de la route a peu de chances d'être en mouvement de même qu'un pixel d'un obstacle statique n'est probablement pas vraiment en mouvement.
 - Etat précédent du mouvement. Un pixel qui était en mouvement et dont la couleur n'a pas changé est probablement toujours en mouvement.
6. Une fois la carte de probabilité obtenue, on s'attache à grouper les pixels dont la probabilité de mouvement est supérieure à un seuil fixé en régions connexes. Cette étape est nécessaire pour réduire la sensibilité au bruit de l'algorithme (en enlevant les régions trop petites qui ne peuvent correspondre à un objet en mouvement) mais aussi pour filtrer les mouvements apparents dus aux obstacles statiques ou à des variations de la planéité de la route. On filtre ainsi les fausses alarmes des mouvements réels. La Figure 75 montre ainsi comment est fait ce filtrage :
 - On crée tout d'abord une liste de régions connexes (appelés blobs) dont on calcule certaines caractéristiques (forme, surface, probabilité de mouvement totale, ...) à la volée.
 - On réalise un pré-filtrage de cette liste en supprimant tous les blobs dont la surface est inférieure à un seuil prédéfini. On fusionne dans le même temps les blobs dont la position par rapport à la caméra indique qu'ils pourraient faire partie du même objet vertical (on suppose donc que la majorité des obstacles en mouvement que l'on rencontrera sont quasiment verticaux).
 - On applique ensuite un filtrage flou des blobs restants basé sur les caractéristiques calculées précédemment. On calcule ainsi la probabilité pour chaque blob de correspondre à un objet en mouvement réel. Seuls les blobs dont la probabilité de correspondre à un mouvement réel est supérieure à un seuil sont considérés comme valides. Cette étape permet de plus d'ajouter une certaine sélectivité à l'algorithme en permettant de sélectionner seulement les blobs dont l'apparence est semblable à certains critères. On peut ainsi ne conserver que les blobs appartenant à des humains en préférant les blobs longs et fins. On pourra aussi sélectionner les véhicules en cherchant des blobs grands et larges. On pourra ainsi donner des a priori sur le type d'objet en mouvement qui a été détecté.
7. On localise alors la position du point de contact de chaque mouvement validé qui est considérée comme la position réelle de l'objet en mouvement. On peut alors utiliser cette sortie pour représenter la position des obstacles en mouvement au conducteur (comme le montre la Figure 76) ou comme une entrée pour le cindynamètre.

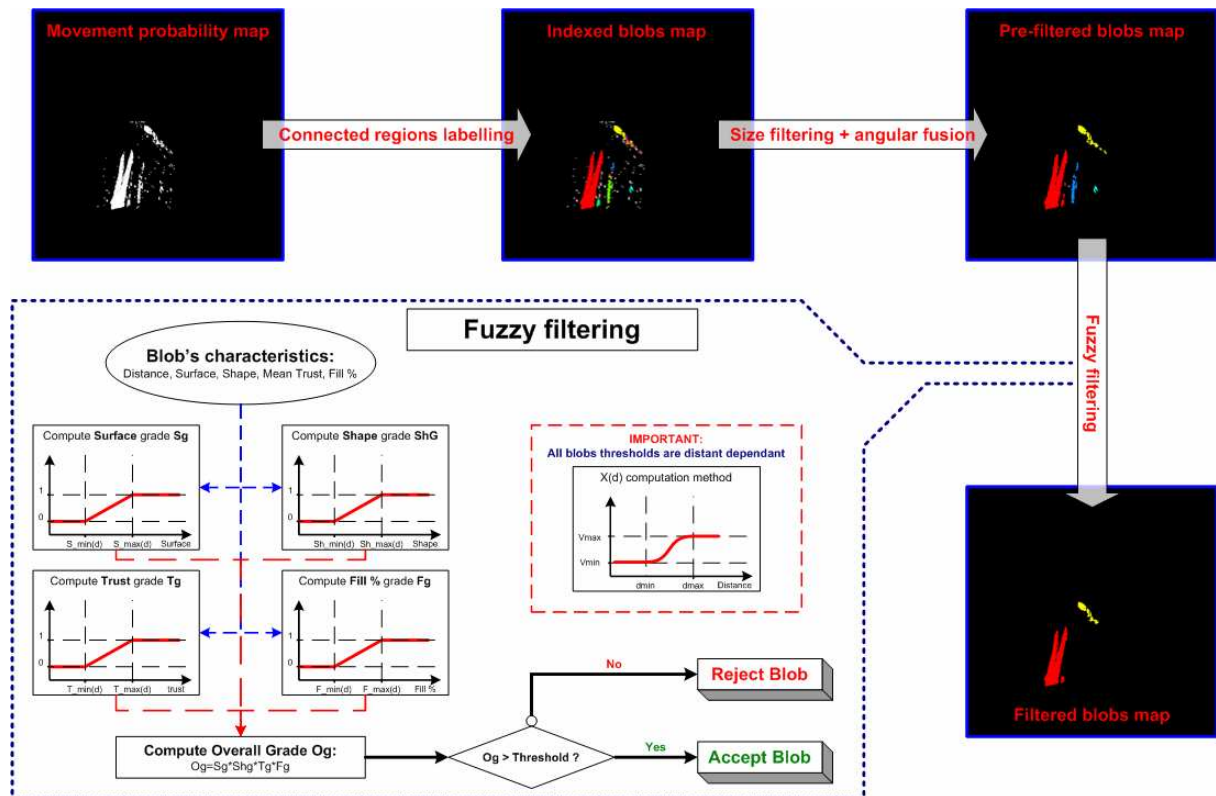


Figure 75 : Illustration du filtrage des hypothèses de mouvement [Wybo 07]

V - 4. 1. 1. 2. d/ Validation de l'algorithme de détection de mouvement et conclusion

L'analyse rapide du mode de fonctionnement de l'algorithme de détection d'obstacles que nous avons réalisé montre que l'efficacité du système dépend grandement de notre faculté à caractériser et à grouper correctement chaque pixel de la carte de probabilité a priori du mouvement. Afin d'évaluer correctement nos performances nous avons réalisé un grand nombre de séquences de test (environ 100 séquences contenant plus de 200 images chacune) sur lesquelles nous avons manuellement extraits les données de référence auxquelles nous avons ensuite comparé les résultats expérimentaux. Ces séquences sont de toutes sortes comme le montre la Figure 77 qui présente trois situations distinctes (nombreux piétons, route très texturée et séquence de nuit avec gaz d'échappement en mouvement).

Les résultats obtenus sont très encourageants puisqu'à l'heure actuelle nous obtenons un taux de détection par image¹⁹ de 96% (amélioré²⁰ encore par rapport aux résultats présentés dans [Wybo 07]) avec un taux de fausse alarme inférieur à 4%. La précision de la localisation a été évaluée à $1\% \pm 4\%$ en distance et $0.03 \text{ rad} \pm 0.003 \text{ rad}$ en position latérale. Enfin, le temps de calcul sur un PC moderne (Pentium IV 3GHz) s'élève à 30ms ce qui permettrait un traitement à plus de 30 images par seconde bien que nous n'utilisons qu'une fréquence d'acquisition à 10 images par seconde amplement suffisante pour la détection de mouvement. Ce temps de traitement peut être réduit en diminuant simplement la précision de localisation souhaitée sachant qu'une réduction par deux de la précision entraîne une réduction par 4 environ des temps de calcul.

¹⁹ On analyse les résultats image par image afin de s'assurer de la fiabilité de l'algorithme. De nombreux auteurs tels que [MobilEye] communiquent quant à eux sur le taux de détection par objet qui est ainsi beaucoup plus haut puisque la détection dans une image uniquement permet de détecter l'objet.

²⁰ Il faut noter que les résultats présentés sont supérieurs à ceux présentés dans [Wybo 07] du fait de l'utilisation de filtrages additionnels à ceux présentés ici. Ces nouveaux filtrages ne peuvent malheureusement pas être encore présentés puisqu'ils n'ont pas encore été protégés par brevet au contraire du reste de l'algorithme.

On a ainsi réalisé un détecteur d'obstacles en mouvement offrant des résultats très encourageants. D'avantages de développement ainsi que la fusion de ses résultats avec les données fournies par un télémètre devraient permettre d'obtenir des résultats encore meilleurs et d'offrir au cindynamètre un moyen de détection fiable des obstacles très proches du véhicule.

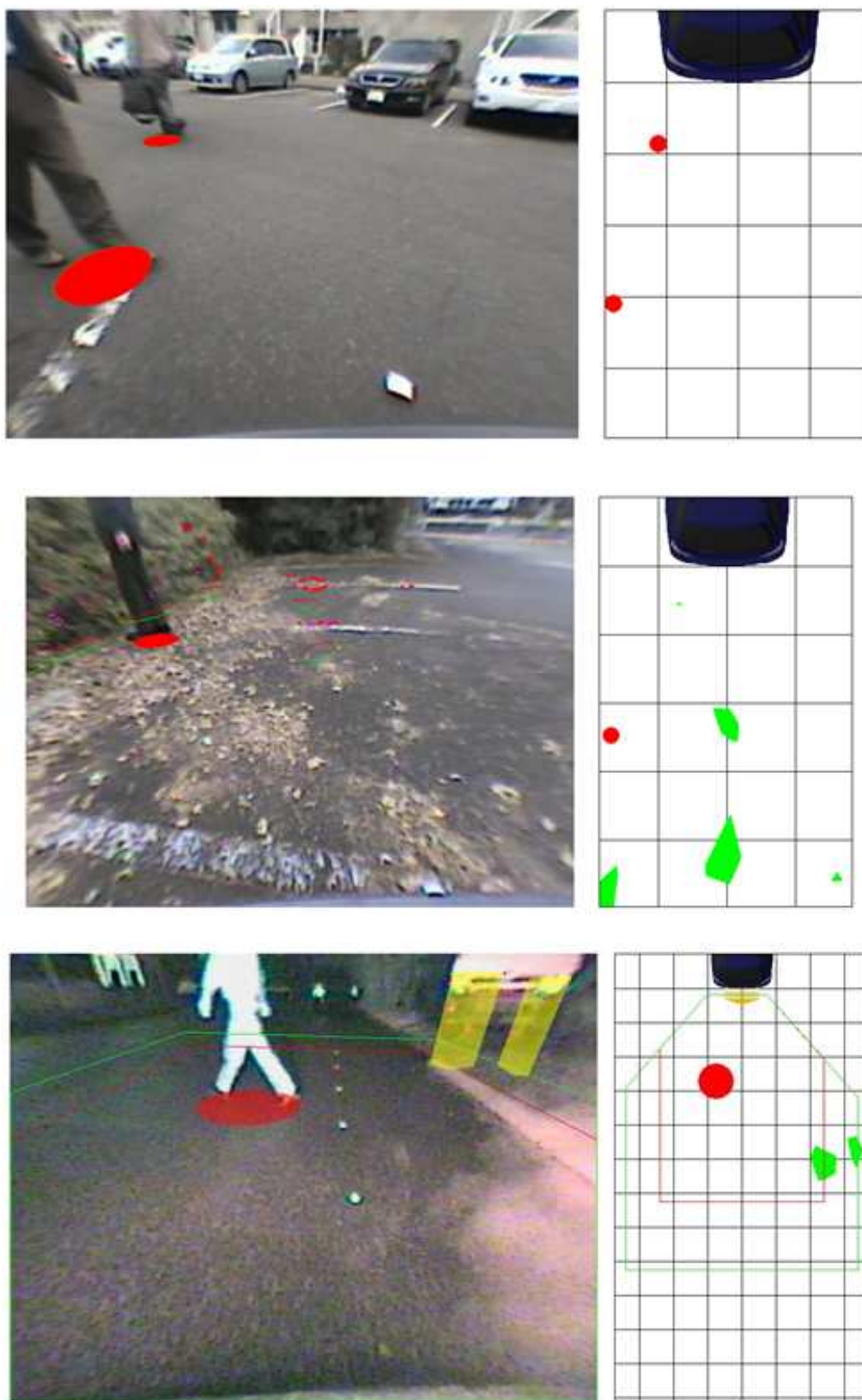


Figure 76 : Exemples des résultats de détection du mouvement obtenus [Wybo 07]

V - 4. 1. 2. Détection d'obstacles à distance moyenne à longue

Dans le cas de l'observation de l'environnement lointain du véhicule les approches par "Shape from motion" utilisée dans [Fintzel 04], [Vestri 05] (que nous avons brièvement présenté précédemment) sont difficilement applicables. Elles supposent en effet que l'environnement de la caméra en mouvement reste fixe (ce qui est rare en condition de conduite normale) et que la pose (position 3D et angles de rotation) puisse être connue précisément (ce qui est difficile lorsque le véhicule circule à 50km/h ou plus sur des routes non planes). Enfin, la forte vitesse du véhicule crée, avec des caméras classiques (c'est-à-dire acquérant les images entrelacées), des effets d'entrelacement forts très nuisibles pour la qualité des reconstructions tridimensionnelles.

Nous avons ainsi choisi d'utiliser des approches basées sur la connaissance a priori de la forme des obstacles à détecter puisqu'elles sont beaucoup moins dépendantes de l'estimation correcte de la pose de la caméra et qu'elles peuvent traiter les obstacles mouvants. Enfin, ces méthodes permettent, moyennant une connaissance approximative de la forme tridimensionnelle des obstacles, une localisation approximative des obstacles. Nous comptons alors sur les données télémétriques pour nous fournir une localisation plus précise. Ces données auront aussi pour tâche de fournir la détection d'obstacles dont la forme n'était pas cherchée. Il s'agit là d'un des points faibles de ces méthodes à base de reconnaissance de formes qui ne permettent de détecter que les objets cherchés (ainsi si l'on ne cherche que des humains on ne pourra pas détecter les véhicules).

Dans un premier temps nous nous sommes focalisés sur la détection de véhicules tant ceux-ci sont importants dans la tâche de conduite courante. Nous rappelons ici les développements présentés dans [Wybo 00] qui ont servi de support à [Steux 01].

La détection de véhicules a donné lieu à de très nombreuses recherches depuis des années. Nous inspirant de celles-ci, nous avons proposé un algorithme basé sur le suivi dans l'image de zones contenant potentiellement un véhicule. Ces zones peuvent être initialisées de différentes façons (pseudo aléatoirement, par d'autres algorithmes de vision ou grâce à une source extérieure comme un télémètre par exemple) puis leurs caractéristiques extraites. Enfin, on évalue dans ces zones la probabilité qu'elles contiennent un des obstacles recherchés (on s'intéressera ici au cas de véhicule tout en notant bien que cette approche peut être utilisée de façon similaire pour d'autres obstacles – humains, animaux...).

V - 4. 1. 2. 1. Initialisation des hypothèses :

Comme précisé précédemment nous avons la possibilité d'utiliser trois sources afin d'initialiser les hypothèses de présence de véhicule, qui seront validées ou non par la suite :

- Par la vision, en l'occurrence par la détection de zones potentiellement intéressantes (ici grâce à la détection de l'ombre visible sous chaque véhicule par exemple).
- Par une initialisation aléatoire ne requérant pas de traitements supplémentaires.
- Par une initialisation des zones de recherche grâce aux informations fournies par un télémètre.

V - 4. 1. 2. 1. a/ Détection d'ombres :

Cet algorithme, proposé par B. Steux, repose sur la détection de l'ombre que crée un véhicule lorsqu'il roule sur une route. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un algorithme de suivi puisqu'il consiste à détecter à chaque nouvelle image les zones d'ombres qui apparaissent sur la route, construisant ainsi des hypothèses de véhicules. On notera que cet algorithme n'utilise que les informations de luminance et qu'il reste donc valable pour les images monochromes. On travaille donc sur le plan Y uniquement ce qui accélère grandement les calculs. Cet algorithme fonctionne de la façon suivante :

- Extraction de la "couleur" (luminosité) moyenne de la route
- Extraction des zones les plus sombres
- Fusion des régions connexes ainsi détectées
- Création d'une hypothèse ou rattachement à un obstacle existant

Cet algorithme ne fonctionne pas du tout sur les véhicules noirs du fait de l'impossibilité de différencier l'ombre du véhicule. De même, il nécessite un éclairage convenable pour avoir une bonne qualité de détection et donc de suivi, les ombres étant alors beaucoup plus contrastées. Enfin, nous avons noté expérimentalement que cet algorithme fonctionnait beaucoup plus efficacement pour des cibles proches du véhicule que pour des cibles lointaines. En effet, plus la cible est éloignée, plus son ombre est petite et peu contrastée ce qui rend la détection très difficile.

On donne Figure 77 un exemple de résultat obtenu par détection d'ombres sur une image de mauvaise qualité avec un véhicule proche. On peut s'apercevoir que le véhicule distant n'est pas détecté, ce qui est un des points faibles de cette méthode.

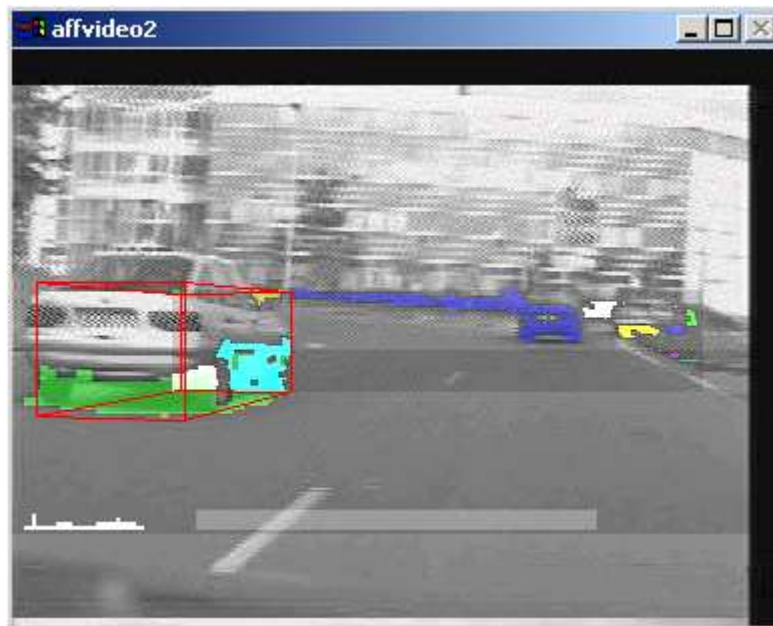


Figure 77 : Résultat de détection d'ombres sur une image réelle [Steux 01]

V - 4. 1. 2. 1. b/ Génération pseudo-aléatoire :

Ce deuxième algorithme est basé quant à lui sur un raisonnement de type Monte-Carlo à base de tirage de points aléatoires. Cet algorithme génère des hypothèses de véhicule aléatoirement dans les zones pouvant contenir un véhicule. Cette génération se fait dans la partie inférieure de l'image (jusqu'à la ligne d'horizon) correspondant à la route. L'utilisation de l'algorithme de détection de la route, que l'on présentera dans la section V - 5, permet de diminuer encore la taille de la zone d'initialisation mais réduit la probabilité de détection d'un véhicule situé sur le bas côté ou dans une zone non détectée de la route.

On crée alors dans l'image une première zone de recherche carrée d'une taille prédéfinie dans laquelle on applique l'une des méthodes de suivi. Il est possible d'utiliser une taille de fenêtre dépendant de la position de l'hypothèse de façon à correspondre au mieux à la taille estimée a priori d'un véhicule en cette position. Néanmoins l'expérimentation a montré que même si la première zone de recherche s'avère inexacte, l'algorithme de suivi et de validation permet d'adapter sa taille en quelques itérations.

Cette méthode s'est ainsi montrée relativement efficace pour détecter les cibles mais relativement lente²¹. En effet, chaque nouvelle cible ainsi créée demande l'application des algorithmes de suivi et certaines de ces nouvelles cibles ne disparaissent pas immédiatement si elles sont fausses. De plus, pour avoir une fréquence suffisante de détection des nouvelles cibles, il faut effectuer des tirages très régulièrement. Ces deux faits ajoutés, on obtient très rapidement un très grand nombre de cibles à suivre ce qui ralentit énormément le système.

²¹ Sur un PC de 2000, une machine moderne n'aurait aucun mal à utiliser cet algorithme mais on vise cependant à réduire la charge de calcul étant donné l'ensemble des calculs nécessaires au cindynamètre.

V - 4. 1. 2. 1. c/ Génération par capteurs externes :

Cette troisième méthode permet d'utiliser avantageusement la détection d'obstacles par les télémètres en utilisant les cibles ainsi créées pour initialiser le suivi dans l'image. Pour se faire, on calcule la position de la cible dans l'image en supposant le monde plan (pour un télémètre ne fournissant pas l'information d'altitude comme un radar par exemple) ou en projetant directement l'information 3D dans l'image (dans le cas d'un télémètre fournissant l'élévation des obstacles détectés comme un télémètre laser multi plans). On obtient ainsi un point autour duquel on crée une zone de recherche de la même façon que pour la méthode pseudo-aléatoire.

Cette méthode a l'avantage d'être beaucoup plus rapide que la génération pseudo-aléatoire puisque les hypothèses sont formées sur des cibles a priori valides. Elle est aussi beaucoup plus rapide que la méthode par détection des ombres puisqu'elle ne requiert pas de traitement additionnel. Néanmoins, elle reste limitée à la détection par le télémètre.

V - 4. 1. 2. 1. d/ Synthèse

Au vu des avantages et problèmes respectifs de ces trois méthodes nous avons utilisé la fusion de ces trois méthodes. L'initialisation par le biais des capteurs externes a été conservée intacte. La recherche des ombres a été limitée aux zones appartenant à la route détectée de façon à limiter le nombre de fausses alarmes. Enfin, l'initialisation pseudo-aléatoire a été conservée avec une fréquence et une densité d'hypothèses moindre afin de n'intervenir qu'en complément des deux méthodes précédentes. Cette moindre densité se justifie par ailleurs par la forte probabilité que les cibles présentes dans la scène aient été détectées par l'une des deux autres méthodes.

V - 4. 1. 2. 2. Algorithmes de suivi :

Nous présentons ici les différents algorithmes qui ont été développés pour permettre un suivi efficace des véhicules dans une séquence vidéo. Il faut noter que notre but n'était pas d'obtenir un algorithme unique donnant des *résultats corrects dans tous les cas* mais plutôt d'obtenir plusieurs algorithmes donnant de *très bons résultats dans un grand nombre de cas*. En effet, un ensemble d'algorithmes fonctionnant dans 50% des cas et dont les résultats sont aisément fusionnables permettra souvent d'obtenir de meilleurs résultats qu'un algorithme unique perfectionné à l'extrême.

Enfin on a essayé dans tous ces algorithmes de permettre la réutilisation des résultats de façon à pouvoir accélérer l'exécution de ces nombreux algorithmes simultanément. Il ne sert en effet à rien de faire un seuillage d'une image à 150 puis un seuillage de la même image à 130 si le gain en qualité de résultat est faible devant le coût du calcul supplémentaire.

V - 4. 1. 2. 2. a/ Détection d'ombres :

Le détecteur d'ombre utilisé pour l'initialisation des hypothèses est aussi utilisé pour leur suivi et en particulier pour le suivi des hypothèses créées par une des autres méthodes.

V - 4. 1. 2. 2. b/ Détection des feux arrière :

Alors que l'algorithme de détection des ombres est utilisé à la fois pour la détection et le suivi des véhicules, l'algorithme de détection de phares ne fonctionne pour le moment que pour le suivi. Il pourrait néanmoins facilement être utilisé pour la détection de cibles potentielles.

Il repose sur le simple fait que les véhicules ont théoriquement tous (à l'exception notoire des deux roues) une paire de feux de stop à l'arrière (associés à un feu de stop central pour tous les véhicules récents). Ces feux étant rouges, ils sont relativement facilement détectables dans une zone restreinte de l'image et donnent ainsi relativement efficacement la position du véhicule (la position des feux de stop est commune à tout les véhicules : aux extrémités latérales, à environ 80 cm du sol).

On notera que la recherche des feux à l'arrière du véhicule ne requiert pas que ces feux soient allumés. En effet ces feux émettent une lumière rouge grâce à la couleur du plastique les protégeant. C'est la couleur de ce plastique qui nous permet la détection. Cependant, l'allumage de ces feux nous fournira une information de couleur beaucoup plus contrastée et donc une détection beaucoup plus simple.

Le principe de cet algorithme est donc relativement simple :

- Recherche dans l'image des zones à forte saturation rouge
- Appariement de ces zones si on a seulement une paire de feux
- Recherche de structures plus complexes : ensemble de feux de stops latéraux, feu de stop central, plaque d'immatriculation jaune
- Génération d'hypothèses de cibles

Cet algorithme est généralement couplé à l'algorithme de détection d'ombres permettant ainsi de vérifier les hypothèses et de suivre un véhicule dans le cas où il aurait été détecté précédemment. Il faut noter que la nature de cet algorithme le rend totalement inefficace sur les véhicules rouges (pas de possibilité d'appariement).

V - 4. 1. 2. 2. c/ Détection de lignes horizontales :

Contrairement aux cas précédents, l'algorithme de détection des lignes horizontales a été développé principalement pour le suivi de véhicules. En effet, il repose sur une méthode de suivi exploitée par la plupart des algorithmes suivants et qui consiste à faire une recherche de certaines propriétés caractéristiques du véhicule dans un voisinage restreint de la position de la cible à l'instant précédent. Cette méthode permet de limiter les calculs nécessaires et donc d'accélérer l'algorithme tout en limitant l'effet du bruit et des objets alentours qui pourraient contenir une ou plusieurs de ces caractéristiques.

L'algorithme de détection de lignes horizontales utilise la présence de nombreuses lignes horizontales de longueur à peu près égale à l'arrière d'une voiture pour suivre sa cible. On utilise pour cela un filtre de Sobel horizontal (Figure 78) qui permet d'obtenir les zones de contraste vertical très fort (la frontière horizontale entre un demi-plan blanc et un demi-plan noir), tout en ne détectant pas les contrastes horizontaux. Le filtre utilisé est un filtre classique en traitement d'images représenté par le masque qui lui est associé :

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Figure 78 : Masque associé au filtre de Sobel horizontal 3x3

L'image obtenue est alors la valeur absolue de l'image obtenue par application de ce masque afin de rendre les données facilement utilisables (on cherche les zones de forts contrastes mais on ne veut pas distinguer une frontière blanc vers noir d'une frontière noir vers blanc).

Il faut noter néanmoins que ce filtre a pour propriété intrinsèque d'amplifier le bruit présent dans toute image réelle (dans une moindre mesure qu'un filtre de Prewitt puisque le filtre de Sobel est issu de la convolution d'un tel filtre de taille 1 – de la forme [-1 0 1] donc – avec un filtre passe-bas gaussien ayant tendance à réduire le bruit) et on est donc obligé d'effectuer un filtrage passe-bas additionnel de l'image au préalable pour obtenir des résultats moins bruités. Pour ce faire, on utilise un filtre gaussien 3x3 (Figure 79) qui permet d'effectuer un filtrage passe-bas sur l'image en approximant la forme d'un sinus cardinal bidimensionnel (transformée de Fourier d'une porte bidimensionnelle dans le domaine fréquentiel). On donne à titre de rappel le masque associé au filtre gaussien utilisé :

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 79 : Masque associé au filtre gaussien 3x3

On notera ensuite que l'application d'un filtrage de Sobel horizontal près des bords de l'image fait apparaître des lignes horizontales sur le haut et le bas de l'image. Le filtrage se fait donc une fois par image et la zone de recherche de la cible est ensuite appliquée sur l'image résultante afin de ne pas être perturbée par ces effets de bord. De plus cette méthode, même si elle oblige à appliquer un filtrage sur toute l'image, ne ralentit que très peu l'exécution, car le programme de ce filtrage a été optimisé, et permet d'avoir un temps d'exécution constant quelque soit le nombre de cibles suivies.

Enfin, pour faciliter l'exploitation de l'image des contrastes verticaux on utilise un seuillage permettant de ne conserver que les zones de plus forts contrastes qui incluent le plus souvent les lignes caractéristiques cherchées. Il faut cependant noter que la détermination de la valeur d'un seuil optimal dépend fortement de la qualité de l'image ainsi que des conditions d'illumination. Nous avons donc préféré rendre l'algorithme de suivi robuste au choix de ce seuil nous permettant ainsi d'utiliser un seuil unique quelques soient les conditions.

La Figure 80 montre le résultat d'une opération de filtrage puis seuillage sur une image extraite des séquences vidéo disponibles (Figure 81). On notera que les couleurs ont été inversées pour les besoins de l'impression et on distinguera les deux boîtes englobantes autour du véhicule (la plus grande représentant la zone de recherche à l'instant suivant, la petite indiquant le véhicule).

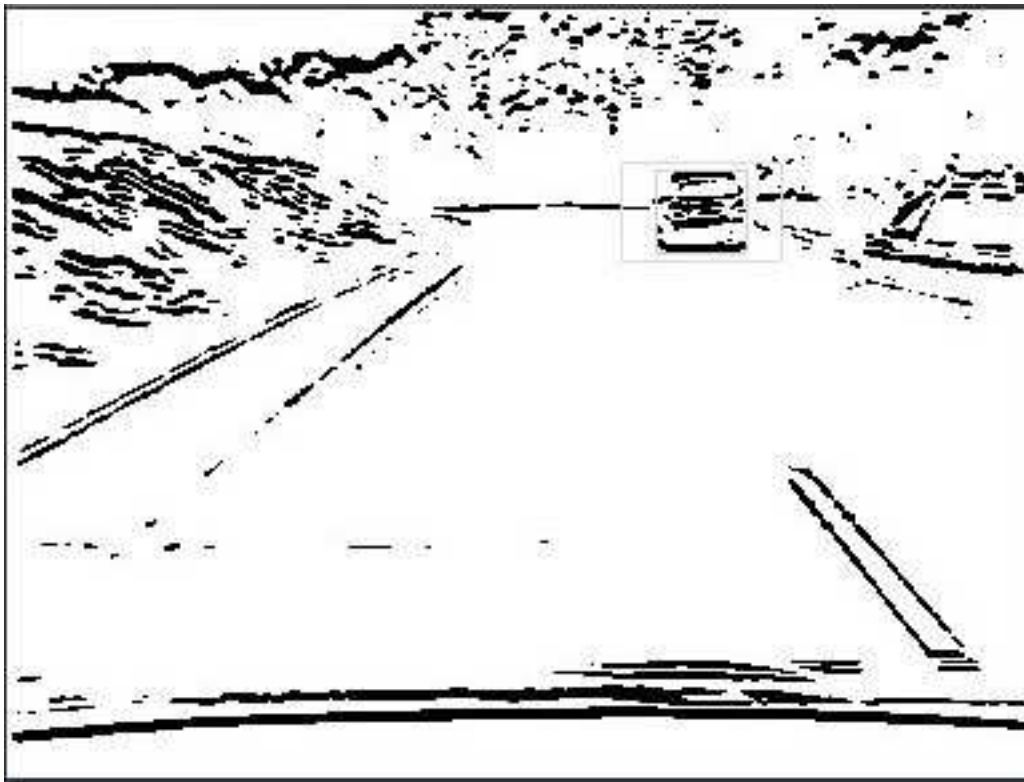


Figure 80 : Lignes horizontales dans une image réelle [Wybo 00]

Le seuillage pourra être fait sur chaque zone de recherche plutôt que sur l'image entière si l'on souhaite augmenter la performance de l'algorithme au maximum mais là encore le gain en temps d'exécution reste minime. Un tel seuillage indépendant pour chaque zone de recherche trouverait en fait son utilité pour adapter la valeur du seuillage aux conditions de contraste spécifique à chaque cible potentielle. Nous n'avons cependant pas exploré plus précisément cette possibilité compte tenu des performances obtenues.

Finalement, nous avons utilisé le principe suivant pour réaliser cet algorithme. On suppose ici que la position de la cible est connue à l'instant précédent.

1. Filtrage passe-bas de toute l'image à l'aide du filtre gaussien
2. Application du filtre de Sobel horizontal 3x3
3. Seuillage de l'image issue de l'étape 2

4. Détermination des zones de recherche définies comme l'agrandissement par un facteur d'échelle fixe des boîtes englobantes des cibles à l'instant précédent.
5. Extraction de la nouvelle boîte englobante de chaque cible selon les étapes suivantes :
 - a. Parcours de la zone de recherche le long de l'axe médian vertical
 - b. Pour chaque pixel non nul on parcourt l'axe horizontal à droite et à gauche jusqu'à un pixel nul
 - c. La boîte englobante contient tous les pixels non nuls rencontrés.

La recherche de la nouvelle boîte englobante se fait de façon relativement archaïque et pose certains problèmes dus au bruit. En effet il n'est pas rare que les extrémités hautes et basses de cette boîte soient mal placées du fait de l'apparition d'un point de contraste au-dessus (trou dans le branchage dans une scène de forêt par exemple) ou au-dessous (lors du croisement avec un passage clouté par exemple).

Néanmoins, ces problèmes n'ont que peu d'influence sur le suivi car ils n'ont comme conséquence que l'augmentation légère de la zone de recherche. Par contre, il arrive que cet algorithme perde sa cible au bout de quelques trames ce qui est beaucoup plus grave. Ceci se produit le plus souvent lorsque le véhicule passe près d'une ligne d'horizon, ce qui provoque un déplacement latéral de la boîte englobante et à terme une perte de la cible, ou lorsque la ligne de toit disparaît (contraste trop faible entre la scène et le toit du véhicule) ce qui se traduit par une réduction de la boîte englobante au pare-chocs et à l'ombre (la cible est alors perdue dans de très rares cas lorsque l'ombre et la route ne sont quasiment plus distinguables).

Malgré ces problèmes le suivi des cibles s'est avéré relativement robuste sur les séquences dont nous disposons, certains véhicules étant suivis correctement pendant plusieurs minutes. On donne, Figure 81, une image (dont est tirée la Figure 80) issue des séquences vidéos disponibles sur laquelle on distingue bien les deux boîtes englobantes (en bleu) représentant la cible (boîte la plus petite) et la future zone de recherche (grande boîte). On peut aussi remarquer le marquage rouge qui correspond à l'approximation du modèle du véhicule, celle-ci est construite par un algorithme que nous détaillerons par la suite (voir section V - 4. 1. 2. 4). On peut néanmoins s'apercevoir que ce modèle est approximativement bien positionné ce qui aura son importance par la suite.

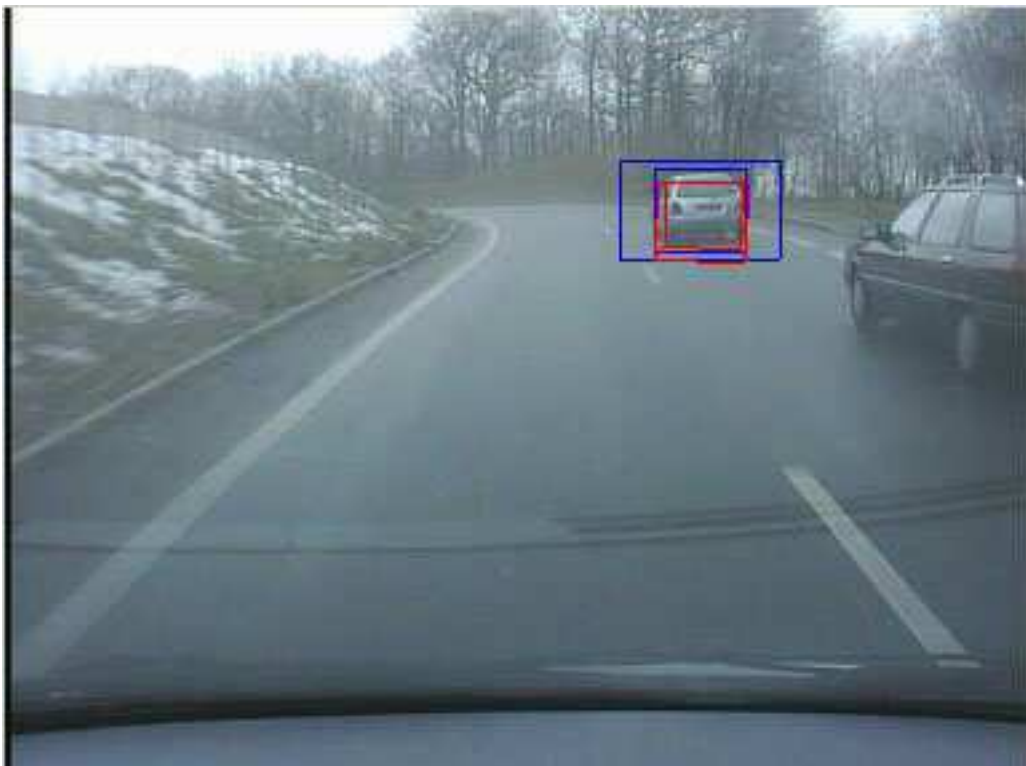


Figure 81 : Résultat du suivi de cibles dans une séquence réelle [Wybo 00]

V - 4. 1. 2. 2. d/ La détection des lignes verticales :

Cet algorithme repose sur le même principe que le précédent. En effet, on peut remarquer que les bords des véhicules contrastent souvent avec le reste de la scène. C'est donc pour cette raison que nous avons utilisé cet algorithme. Il utilise lui aussi un masque de filtre de Sobel, cette fois le masque associé au filtre de Sobel vertical 3x3 (Figure 82).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Figure 82 : Masque associé au filtre de Sobel vertical 3x3

On utilise ici encore un filtre gaussien avant de procéder à l'extraction des lignes verticales de façon à réduire l'influence du bruit. L'application du filtre de Sobel ainsi que le seuillage de l'image résultant se font ici encore sur toute l'image plutôt que pour chaque cible. L'application de cette première étape à partir d'une séquence vidéo donne une image beaucoup moins bruitée au niveau du sol qu'avec une extraction des lignes horizontales comme on peut le voir sur la Figure 83²².

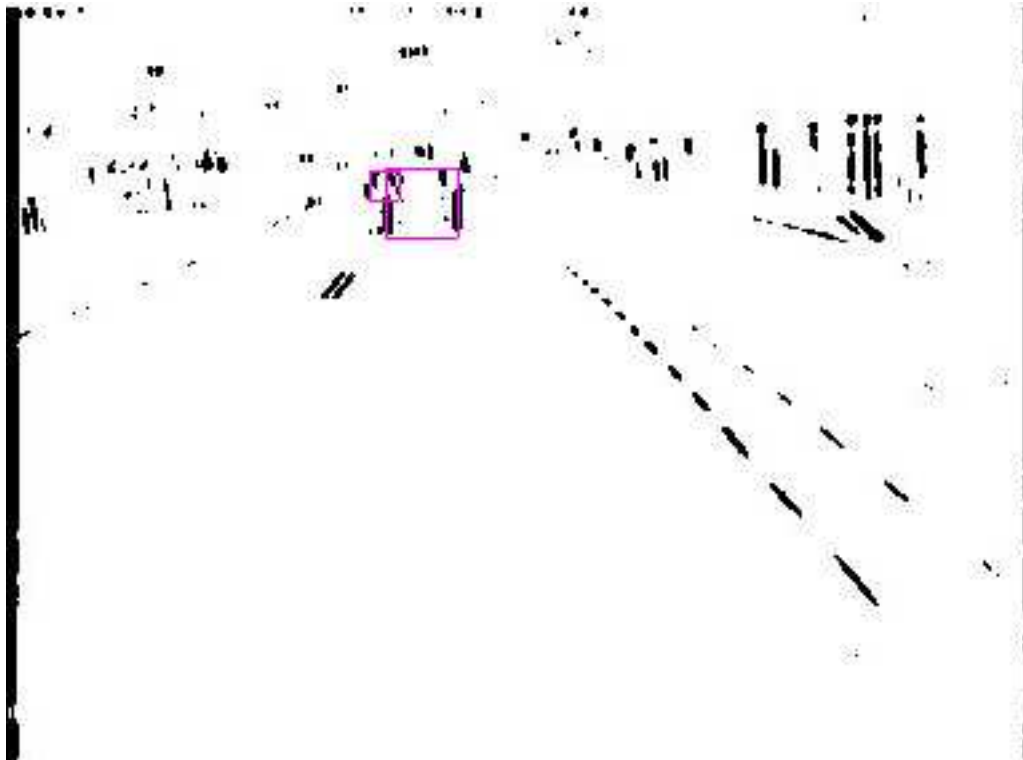


Figure 83 : Extraction de lignes verticales dans une image réelle [Wybo 00]

On notera que seul le bas des véhicules (encadrés en rose) est distinguable et que très peu d'éléments extérieurs offrent un profil identique, c'est à dire deux lignes verticales parallèles de même longueur. Cette caractéristique rend donc cette méthode particulièrement efficace pour la détection du positionnement des véhicules et pour l'obtention de leur largeur (qui comme on le verra par la suite permet de déterminer assez précisément leur distance). Malheureusement, cet algorithme n'offre pas une détection correcte du haut du véhicule ce qui ne permettrait donc pas d'obtenir une boîte englobante correcte.

²² Ici encore les couleurs ont du être inversées pour les besoins de l'impression.

C'est donc pour cette raison que nous avons couplé la détection des lignes horizontales, pour obtenir les points hauts et bas du véhicule, et la détection des lignes verticales pour l'obtention des extrémités gauche et droite du véhicule. Les boîtes englobantes de la Figure 83 sont ainsi obtenues à partir de la combinaison de ces deux algorithmes. La Figure 84 montre l'image de départ avec les deux véhicules suivis alors que la Figure 85 montre cette même image après extraction des lignes horizontales.

Les résultats obtenus par cette méthode combinée sont alors excellents puisque l'on bénéficie de la stabilité latérale de la méthode d'extraction des lignes verticales avec l'efficacité de la méthode d'extraction de lignes horizontales pour la détection des extrémités hautes et basses.

On peut de plus remarquer sur les Figure 83, Figure 84 et Figure 85 que cette méthode permet par la même occasion de suivre des véhicules qui peuvent être extrêmement éloignés du véhicule de test. Le deuxième véhicule est ainsi à une distance estimée de 82 mètres. Ceci prouve clairement l'avantage d'une telle méthode par rapport à une méthode de détection d'ombres qui perd de son efficacité à une trentaine de mètres, ce qui correspond à la position du premier véhicule dans la Figure 84.



Figure 84 : Résultat du suivi par extraction des lignes horizontales et verticales sur une image réelle [Wybo 00]



Figure 85 : Extraction des lignes horizontales lors du suivi par extraction combinée des lignes horizontales et verticales [Wybo 00]

V - 4. 1. 2. 2. e/ Suivi par utilisation de modèles :

Cet algorithme provient d'une méthode de détection d'objets mouvants utilisée en vidéosurveillance [Lipton 98]. Cette méthode consiste à détecter les zones en mouvement et à essayer de reconnaître un objet déjà connu à partir d'un modèle qui a été créé lors de sa première apparition. Ce modèle est ensuite mis à jour par une combinaison linéaire du modèle à l'instant t et $t-1$. La reconnaissance de chaque objet se fait par le calcul de la corrélation entre les différents modèles disponibles et la zone en mouvement dans l'image filmée.

Malheureusement, malgré ses résultats apparents très bons, cette méthode ne peut s'appliquer de la même façon dans notre cas. En effet, nous ne pouvons utiliser le critère de zones en mouvement dans notre contexte puisque, contrairement au cas de la vidéosurveillance, la caméra est-elle même en mouvement par rapport à son environnement.

Néanmoins des études précédentes avaient montré la faisabilité d'une détection d'objets connus dont les modèles étaient stockés dans une base [Betke 94] à partir d'une caméra en déplacement et en recherchant dans la totalité de l'image. Cette méthode se basait là encore sur le calcul de la corrélation entre une zone de l'image et les modèles de la base, même si dans ce cas la recherche se faisait dans la totalité de l'image.

Nous avons donc entrepris d'utiliser un compromis entre ces deux méthodes pour obtenir une méthode qui serait capable de suivre un modèle créé lors de l'acquisition de la cible, qui se mettrait à jour automatiquement et qui ne nécessiterait pas trop de calculs. Nous avons ainsi commencé par choisir une formule de calcul du coefficient de corrélation entre deux images. Pour se faire, et afin que ce coefficient ne dépende pas de la luminosité dans l'image, nous avons choisi d'utiliser le coefficient d'intercorrélation normalisé défini Figure 86.

$$\frac{\sum_{i,j} [I(i,j) - \bar{I}] \cdot [T(i,j) - \bar{T}]}{\sqrt{(\sum_{i,j} [I(i,j) - \bar{I}]^2) \cdot (\sum_{i,j} [T(i,j) - \bar{T}]^2)}}$$

Figure 86 : Coefficient de corrélation normalisé

Nous avons ensuite appliqué cette formule pour calculer, à l'intérieur de la zone de recherche, la corrélation entre l'image de la cible précédente et la nouvelle image. Cette méthode oblige alors à effectuer de nombreux calculs puisqu'il faut parcourir la totalité de la zone de recherche et calculer en chaque point le coefficient de corrélation, mais aussi car il faut élargir ou réduire le modèle pour tenir compte du changement de taille de la cible dans le cas où sa vitesse relative serait grande en valeur absolue. Le temps de calcul reste ainsi raisonnable pour un modèle et une zone de recherche de faibles tailles mais devient extrêmement pénalisant pour des cibles proches.

V - 4. 1. 2. 3. Algorithmes d'évaluation :

Afin d'évaluer la qualité des hypothèses générées et de permettre l'élimination des cibles ne correspondant pas à un véhicule nous avons développé des algorithmes permettant de donner à chaque hypothèse une note de confiance quant à la validité de cette cible comme véhicule.

V - 4. 1. 2. 3. a/ Note d'aspect :

Ce premier algorithme est l'un des plus simples et permet d'évaluer relativement correctement la qualité de détection du véhicule. Pour se faire, il se base sur le ratio entre la largeur et la hauteur de la boîte englobante de chaque cible. En effet, ce ratio reste constant quelque soit la distance à la cible (moyennant l'erreur introduite par la discrétisation de l'image) ce qui permet de s'affranchir de l'erreur d'estimation en distance. De plus, il se révèle relativement constant quelque soit la voiture cible, la taille des voitures étant relativement normalisée (1 mètre 70 de large et environ 1 mètre 45 de hauteur).

Nous avons ainsi un critère qui permet de déclarer qu'une détection est mauvaise du fait de son apparence de façon relativement simple. Néanmoins, il faut se rappeler que nos algorithmes doivent aussi être capables de détecter les camions ou les motos qui offrent quant à eux un rapport largeur sur hauteur bien plus faible. De même, les cibles ne seront pas systématiquement vues par l'arrière mais éventuellement en $\frac{3}{4}$ profil par exemple ce qui augmentera ce rapport. Nous avons donc choisi une fonction d'attribution de note ayant un maximum relativement constant sur une plage assez étendue du ratio largeur / hauteur et qui devient très rapidement nulle en dehors de cette plage.

Nous avons tout d'abord souhaité utiliser une fonction de répartition gaussienne, mais celle-ci s'est avérée trop faiblement décroissante. Nous avons donc choisi d'adapter cette fonction à nos besoins et avons donc choisi la fonction exprimée Figure 87.

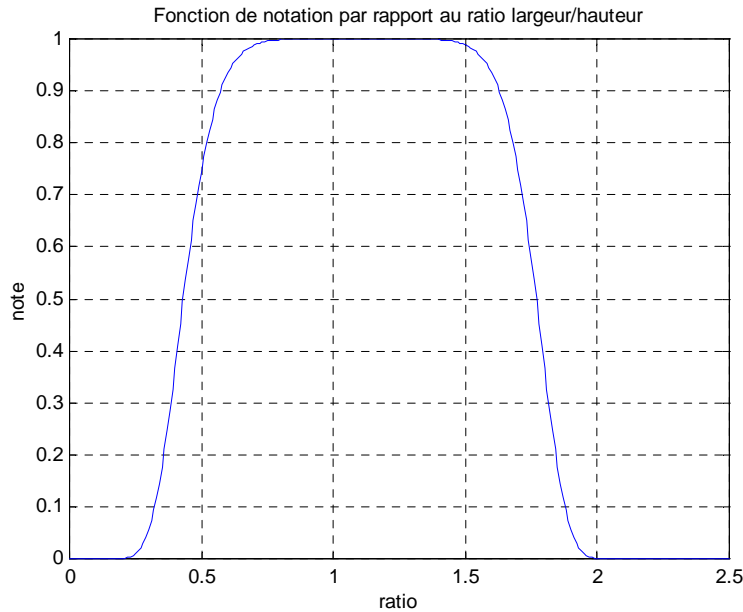


Figure 87 : Forme de la fonction d'évaluation du ratio largeur/hauteur

On voit ainsi que les cibles dont la forme est trop allongée en hauteur ou en largeur sont mal notées ce qui permet de donner une information sur la qualité de détection. Les tests sur images réelles que nous avons effectués ont montré que les véhicules bien détectés obtiennent de très bons résultats avec ce système de notation alors que les fausses cibles ou les véhicules mal détectés obtiennent des notes très faibles. On donne dans la Figure 88 l'exemple des deux véhicules détectés dans l'image donnée Figure 84, leur note est donnée dans la partie "confidence" en pourcentage, la partie "tracking length" donne le nombre de trames depuis le début du suivi et la donnée distance donne la distance estimée à la cible.

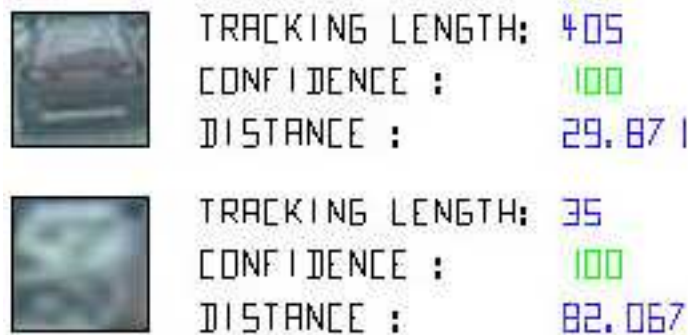


Figure 88 : Exemple de notation de cibles par ratio

Les deux images des cibles sont automatiquement agrandies pour être visibles ce qui explique l'aspect flou du deuxième véhicule. Néanmoins, on peut constater que les cibles ainsi détectées sont parfaitement évaluées.

Ce système de notation s'est ensuite avéré être l'un des plus efficaces puisqu'il ne ralentit pas la détection, offre de très bon résultats et permet d'éliminer rapidement des cibles mal détectées (fausses alertes ou mauvaises évaluations de la cible).

V - 4. 1. 2. 3. b/ Evaluation par comparaison avec un modèle :

Ce module est directement issu du module de suivi par corrélation puisqu'il se base sur le même principe. Lors de la première détection de la cible un modèle est créé à partir de la zone de l'image contenue dans la boîte englobante, ce modèle est ensuite comparé avec la cible à l'instant suivant. On calcule alors le meilleur coefficient de corrélation entre la cible et le modèle, puis, en fonction de la valeur de ce coefficient on décide ou pas de mettre à jour le modèle. Pour ce faire, on a défini deux seuils critiques :

- le seuil haut correspond à une très bonne corrélation : au-delà de ce seuil on considère que la cible n'a pas beaucoup changé par rapport au modèle et on conserve donc le modèle inchangé.
- le seuil bas correspond quant à lui à une corrélation faible : sous ce seuil on considère que la cible a été perdue et on cesse alors de la suivre.
- entre ces deux seuils on considère que la cible est toujours suivie mais qu'elle a changé (véhicule entrant dans un virage par exemple) et on met donc à jour le modèle à partir de l'image de la cible.

Cette méthode a tout d'abord un avantage indéniable qui réside dans l'impossibilité théorique de confondre deux cibles (lorsqu'un véhicule se rabat devant un autre par exemple) dont les aspects seraient différents. Malheureusement, cet avantage est masqué par le coût temporel induit par le calcul de corrélation qui augmente avec la taille du modèle et de la cible. De plus cet algorithme ne permet pas d'éliminer une cible fixe présente dans le paysage (panneau par exemple) et se révèle relativement inefficace sur des cibles éloignées (qui présentent une surface de quelques pixels seulement et n'offrent donc pas beaucoup de points de comparaison avec le modèle).

V - 4. 1. 2. 3. c/ Evaluation de la symétrie de la cible :

Cette méthode d'évaluation repose sur la symétrie verticale de l'arrière de tous les véhicules. Elle se base donc sur l'hypothèse du véhicule vu de dos et consiste donc à vérifier la symétrie de la cible obtenue. Pour ce faire nous avons décidé de calculer le coefficient de corrélation entre l'image de la cible et son symétrique par rapport à son axe médian vertical (théoriquement axe de symétrie verticale dans le cas parfait), ce qui équivaut à calculer la corrélation (telle que définie précédemment) entre la partie droite et la partie gauche de l'image.

Cette méthode, théoriquement très performante (la symétrie ne se retrouvant que très rarement dans une scène réelle) et très rapide (puisque'elle ne nécessite qu'un seul calcul de corrélation), s'avère néanmoins peu utile dans le cas de routes sinueuses. En effet, sur de telles routes, la chaussée n'est jamais droite et les virages nombreux ce qui fait s'incliner latéralement les véhicules et supprime donc la symétrie centrale. De plus, les véhicules ne sont quasiment jamais vus de dos et nous n'avons donc pas souvent l'occasion de tester leur symétrie.

V - 4. 1. 2. 3. d/ Evaluations multiples :

Nous avons développé cette dernière méthode dans l'espoir de coupler les avantages de toutes les méthodes précédentes et afin d'introduire certains facteurs de compensation des erreurs commises. Cette dernière méthode est donc théoriquement la meilleure si l'on arrive à trouver une solution pour prendre en compte chacun des problèmes introduits.

Pour ce faire nous avons utilisé les trois algorithmes précédents ainsi que deux autres heuristiques beaucoup plus primaires, la première prenant en compte la durée du suivi de la cible alors que la deuxième prend en compte la taille de cette même cible.

La première méthode développée se basait sur une combinaison linéaire de ces 5 algorithmes, malheureusement une telle démarche n'avait que peu de chance d'aboutir puisqu'elle ne corrigeait pas les défauts des méthodes de corrélation et de symétrie. L'étude sur des séquences vidéo réelles a ainsi permis de constater que les meilleures évaluations étaient obtenues en introduisant un facteur proportionnel bien plus grand à la note de ratio plutôt qu'aux autres notes.

Une étude plus poussée nous a alors permis, en étudiant plus attentivement les défauts de chaque méthode, de définir un calcul plus fin de la note globale. Ainsi, la comparaison par modèles est-elle peu fiable sur de petites cibles, nous avons donc choisi de diminuer l'influence de celle-ci en fonction de la taille des cibles. De même, les conclusions sur la mesure de symétrie nous ont conduites à éliminer cette méthode pour l'instant. Enfin, nous avons décidé de prendre en compte la durée du suivi et son influence sur la qualité du suivi. On a ainsi obtenu une formule type pour le calcul de la note globale sous la forme :

$$\text{Note_Globale} = [(1-f(\text{taille})) * g(\text{ratio}) + f(\text{taille}) * h(\text{corrélation})] * x(\text{temps})$$

En choisissant f fonction décroissante comprise entre 0 et 0.5, g la note de ratio, h la note de corrélation et x une fonction croissante bornée du temps.

Dans un premier temps nous avons fixé la fonction du temps à une constante (ici 100) afin de pouvoir vérifier l'influence de la fonction f. Nous avons choisi celle-ci de façon à ce qu'elle soit quasiment nulle pour des tailles très petites puis qu'elle passe en douceur à 0.5 pour des tailles très grandes. Nous avons défini cette fonction pour qu'elle dépende de la plus grande valeur entre la hauteur et la largeur. On a donc choisi f ayant la forme présentée Figure 89.

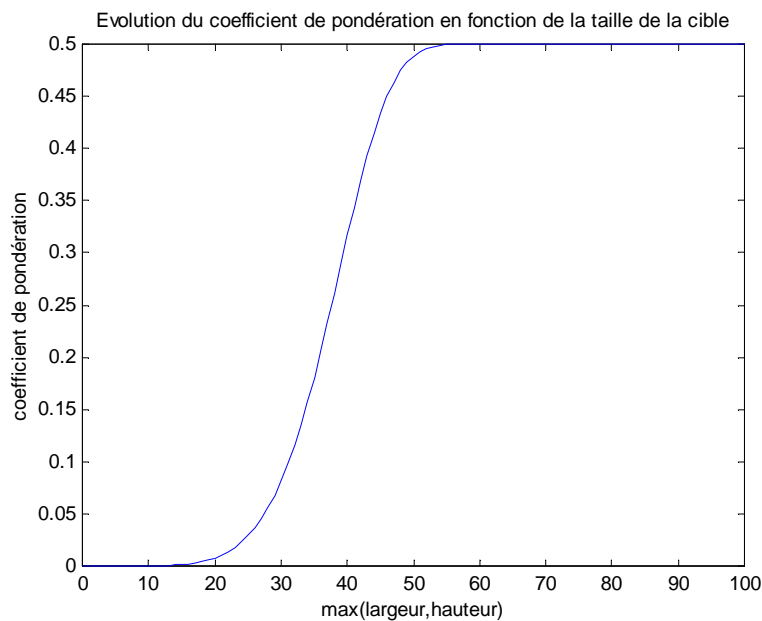


Figure 89 : Evolution du coefficient de pondération en fonction de la taille de la cible

On voit ainsi que sur les très petites cibles, seul le ratio largeur sur hauteur est pris en compte alors que sur les très grandes cibles, sur lesquelles l'algorithme de notation par corrélation est efficace, les deux méthodes sont d'importances équivalentes. Les résultats donnés sur de grandes cibles sont alors bien meilleurs comme on le voit sur la Figure 90.



TRACKING LENGTH: 585
CONFIDENCE : 94.674
DISTANCE : 17.180

Figure 90 : Exemple d'évaluation combinée d'une cible proche (la cible fait ici plus de 70 pixels de large)

Malheureusement, on ne sépare pas de cette façon des détections de panneaux comme le montre la Figure 91, sur laquelle un groupe de panneaux indicateurs est considéré comme une cible potentielle fortement probable. Par contre le véhicule qui est mal détecté est rejeté par l'algorithme d'évaluation du ratio alors que les influences respectives des deux algorithmes sont égales.

On remarque ici deux faits marquants caractéristiques de cet algorithme combiné, la validation d'une cible fixe (ici un panneau) et le rejet d'un véhicule mal détecté, à la fois par l'algorithme d'évaluation du ratio mais aussi par l'algorithme d'évaluation par modèle.






	TRACKING LENGTH: 84 CONFIDENCE : 98.484 DISTANCE : 35.670
	TRACKING LENGTH: 44 CONFIDENCE : 21.119 DISTANCE : 32.416
	TRACKING LENGTH: 12 CONFIDENCE : 99.931 DISTANCE : 116.11

Figure 91 : Exemple de validation combinée de plusieurs cibles [Wybo 00]

V - 4. 1. 2. 4. Algorithme d'estimation des distances :

Le but de cet algorithme est d'estimer la distance à une cible à partir de son positionnement et de sa largeur dans l'image. Pour ce faire, il utilise l'hypothèse de route plane ainsi que la connaissance sur les paramètres intrinsèques de la caméra (focale, taille des pixels, ...) et des paramètres externes de la caméra (hauteur, angles de roulis, de tangage, de lacet). De plus, on se sert du fait que la largeur des véhicules est à une erreur minime près la même, c'est à dire 1 mètre 70 environ. On donne Figure 92, le schéma de principe de cet algorithme à partir des résultats de la détection d'ombres.

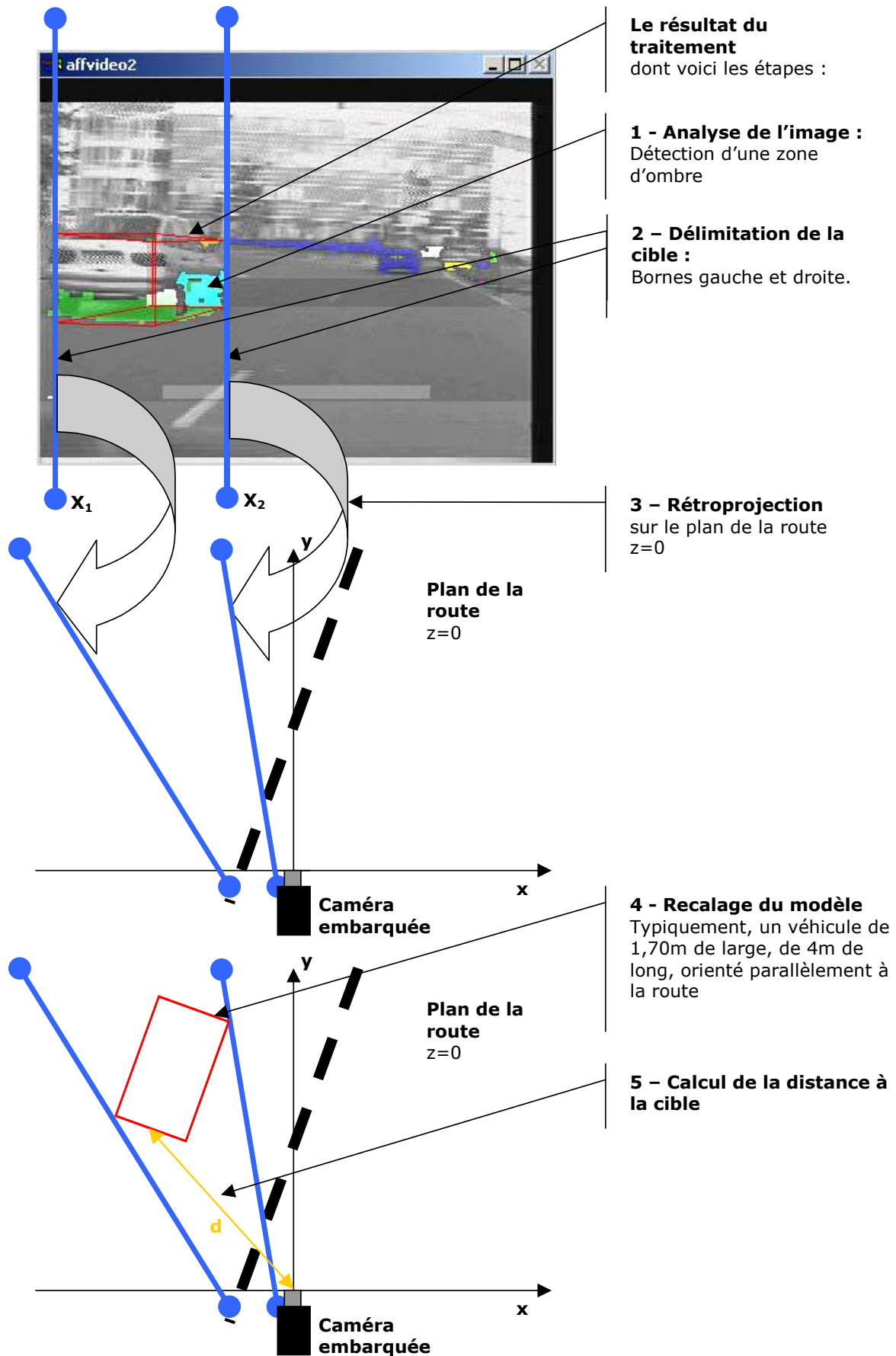


Figure 92 : Schéma de principe de l'algorithme de mesure de distance [Wybo 00]

On a voulu vérifier l'exactitude de la mesure de la distance sur nos séquences et ce, sans disposer d'informations de distance qui auraient pu nous avoir été fournies par le lidar. Nous nous sommes donc servis des normes de marquage au sol pour déterminer la distance au véhicule et la comparer avec la distance calculée. Ces deux résultats n'étaient pas très différents ce qui prouve que l'algorithme de mesure de distance donne un ordre de grandeur valide. Néanmoins, on ne pourra donner une erreur de mesure fine que lorsque nous utiliserons le lidar couplé à la caméra. La Figure 93 donne un exemple de cette comparaison entre les distances.



Figure 93 : Principe de comparaison de la mesure de distance [Wybo 00]

On peut voir sur cette image que le véhicule est détecté à 17 mètres, or il y a 13 mètres entre l'arrière du véhicule (qui est au même niveau que l'extrémité du trait) et l'extrémité la plus proche du premier trait. De plus ce trait fait lui même 3 mètres de long et est à peu près à 3 mètres (à première vue du moins). Ceci nous donnerait une distance entre l'avant de notre prototype et l'arrière de la cible de 16 mètres. La distance mesurée étant donnée entre la caméra (qui est dans l'habitacle) et l'arrière du véhicule on peut considérer que celle-ci est en effet à peu près égale à 17 mètres. Néanmoins, il ne faut pas oublier que ces mesures n'ont pas pu être validées à ce jour et ne doivent donc pas être considérées comme exactes.

V - 4. 2. Fusion des données issues du télémètre et de la vision

La détection d'obstacles peut se faire grâce à l'utilisation des informations fournies par des caméras (sensibles dans le visible, le proche ou le lointain infrarouge) et des télémètres (Lidar, radar, ...). Chacun de ces capteurs donne des informations différentes sur l'environnement et avec une fiabilité donnée comme nous venons de le voir avec la détection de véhicules par la vision. Le rôle du moteur de fusion est donc d'obtenir le maximum d'informations possibles avec une confiance maximale. Nous avons donc choisi d'utiliser un moteur de fusion de données à base de réseaux bayésiens qui permet d'obtenir une détection robuste des obstacles tout en qualifiant la fiabilité des résultats des différents algorithmes utilisés. On pourra trouver une description détaillée du fonctionnement de ce moteur de fusion de données dans [Steux 01] et [Gamme 01].

On présente dans la Figure 94 le principe de fonctionnement du détecteur d'obstacles à l'avant du véhicule. Le principe est relativement simple puisqu'il s'agit de comparer les différentes estimations, calculées par les différents algorithmes, des positions des obstacles entre elles et avec les données fournies par le télémètre (dont la précision en localisation longitudinale est meilleure). Chacune des estimations de position est dotée d'une croyance a priori pour chaque obstacle. Lorsque plusieurs observations confirment le même positionnement de l'obstacle, la confiance globale dans l'estimation de la position de l'obstacle augmente de même que la confiance des estimateurs ayant émis ces observations. Au contraire, si un observateur fournit un résultat différent des autres, sa confiance aura tendance à baisser. De cette façon on parvient à réguler le poids de chacune des hypothèses pour chaque obstacle et on obtient ainsi un positionnement très précis de chaque obstacle.

Les positions des différents obstacles détectés sont ensuite envoyées dans un module de filtrage (pour éliminer les redondances et les obstacles très peu probables dont la confiance est faible) et de prédiction qui estime la position future des obstacles dans l'image. On facilite ainsi la recherche des obstacles en ne traitant que le voisinage de ces positions dans l'image suivante. On utilise aussi cette prédiction dans le module de fusion pour identifier correctement les différents obstacles et continuer à suivre un obstacle qui aurait pu être masqué.

Le suivi des obstacles au cours du temps et leur identification correcte permettent de calculer, en plus de la position, la vitesse et l'accélération relatives de chaque obstacle par rapport à notre véhicule. Enfin, on voit sur le schéma une autre sortie de cet ensemble, il s'agit en fait de la détection des intentions du conducteur (dans le cas où l'obstacle est un véhicule) qui est faite par détection des feux de stop et des clignotants ; on détecte ainsi une intention de tourner, un freinage ou une alerte (en cas d'utilisation des warnings).

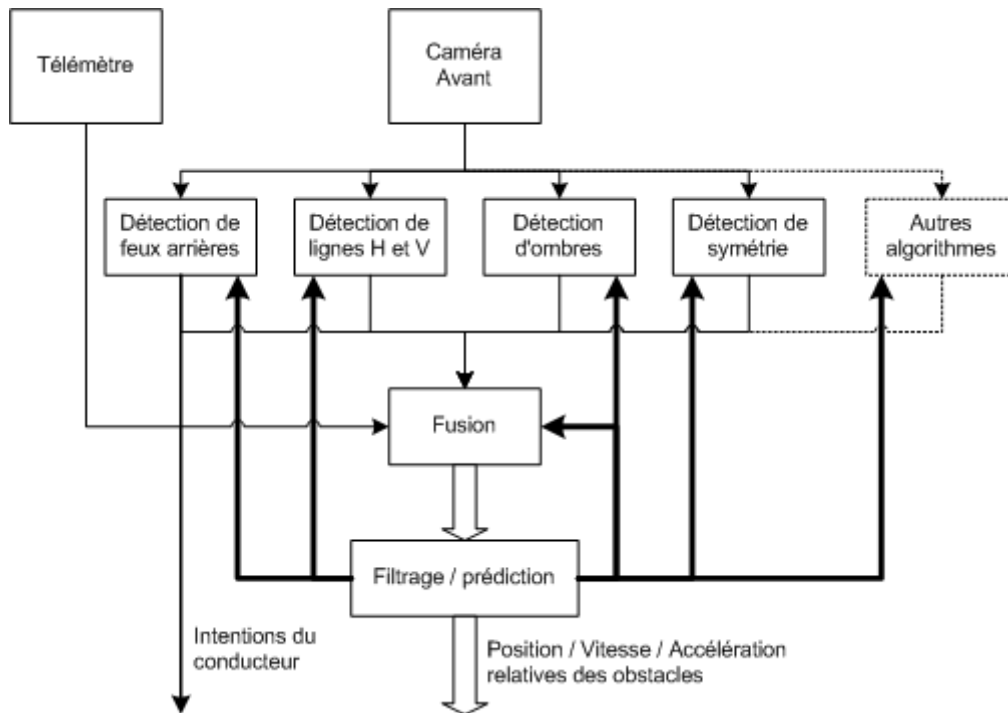


Figure 94 : Principe de fonctionnement du module de détection d'obstacles

Les Figure 95 (d'après de [Steux 01]) et Figure 96 (extraite de tests réalisés à l'aide d'un télémètre SICK dans les rues de Paris) montrent l'amélioration des résultats de détection d'obstacles lorsque l'on fusionne la sortie d'un télémètre avec des algorithmes de détection d'obstacles grâce à la vision par ordinateur. La Figure 95, montre par la même occasion les limites des radars actuels qui ne perçoivent pas les véhicules hors de l'axe du radar. La vision permet au contraire de compenser ce problème grâce aux algorithmes présentés précédemment.



Figure 95 : Comparaison de la détection d'obstacles par radar seul (à gauche) et après fusion (à droite) [Steux 01]



Figure 96 : Exemple de fusion lidar / vidéo, les obstacles sont détectés par le lidar seulement

V - 4. 3. Synthèse

Nous avons ainsi proposé dans cette partie un détecteur de véhicules lointain à l'avant du véhicule qui fournit les informations souhaitées d'après le schéma général du cindynamètre donné Figure 54. La même architecture sera reprise pour l'étude des autres parties de l'environnement du véhicule mais les traitements utilisés pourront être différents. En effet, certains traitements d'images donnent de bons résultats à l'avant du véhicule alors qu'ils ne fonctionnent pas si l'on observe ce qui se passe derrière le véhicule par exemple (la détection de feux de stop par exemple). L'architecture présentée est donc un cas particulier, où le but est principalement de détecter les véhicules à l'avant, les autres obstacles n'étant captés que par le télémètre. La détection d'autres obstacles comme des piétons pourra être améliorée par l'ajout d'algorithmes de traitement d'images spécialisés comme par exemple [Wybo 06] ou [Abramson 05]. Cet ajout s'avèrera relativement facile grâce, encore une fois, à l'architecture modulaire utilisée.

Nous avons aussi proposé un détecteur pour les obstacles statiques et en mouvement proches du véhicule qui offre d'ores et déjà de très bons résultats. Ces résultats pourront être encore améliorés en réalisant là aussi la fusion des données fournies par la vision par ordinateur avec ceux fournies par des télémètres (ici on utilisera plutôt le sonar puisque l'on traite les obstacles très proches). Ce détecteur a été réalisé pour les obstacles présents à l'arrière du véhicule mais il a aussi montré son efficacité à l'avant de celui-ci puisque contrairement à la détection d'obstacles lointains on n'utilise pas ici d'algorithmes spécifiques à un type d'obstacle ou à un type de vue des obstacles.

Au travers de ces deux exemples de détecteurs d'obstacles on s'aperçoit de la nécessité pour le cindynamètre de coupler de façon efficace la détection d'obstacles par télémètres à la détection d'obstacles par vision. En effet, les télémètres offrent une information très précise sur la présence d'obstacles et sur leur distance au véhicule mais ne fournissent que très peu d'information sémantique (nature de l'obstacle, intention affichée...) qui peuvent être obtenues par la vision par ordinateur. De même, les conditions défavorables aux télémètres sont sensiblement différentes des conditions défavorables aux caméras. Une caméra classique (i.e. dans le domaine visible) n'offrira ainsi que très peu d'informations de nuit alors qu'un télémètre n'aura aucun problème à détecter un obstacle dans ces mêmes conditions. Il sera donc essentiel pour le cindynamètre d'utiliser à la fois des capteurs de type télémètres mais aussi des caméras (et éventuellement des caméras dans le domaine infrarouge) pour améliorer la qualité et la quantité d'informations reçues.

La Figure 97, montre ainsi les différents modules qui pourront être utilisés pour la réalisation de la fonction de détection d'obstacles. On peut voir apparaître dans cette figure différents modules qui n'ont pas été explicitement présentés dans cette partie tels que la reconnaissance d'objets ou la calibration des caméras.

V - 5. Détection de la route

La détection de la route et de sa forme tridimensionnelle est essentielle pour pouvoir interpréter correctement les données reçues par les capteurs environnementaux (radar, télémètre, caméras, ...) mais aussi pour pouvoir analyser le mouvement du véhicule et son placement sur sa voie ou pour anticiper l'arrivée sur un virage. Pour ne pas avoir à rajouter un nouveau capteur sur le véhicule, nous utiliserons les images fournies par la caméra avant du véhicule. Ce choix nous permettra également de percevoir la forme de la route à l'avance et donc de mieux appréhender les difficultés à venir.

Cette partie se base sur le travail de recherche de Pierre Coulombeau réalisé à l'Ecole des Mines de Paris et en corrige certains défauts dus à des approximations trop poussées dans certaines hypothèses et certains calculs. Cette version améliorée est ensuite évaluée quantitativement à partir de données théoriques mais aussi de façon qualitative à partir de données réelles (l'évaluation quantitative des résultats demandant des données de référence malheureusement indisponibles).

V - 5. 1. Les données du problème :

La détection de la route se fait, comme nous l'avons expliqué, par l'exploitation des données vidéo fournies par une caméra. L'utilisation d'une caméra implique une projection de la scène tridimensionnelle (l'espace inclus dans le champ de vue de la caméra) dans une image par nature bidimensionnelle. Il s'ensuit donc une perte d'informations qu'il va falloir compenser afin de disposer d'un maximum d'informations sur la route. Nous allons donc tout d'abord présenter les données du problème de projection ainsi que ses conséquences sur la forme de la route dans l'image.

V - 5. 1. 1. Repères utilisés :

La Figure 98 présente les différents repères caractéristiques de la détection de route. Les repères n'ont bien sûr d'intérêt que pour des données géométriques, qu'elles soient statiques ou dynamiques. Voici la définition de ces repères :

- R_C est le repère caméra, on prendra C comme centre optique, l'axe (C_X) comme axe optique, (C_Y) l'horizontale de l'image vers la gauche, (C_Z) la verticale vers le haut.
- R_G est le repère "véhicule", dont le centre est un point fixe du véhicule : par exemple le centre de gravité du véhicule (supposé point fixe du véhicule), ou encore le repère dit "quadrillage", ou encore un point quelconque du véhicule (roue, centre de l'essieu arrière, etc.). Les axes de ce repère sont : (G_X) l'axe longitudinal vers l'avant, (G_Z) l'axe vertical vers le haut, et (G_Y) l'axe latéral tel que le repère (G_{XYZ}) soit direct. Très souvent, les différents travaux en détection de route font abstraction de ce repère, et passent directement du repère capteur R_C au repère route mobile R_M .
- R_M est un repère lié à la route, mobile en même temps que le véhicule. Soit G' la projection de G sur la route, et M la projection de G' sur le bord droit de la route perpendiculairement à ce bord (en supposant qu'elle est unique, ce qui est le cas le plus souvent).
- R_O est un repère lié à la route, immobile. C'est un repère absolu dans lequel on peut exprimer la route et le véhicule dans sa globalité.

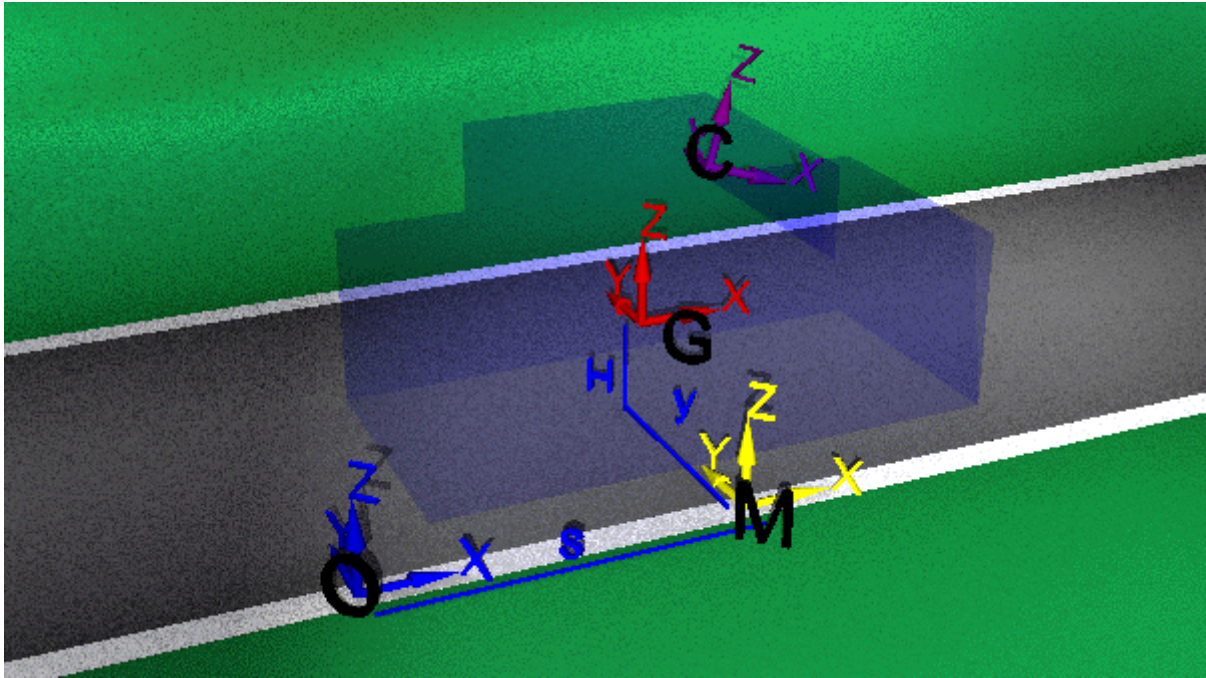


Figure 98 : Les repères caractéristiques de la détection de route.

V - 5. 1. 2. Variables utilisées dans nos modèles :

Nous allons synthétiser ici les différentes grandeurs que nous manipulerons par la suite dans la modélisation géométrique de la route et de sa projection dans l'image. Nous exprimerons analytiquement les équations des projections dans le formalisme projectif (géométrie projective), qui permet d'exprimer sous forme de produits matriciel les différentes translations, rotations, projections. C'est pourquoi les points de l'espace 3D sont décrits par des vecteurs de dimensions 4, les points de l'espace 2D par des vecteurs de dimensions 3. Le lecteur peut trouver davantage d'information sur la géométrie projective dans [Tisseron 83].

Voici donc un aperçu des variables de nos modèles géométriques.

- $X = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$ est un vecteur de coordonnées d'un point exprimé dans le repère route mobile (unité = mètre).

- $X_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix}$ est un vecteur de coordonnées d'un point du bord (i) de la route exprimé dans le repère

route mobile (unité = mètre). Le bord (i) peut-être un bord ou un centre de marquage au sol, un bord de route, un bord de trottoir, ou tout autre courbe matérialisant le bord de la route ou le bord d'une voie de circulation. Nous ne spécifions pas ici la façon de numéroter et de définir ces bords. Nous supposons seulement que le bord (0) est le bord qui passe par l'origine du repère route - mobile.

- $X_C = \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{pmatrix}$ est un vecteur de coordonnées du même point exprimé dans le repère caméra (en mètres).

- Ψ est le lacet, Φ le tangage et Θ le roulis entre le repère caméra et le repère route - mobile (unité = radian).

- $T = \begin{pmatrix} 0 \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{pmatrix}$ est le vecteur translation entre le repère caméra et le repère route - mobile. Autrement dit, c'est un vecteur de coordonnée du point C dans le repère route - mobile (unité = mètre).

- $U = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$ est le vecteur de coordonnées de la projection du point X ou X_C dans l'image. u représente

la coordonnée horizontale dans l'image, v la coordonnée verticale. Le point $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ est le point supérieur

gauche de l'image, le point $\begin{pmatrix} u_{width} \\ v_{height} \\ 1 \end{pmatrix}$ le point inférieur droit (unité = pixel).

- $U_0 = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ 1 \end{pmatrix}$ est le vecteur de coordonnées dans l'image du centre optique (unité = pixel).
- $k_u = \frac{1}{l_u}$ et $k_v = \frac{1}{l_v}$ représentent l'inverse de la taille respectivement horizontale et verticale d'un pixel sur le capteur (en pixel/mètre).

- $U_\infty = \begin{pmatrix} u_\infty \\ v_\infty \\ 1 \end{pmatrix}$ est le vecteur de coordonnées dans l'image d'un point très particulier appelé point d'horizon (unité = pixel).

- f est la distance focale de la caméra (en mètre).
- L est la largeur de la route (lorsque cela a un sens, par exemple lorsque la largeur de la route est constante). Lorsqu'il y a plusieurs voies de circulations, L peut être la largeur de la voie de circulation (distance entre le milieu des marquages gauche et droit, s'ils existent toujours).

Nous serons amenés dans la suite à introduire d'autres variables, mais qui n'ont pas forcément un intérêt général et ne nécessitent pas d'être introduites ici.

V - 5. 1. 3. Equations de projection :

Les équations de projection de la route sur la caméra font intervenir les repères suivants, visualisés sur la Figure 98 :

- Le repère route mobile centré en M.
- Le repère du centre de gravité du véhicule centré en G.
- Le repère caméra centré en C.

Pour simplifier les écritures, nous confondrons ici le repère du centre de gravité de la voiture G et le repère capteur C. Les paramètres qui décrivent alors le passage d'un point exprimé dans le repère route mobile et le repère caméra sont :

- La position latérale t_y de la caméra.
- La hauteur $H = t_z$ de la caméra.
- Les angles de roulis θ_C , tangage φ_C , et lacet ψ_C de la caméra.

La matrice de rotation R entre les repères G et C s'écrit donc :

$$R = \begin{bmatrix} \cos\Phi \cos\Psi & \cos\Phi \sin\Psi & -\sin\Phi & 0 \\ \sin\Theta \sin\Phi \cos\Psi - \cos\Theta \sin\Psi & \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi + \cos\Theta \cos\Psi & \sin\Theta \cos\Phi & 0 \\ \cos\Theta \sin\Phi \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Psi & \cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi & \cos\Theta \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de la translation P_T liée au changement de repère s'écrit :

$$P_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 & -t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On en tire la relation suivante entre les coordonnées d'un point exprimées dans le repère route mobile M et celle de ce même point exprimé dans le repère caméra C :

$$(E1) : X_C = R.P_T.X_G$$

$$X_C = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Phi \cos\Psi & \cos\Phi \sin\Psi & -\sin\Phi & 0 \\ \sin\Theta \sin\Phi \cos\Psi - \cos\Theta \sin\Psi & \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi + \cos\Theta \cos\Psi & \sin\Theta \cos\Phi & 0 \\ \cos\Theta \sin\Phi \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Psi & \cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi & \cos\Theta \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 & -t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ 1 \end{bmatrix} = R.P_T.X_G$$

La matrice de projection suivante d'un point sur le plan focal permet d'exprimer les coordonnées du point projeté dans l'image en fonction de ses coordonnées 3D dans le repère caméra. Le modèle de projection utilisé est très classique et ne prends en compte comme paramètres intrinsèques de la caméra que la focale f , l'inverse de la largeur et de la hauteur d'un pixel k_u et k_v , ainsi que les coordonnées du centre optique dans l'image (u_0, v_0) .

$$(E2) : U = \Pi.X_C$$

$$\begin{bmatrix} s u \\ s v \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & -k_u f & 0 & 0 \\ v_0 & 0 & -k_v f & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix}$$

L'ensemble composé du changement de repère puis de la projection forme la transformation qui lie les coordonnées 3D d'un point X_G de la route exprimé dans le repère route mobile à sa projection dans l'image U :

$$(E_3) : U = \Pi.R.P_T.X_C$$

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & -k_u f & 0 & 0 \\ v_0 & 0 & -k_v f & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Phi \cos\Psi & \cos\Phi \sin\Psi & -\sin\Phi & 0 \\ \sin\Theta \sin\Phi \cos\Psi - \cos\Theta \sin\Psi & \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi + \cos\Theta \cos\Psi & \sin\Theta \cos\Phi & 0 \\ \cos\Theta \sin\Phi \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Psi & \cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi & \cos\Theta \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 & -t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ 1 \end{bmatrix}$$

Nous venons d'écrire les équations élémentaires de la projection perspective en coordonnées projectives : le passage aux coordonnées euclidiennes se fait réduisant la dernière coordonnée des vecteurs U ou X_G à 1 (si elle est non nulle). Voici donc les équations explicitant les coordonnées dans l'image d'un point du repère route, en fonction de tous les paramètres intrinsèques et extrinsèques de notre modèle de projection :

$$(E_4) :$$

$$u = \left(-\frac{\sin\Theta \sin\Phi}{\cos\Phi} + \frac{\cos\Theta \sin\Psi}{\cos\Phi \cos\Psi} \right) k_u f + u_0 + \frac{((-z+t_z)\sin\Theta \cos\Psi + (z-t_z)\sin\Phi \sin\Psi + (-y+t_y)\cos\Phi)\cos\Theta}{(-z+t_z)\cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi + ((y-t_y)\cos\Psi \sin\Psi + x\cos^2\Psi)\cos^2\Phi} k_u f$$

$$v = -\left(\frac{\sin\Theta \sin\Psi}{\cos\Phi \cos\Psi} + \frac{\cos\Theta \sin\Phi}{\cos\Phi} \right) k_v f + v_0 + \frac{((-z+t_z)\sin\Phi \sin\Psi + (y-t_y)\cos\Phi)\sin\Theta + (-z+t_z)\cos\Theta \cos\Psi}{(-z+t_z)\cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi + ((y-t_y)\cos\Psi \sin\Psi + x\cos^2\Psi)\cos^2\Phi} k_v f$$

On voit apparaître, dans le système d'équations précédent, des termes constants qui correspondent à un point particulier de l'image : le point de fuite. Pour simplifier les écritures on notera désormais les coordonnées de ce point :

$$(E_5) :$$

$$u_\infty = \left(-\frac{\sin\Theta \sin\Phi}{\cos\Phi} + \frac{\cos\Theta \sin\Psi}{\cos\Phi \cos\Psi} \right) k_u f + u_0$$

$$v_\infty = -\left(\frac{\sin\Theta \sin\Psi}{\cos\Phi \cos\Psi} + \frac{\cos\Theta \sin\Phi}{\cos\Phi} \right) k_v f + v_0$$

Et pour simplifier encore plus les écritures on prendra $Z=z-t_z$ et $Y=y-t_y$. L'équation (E4) peut ainsi s'écrire sous la forme :

$$(E_6) :$$

$$\begin{cases} u = u_\infty + \frac{Z(\cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi) - Y \cos\Theta \cos\Phi}{x \cos^2\Phi \cos^2\Psi + Y \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi - Z \cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi} k_u f \\ v = v_\infty + \frac{Y \sin\Theta \cos\Phi - Z(\cos\Theta \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi)}{x \cos^2\Phi \cos^2\Psi + Y \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi - Z \cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi} k_v f \end{cases}$$

V - 5. 2. Algorithme de détection de la route :

Nous introduisons ici les algorithmes de traitements d'images que nous avons développés pour l'extraction des bords de route projetés. L'image est composée d'un ensemble bidimensionnel discret et borné de pixels, un pixel étant une mesure de la lumière reçue par une petite cellule du capteur. L'objectif essentiel ici est de réduire la quantité d'information en entrée de nos algorithmes, sans perdre les données d'intérêt pour notre application. Une image composée de 640 lignes et 480 colonnes représente une information "diluée" sur plus de 300000 pixels s'il s'agit d'un capteur en niveau de gris et plus de 900000 si le capteur est couleur. La première étape des algorithmes de détection de route par vision est donc de simplifier considérablement mais intelligemment l'information contenue dans l'image afin de ne garder que des mesures d'intérêt pour notre application. L'exemple le plus simple de filtrage d'information est l'élimination directe de régions de l'image : la Figure 99 montre une image routière dans laquelle le ciel, le capot du véhicule, ou des motifs du pare-brise représentent plus de 50% de l'information pixels.



Figure 99 : Vue caméra d'une route de campagne

Il existe de nombreuses informations qui permettent à l'être humain de reconnaître et de localiser la route. Dans le cas de la Figure 99, ces informations sont les marquages au sol (par le biais des lignes blanches) et la présence de bitume, facilement reconnaissable à sa couleur. On pourrait aussi citer dans d'autres cas la présence de véhicules ou de barrières de sécurité qui encadrent la route ou la trouée de ciel dans une haie d'arbres qui permettent d'identifier la forme de la chaussée. Ces informations sont néanmoins beaucoup trop dépendantes du contexte (rails de sécurité présents surtout sur autoroute, véhicules pas forcément présents sur la route, route non forestière, ...) pour pouvoir être utilisées de façon générique pour détecter la route. On pourrait par contre utiliser ces informations pour enrichir la détection dans ces cas particuliers. Cette possibilité n'a pas été étudiée.

V - 5. 2. 1. Différentes méthodes de détection de la route :

De nombreuses techniques de détection de la route ont été proposées avec plus ou moins de succès. Elles reposent généralement sur la détection des marquages au sol – en utilisant la transformée de Hough ([Yu 97] par exemple) ou en effectuant une rétroprojection de l'image pour obtenir une vue d'altitude de la route et en extraire simplement la position des marquages (le projet GOLD [Bertozzi 98] par exemple) – ou sur les algorithmes de croissance de région qui permettent d'obtenir les zones de l'image où l'on trouve du bitume ([Coulombeau 98] présente les résultats d'une telle approche). Il existe de nombreuses autres approches que nous ne citerons pas ici, car nous n'entendons pas faire une liste exhaustive des travaux de recherches menés dans ce domaine : on pourra pour cela se reporter au rapport R13 du projet ARCOS [Clady 02].

Nous avons choisi de baser notre approche sur les travaux antérieurs qui offrent déjà une forte robustesse aux changements de luminosité. Nous avons donc choisi une détection par contour grâce au filtrage adaptatif présenté dans [Coulombeau 98]. Elle est complétée par un algorithme de chaînage des points et de polygonisation des bords de marquage qui s'est avéré très efficace. Ces traitements se feront sur l'image en niveaux de gris pour réduire le nombre de points à traiter et donc accélérer l'algorithme.

V - 5. 2. 2. Filtre de convolution :

Le filtrage de convolution permet d'effectuer un filtrage linéaire très rapide sur toute l'image. C'est la raison pour laquelle nous utilisons cette méthode de filtrage pour la détection des marquages au sol.

V - 5. 2. 2. 1. Modélisation photométrique d'un marquage

Représentons une ligne de l'image de la Figure 99 sous la forme de l'intensité lumineuse d'un point en fonction de son abscisse dans l'image. Nous obtenons une courbe telle que celle présentée dans la Figure 100. Nous allons nous intéresser ici à l'ensemble des fonctions de coupes $I_v(u)$, définies par l'intensité lumineuse du point de l'image de coordonnées (u, v) , et prises lignes par lignes (v constant).

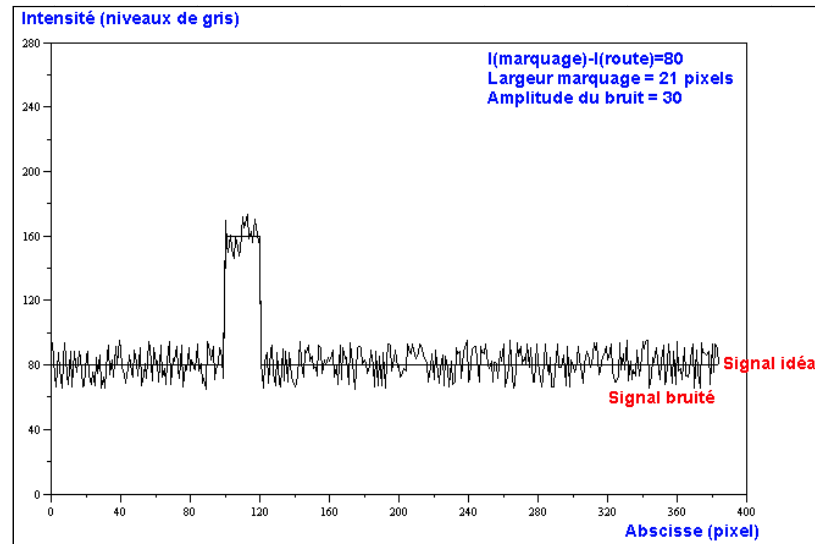


Figure 100 : Exemple de tracé de $I_v(u)$ pour une ligne blanche sur bitume foncé

Dans un cas idéalisé, comme représenté par la Figure 100, le marquage apparaît nettement grâce à son intensité lumineuse beaucoup plus élevée. Le marquage est alors caractérisé par :

- les positions (en pixel) du début et de la fin du plateau et donc du marquage
- la moyenne et l'écart type au niveau du marquage
- la moyenne et l'écart type au niveau du reste de la route.

Un filtre efficace pour détecter les marquages doit donc être capable de faire ressortir le marquage tout en atténuant le bruit. Dans la littérature, plusieurs filtres linéaires ont été utilisés pour répondre à ce problème comme $[-1 \ -1 \ 0 \ 1 \ 1]$ dans [Ellouze 97] ou $[-1 \ -1 \ \dots \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]$ dans [Kluge 94]. La nature antisymétrique de ces filtres les rend indépendants de la composante continue de l'image. Leur effet étant assez proche, on ne décrira que le filtre générique $[-1 \ \dots \ -1 \ 1 \ \dots \ 1]$.

V - 5. 2. 2. 2. Le filtre de convolution $[-1 \ \dots \ -1 \ 1 \ \dots \ 1]$

Les différentes approches bibliographiques utilisant un filtre de convolution de type $[-1 \ \dots \ -1 \ 1 \ \dots \ 1]$ ont toujours proposé un filtre de taille constante sur l'ensemble de l'image²³. Nous allons montrer ici que l'effet de ces filtres est différent suivant l'ordonnée à laquelle on se trouve dans l'image, c'est-à-dire suivant la largeur du marquage dans l'image.

Soit $g=I_v$ une courbe telle que celle représentée Figure 100. Nous supposons que g est la somme de sa composante idéale f et d'un bruit b .

$$\forall x \in [0, XMAX], g(x) = f(x) + b(x)$$

Soit une fonction de filtrage F , dépendant d'un paramètre L , définie par :

²³ A l'exception de [Aubert 90] qui propose un filtre de type $[-1 \ \dots \ -1 \ 1 \ \dots \ 1 \ -1 \ \dots \ -1]$ de taille variable adaptée à la taille du marquage dans l'image. Les auteurs y proposent d'ailleurs une méthode permettant de plus de compenser l'influence de la courbure de la route sur la largeur du marquage.

$$\forall x \in [1, L], F(x) = \frac{-1}{L}$$

$$\forall x \in [-L + 1, 0], F(x) = \frac{1}{L}$$

Le résultat de la convolution du filtre sur la courbe observée est :

$$(F * g)(x) = \int_{x-L}^{x+L-1} g(y) * F(x-y) * dx$$

$$(F * g)(x) = \int_{x-L}^{x+L-1} f(y) * F(x-y) * dx + \int_{x-L}^{x+L-1} b(y) * F(x-y) * dx$$

L'objectif du filtre est d'éliminer le terme de bruit :

$$(F * b)(x) = \int_{x-L}^{x+L-1} b(y) * F(x-y) * dx$$

$$(F * b)(x) = \frac{\left(\sum_x^{x+L-1} b(y) - \sum_{x-L}^{x-1} b(y) \right)}{L}$$

Il apparaît immédiatement que si le bruit est uniforme, les deux termes de la convolution ci-dessus ont tendance à se compenser. On observe aussi que plus la moyenne spatiale est grande (c'est à dire plus L est grand), plus l'effet du bruit est atténué. Nous aurions donc intérêt à prendre une largeur de filtre L aussi grande que possible pour éliminer les effets du bruit. La Figure 101 montre les résultats de l'application de ce filtre de convolution pour plusieurs largeurs L différentes.

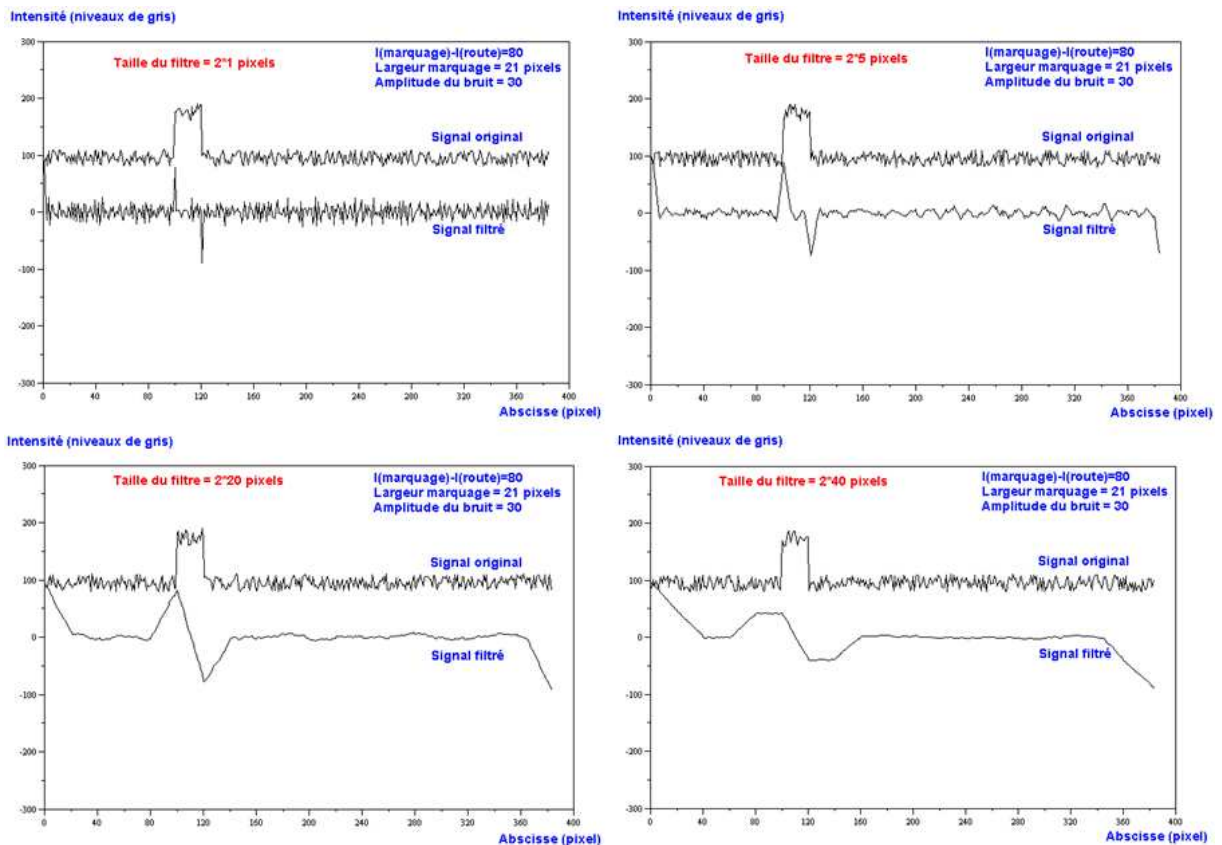


Figure 101 : Résultats du filtrage de convolution pour plusieurs valeurs de la taille L

Etudions à présent la convolution du filtre avec l'image idéale :

$$(F * f)(x) = \int_{x-L}^{x+L-1} f(y) * F(x-y) * dx$$

$$(F * f)(x) = \frac{\left(\sum_x^{x+L-1} f(y) - \sum_{x-L}^{x-1} f(y) \right)}{L}$$

L'effet de l'influence de la taille du filtre est illustré sur un signal réel dans la Figure 101 et sur un signal idéal de largeur connue dans la Figure 102.

Il y a création d'une dent de scie positive centrée sur le début du marquage suivi d'une dent de scie négative centrée sur la fin du marquage. La largeur de chaque dent de scie est égale à 2*L (soit cela correspond à la largeur du filtre), et l'amplitude entre le maximum et le minimum est égale au double de celle du marquage idéal non filtré.

La création de deux dents de scies positive et négative n'est vraie que lorsque la demi-largeur du filtre (L) reste inférieure à la taille du marquage. En effet, une fois cette largeur dépassée, les pics sont érodés d'autant plus que L augmente : un exemple est donné sur la Figure 102, lorsque la largeur du filtre (L = 40) dépasse celle du marquage initial (L = 21).

Il existe donc une taille optimale de filtre, telle que l'on minimise au mieux le bruit tout en gardant intact les pics maximum et minimum de début et fin de marquage. Cette taille est telle que la demi-largeur du filtre soit égale à la taille du marquage lui-même.

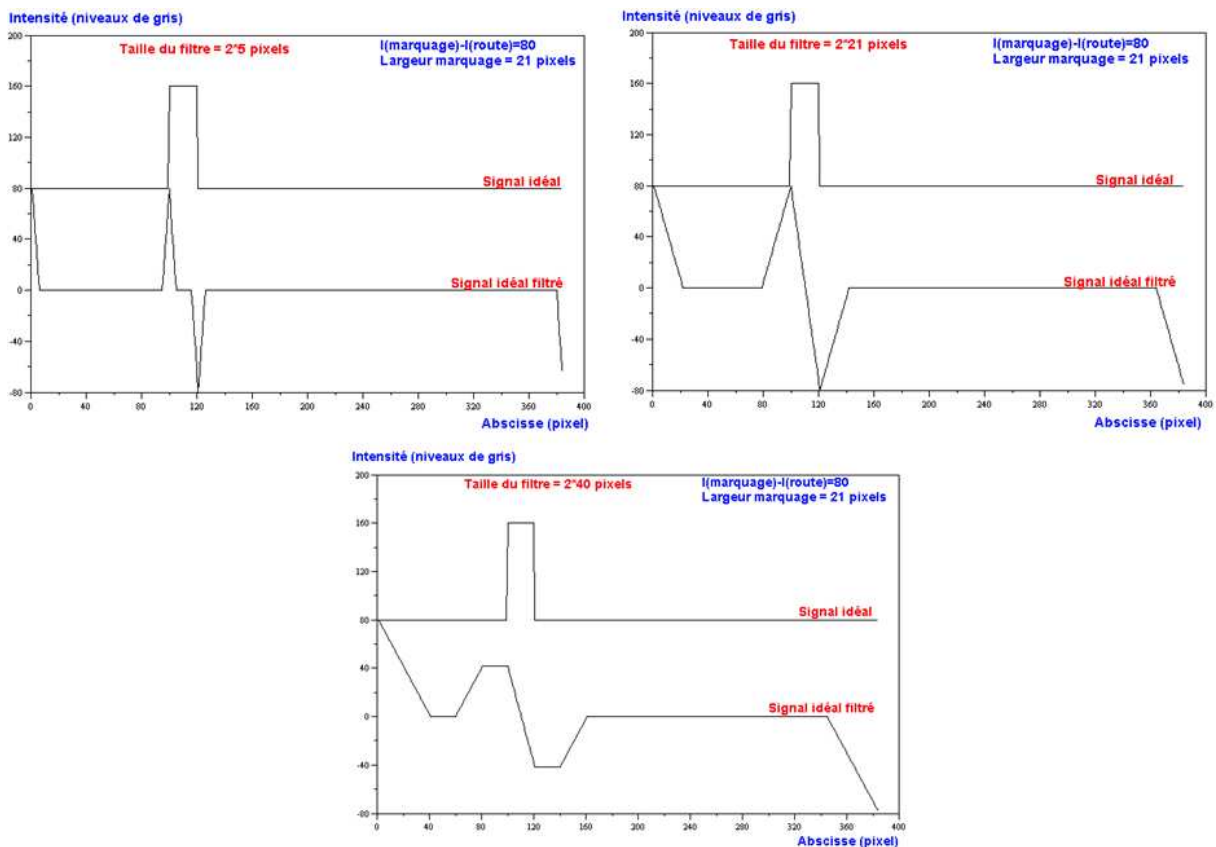


Figure 102 : Illustration de l'influence de la taille du filtre de convolution sur le signal filtré

V - 5. 2. 2. 3. Détermination théorique de la taille optimale du filtre

La détermination de la taille du marquage se fait en revenant à l'équation (E₆) de projection dans l'image. Dans le cas d'un marquage au sol on peut considérer les hypothèses suivantes :

(E₇)

$$\begin{cases} x \cos \Psi \gg Y \sin \Psi \\ x \cos \Psi \gg Z \cos \Phi \sin \Psi \end{cases}$$

On se place dans l'hypothèse d'une route plane et droite. On note M_i(x) les points du bord droit d'un marquage et M_j(x) les points du bord gauche de ce marquage. On note d la distance entre 2 points M_i et M_j pour un x donné. Dans le cadre de nos hypothèses on a : $d = y_j - y_i$ puisque l'on a supposé la route plane. En utilisant cette hypothèse ainsi que les simplifications précédentes on obtient :

(E₈)

$$\Delta u = - \frac{k_u f \cos \Theta}{\cos \Phi \cos^2 \Psi} \frac{d}{x}$$

En réinjectant cette relation dans l'équation (E₆) simplifiée par les hypothèses précédentes on obtient :

$$\Delta u = \frac{k_u}{k_v} \frac{\cos \Theta \cos \Phi}{Y \sin \Theta \cos \Phi + t_z (\sin \Theta \sin \Phi \sin \Psi + \cos \Theta \cos \Psi)} d (v - v_\infty)$$

En supposant le roulis nul, hypothèse naturelle dans le cas d'une route plane et droite²⁴, on obtient la relation linéaire suivante reliant la largeur d'un marquage dans l'image à sa largeur réelle et à l'ordonnée de sa projection dans l'image :

$$\Delta u \approx \frac{k_u}{k_v} \frac{\cos \Phi}{t_z \cos \Psi} d (v - v_\infty)$$

Il est donc possible dans ce cas idéal d'obtenir facilement la taille idéale du filtre de convolution en fonction de la largeur du marquage et des paramètres de la caméra. La Figure 103 représente la mesure dans une scène routière réelle de la largeur d'un même marquage en fonction de l'ordonnée, ainsi que la régression au moindre carré de cette courbe.

²⁴ Cette hypothèse est réductrice puisqu'elle ne prend pas en compte le chargement de la voiture et l'éventuel déséquilibre de charge entre gauche et droite du véhicule. Cependant on notera que dans le cas général l'angle de roulis introduit et quasi nul du fait des systèmes anti-roulis équipant nombre de véhicules.

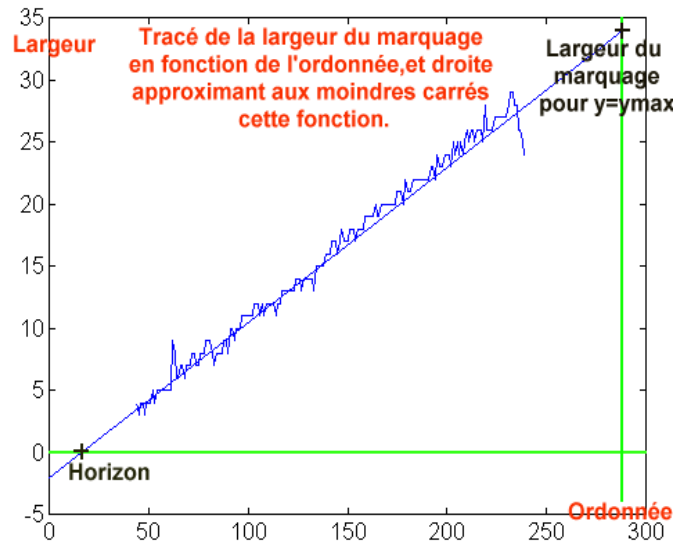


Figure 103 : Tracé de la largeur d'un marquage en fonction de l'ordonnée dans l'image (unité=pixel, mesures issues d'images réelles).

Evidemment la taille idéale du filtre de convolution n'est optimale que dans les hypothèses précédemment citées (route plane et droite ainsi que roulis nul de la caméra). Cependant de telles conditions ne sont que très rarement réunies en condition réelles. Il faut alors se remémorer l'étude précédente portant sur l'influence de la largeur du filtre sur le signal détecté (Figure 102). On voit que pour une largeur de filtre inférieure ou égale à la taille optimale un maximum et un minimum locaux sont créés. Or ces deux extremums sont les caractéristiques que nous recherchons comme nous le verrons par la suite. L'utilisation d'une largeur sous estimée ne perturbe donc pas trop le système. Ceci permet de compenser le roulis de la caméra ou la courbure de la route (jusqu'à une certaine limite : on ne détectera pas avec ce filtre un marquage quasiment orthogonal à la direction de la caméra) sans avoir à changer l'orientation du filtre ou à faire tourner une partie de l'image comme dans [Aubert 90].

V - 5. 2. 2. 4. Le filtre adaptatif

On a vu précédemment que la taille idéale du filtre de convolution dépend de l'ordonnée où il sera utilisé. Nous avons donc utilisé le filtre adaptatif proposé dans [Coulombeau 98], issu du filtre générique $[-1 \dots -1 \ 1 \dots 1]$ et tel que sa largeur soit toujours optimale par rapport au marquage. La largeur du filtre varie donc proportionnellement à l'ordonnée de la ligne de l'image où il est utilisé. L'utilisation de ce filtre nous permet d'obtenir le meilleur contraste possible dans l'image filtrée et ainsi le meilleur rapport signal sur bruit.

Le filtre utilise 2 paramètres liés aux différentes grandeurs physiques par (x) :

- L'ordonnée pour laquelle la largeur du filtre devient nulle (v_{∞}).
- Le coefficient directeur k de la droite $L = k.(v - v_{\infty})$

Il est évident que ces paramètres sont adaptables d'une image à la suivante mais il est aussi apparu qu'ils étaient très peu sensibles à des changements des valeurs des grandeurs physiques auxquelles ils sont liés. Pour éviter de devoir les recalculer pour chaque nouvelle image (à cause du tangage du véhicule par exemple) on préférera d'ailleurs sous-estimer la taille du filtre, évitant ainsi les phénomènes d'écrêtage présentés précédemment dans la Figure 102.

V - 5. 2. 2. 5. Optimisation de l'implémentation du filtre

L'implémentation d'un tel filtre adaptatif dont la largeur peut être énorme (jusqu'à 100 pixels pour certaines images au format PAL pleine résolution) peut paraître prohibitive au niveau du temps de calcul. Heureusement, il a été possible d'optimiser l'usage de ce filtre en utilisant une programmation adaptée qui minimise largement les calculs en rendant l'algorithme équivalent à une convolution de largeur 6.

Pour ce faire, on utilise pour chaque nouveau pixel d'une même ligne le résultat de la convolution précédente que l'on modifie pour tenir compte du déplacement du filtre. Il suffit alors de rajouter à la convolution précédente les valeurs du dernier pixel et du premier pixel précédent et de retrancher²⁵ 2 fois la valeur du pixel d'application précédent. La Figure 104 montre l'application du filtre de convolution adaptatif pour deux pixels successifs, afin de mieux présenter le mécanisme d'optimisation utilisé.

Pixels de la ligne v	i			i+L-1	i+L			i+2L-1	i+2L
Filtrage du pixel i+L-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	
Filtrage du pixel i+L		-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
Différence entre les résultats des convolutions	+1	0	0	0	-2	0	0	0	+1

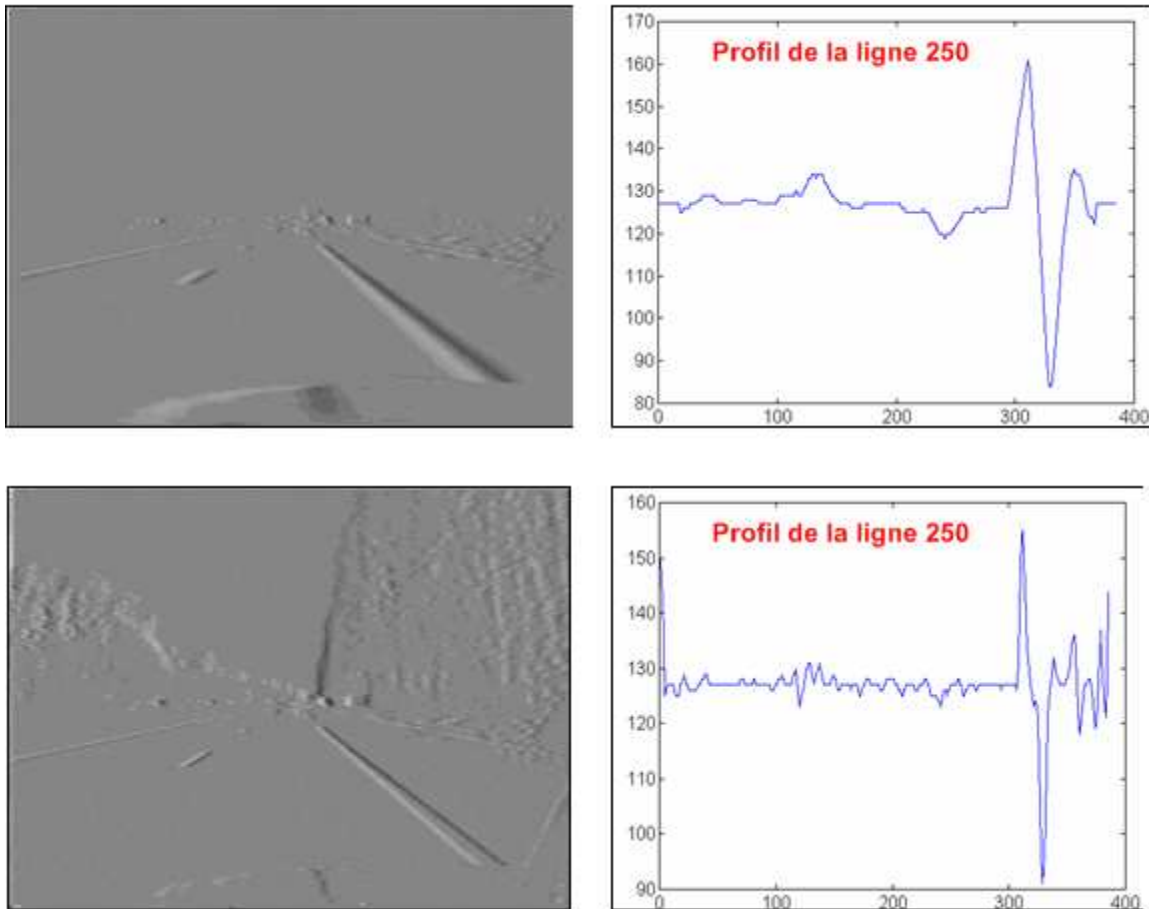
Figure 104 : Principe d'application du filtre adaptatif

V - 5. 2. 2. 6. Résultats expérimentaux

L'application du filtrage adaptatif a donné des résultats conformes à nos attentes, permettant ainsi d'augmenter grandement le rapport signal sur bruit de l'image filtrée et la mise en valeur des bords des marquages. La Figure 105 montre une comparaison entre les résultats de l'application d'un filtre constant de taille 2 et de l'application du filtre adaptatif.

²⁵ Dans le cas naturel d'un parcours des pixels de l'image de gauche à droite.

Filtrage à taille variable



Filtrage à taille constante L=2

Figure 105 : Comparaison des effets du filtre adaptatif et du filtre de largeur constante

V - 5. 2. 3. Extraction des marquages :

Après application du filtre adaptatif de convolution on dispose d'une nouvelle image en niveaux de gris dont il est possible d'extraire relativement facilement les lignes.

V - 5. 2. 3. 1. Extraction des bords des marquages

Comme on a pu le voir précédemment, la présence d'un marquage sur la route se traduit dans l'image filtrée par la présence d'un maximum d'intensité suivi d'un minimum. Cette propriété nous permet d'utiliser un algorithme relativement simple pour détecter les marquages en recherchant la présence sur chaque ligne de cet enchaînement maximum local – minimum local.

De plus l'utilisation d'une approche locale pour la recherche des transitions maximum – minimum nous permet de nous affranchir des problèmes de changement de contraste dans l'image. En effet, sur une route boisée par exemple, l'alternance ombre – soleil modifie grandement le contraste entre la route et les marquages au sol d'une zone à l'autre de l'image.

Enfin, nous utilisons la connaissance a priori de la taille d'un marquage au sol selon son ordonnée dans l'image pour ne conserver que les transitions maxima – minima de largeur à peu près égale à la largeur théorique. On conserve ainsi une marge d'erreur pour la détection qui nous permet de nous adapter à des marquages de largeur différente.

Pour éliminer les points aberrants nous considérons le fait que les marquages s'étalent sur plusieurs lignes de l'image tout en gardant une continuité au niveau de leur largeur et de leur positionnement. Nous utilisons donc cette propriété pour attribuer une confiance d'autant plus grande à une transition max – min à la ligne i qu'une transition similaire existait à la ligne $i-1$ dans un voisinage de la transition actuelle (Figure 106) et que toutes deux sont de largeur proche.

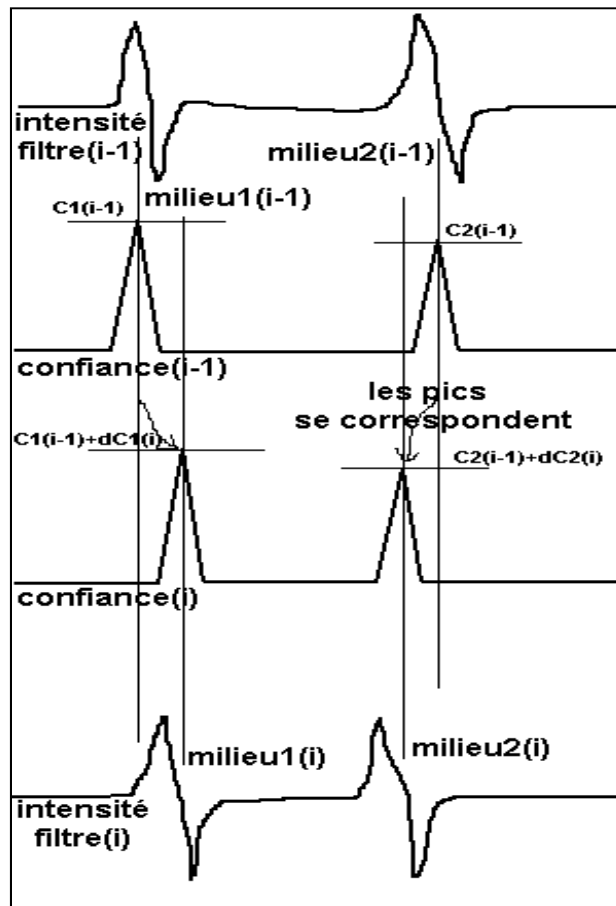


Figure 106 : Elaboration d'une mesure de confiance.

V - 5. 2. 3. 2. Segmentation

Après la phase d'extraction nous disposons de trois ensembles de points correspondant aux bords gauches, aux bords droits et aux centres des différents marquages présents sur la route. Dans chacun de ces ensembles sont aussi présents des points n'appartenant à aucun marquage et qui n'ont pas été éliminés par le premier filtrage très simple appliqué précédemment.

Pour éliminer le bruit de chacun de ces ensembles et regrouper les points correspondant aux différents marquages entre eux, on a recours à l'algorithme de segmentation des points présenté dans [Coulombeau 98] et que nous allons rappeler. Pour éviter les problèmes liés au positionnement des marquages dans l'image (pas assez verticaux par exemple) on utilise un algorithme isotrope, qui va donc segmenter les ensembles de points quelle que soit l'orientation de cet ensemble.

L'algorithme se présente de la façon suivante :

- On parcourt la liste des points en les traitant séquentiellement
- On crée un segment à partir des deux premiers points
- Pour chaque nouveau point, on prend les segments déjà formés et pour chacun :
 - Si le point est suffisamment proche du dernier point du segment on essaie de l'incorporer (méthode expliquée plus loin)

○ Sinon on passe au segment suivant

- Si le point n'a pas pu être incorporé à un segment, on crée un nouveau segment
 - On passe au point suivant et on recommence l'algorithme depuis la troisième étape
- L'incorporation d'un point peut se faire de deux façons distinctes :
- Soit le segment n'avait qu'un point et on rajoute simplement ce deuxième point (en vérifiant le critère de proximité)
 - Soit le segment comportait plusieurs points, auquel cas on utilise un critère portant sur une somme de surfaces signées.

Le critère de surface est simple et très intéressant : il s'agit de cumuler les aires produites par les triangles $[P_0, P_{i-1}, P_i]$ (pour tout $i > 1$, puisque les 2 premiers points P_0 et P_1 de chaque segment ne sont pas soumis à cette phase d'incorporation). L'aire signée de ces triangles est donnée par le produit mixte : $A_i = 0.5 * (\overrightarrow{P_0 P_{i-1}} \wedge \overrightarrow{P_0 P_i}) \cdot \vec{k}$.

Nous voyons Figure 107 le cas où de légères erreurs sont présentes dans l'alignement des points. Dans ce cas, l'aire des triangles oscille entre des valeurs positives et négatives : $\sum A_i$ reste dans un voisinage borné de 0. Au contraire, lorsque la courbe a réellement une inflexion comme sur la Figure 108, cette somme croît en valeur absolue jusqu'à dépasser un certain seuil. Ce seuil est caractéristique de la volonté que l'on a de rester fidèle à la courbe d'origine (échelle plus locale), ou bien de se permettre des écarts vis à vis d'elle (échelle plus globale).

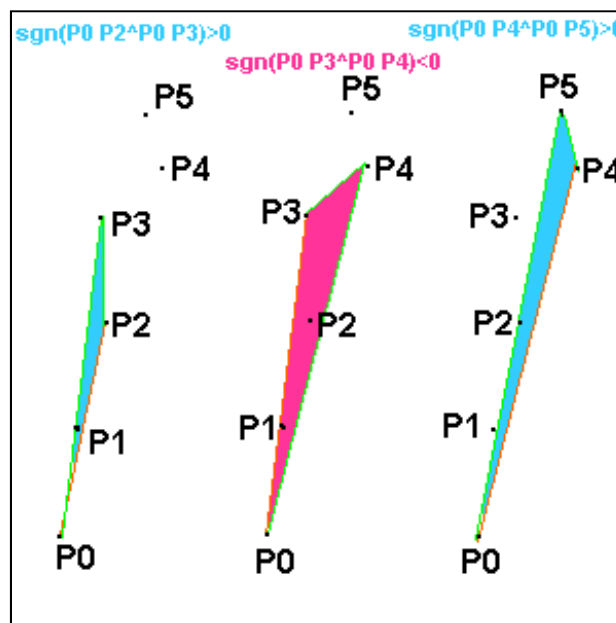


Figure 107 : Critère de surface pour des points oscillants autour d'une droite ; la courbe sera approchée par une droite.

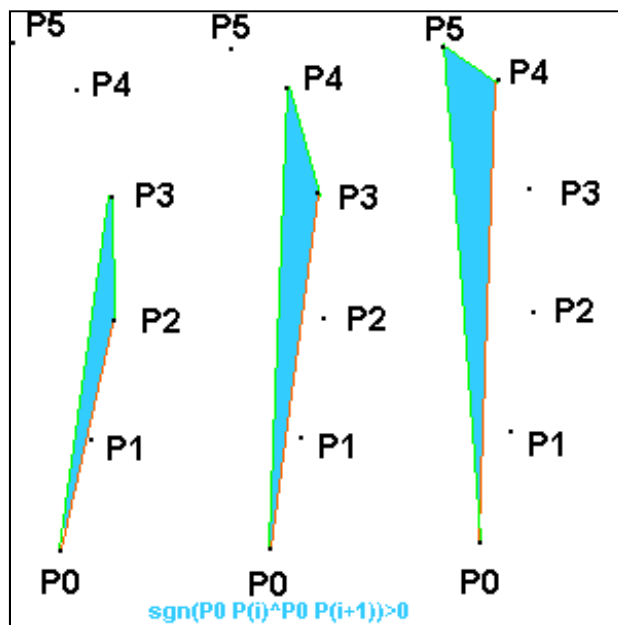


Figure 108 : Critère de surface pour des points qui suivent un arc de courbure de même signe la courbe sera séparée en plusieurs segments.

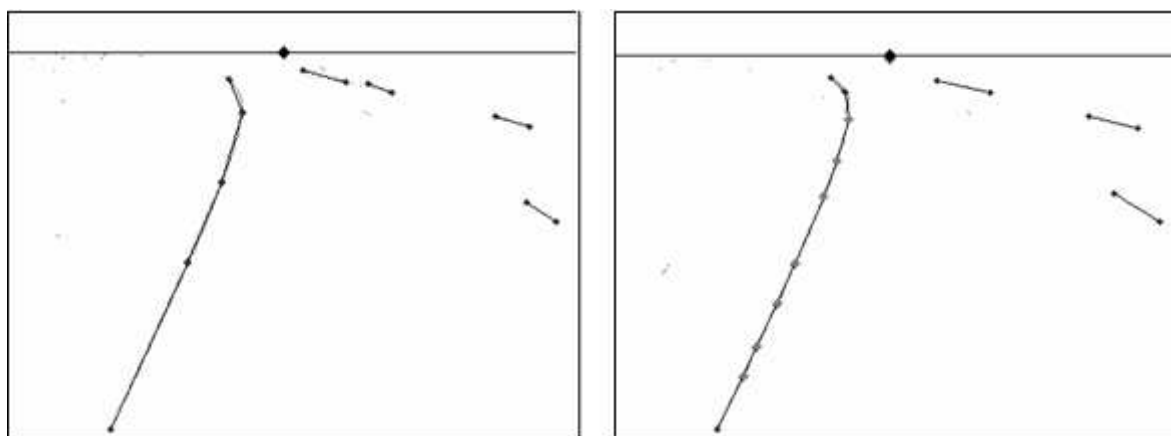


Figure 109 : Deux segmentations du même ensemble de points à seuils de surface différents

On voit dans la Figure 109 que plusieurs segments peuvent être nécessaires pour décrire un marquage, surtout lorsque le marquage est courbe comme c'est le cas ici. Il est donc nécessaire, pour une meilleure compréhension ultérieure de la situation, de pouvoir regrouper les segments décrivant un même marquage.

V - 5. 2. 3. 3. Regroupement des segments de marquage

Le regroupement de deux marquages se fait de façon relativement simple en comparant leur orientation (par le biais d'un produit scalaire de leur vecteur directeur unitaire) et le décalage de l'un par rapport à l'autre, c'est-à-dire par un critère de proximité entre le premier point de l'un et le dernier de l'autre. La Figure 110 montre une situation qui pourrait se présenter.

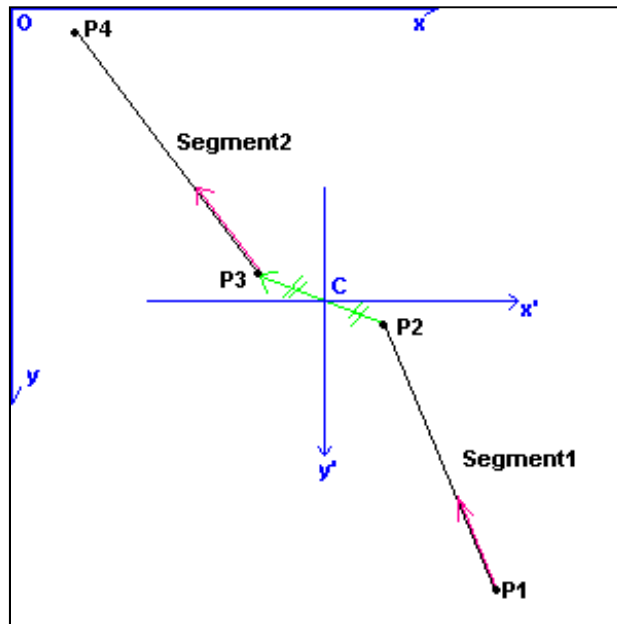


Figure 110 : Exemple de regroupement de 2 segments proches

Les tests de cet algorithme ont montré certains problèmes dans le cas de marquages fortement courbés lorsque l'on approche de la ligne d'horizon. En effet, dans ces deux cas, le produit scalaire des vecteurs directeurs des deux segments ne vérifie plus le critère imposé du fait de la grande courbure qui apparaît à l'image. Pour remédier à ce problème nous avons conditionné la valeur du critère du produit scalaire à l'ordonnée des points P_2 et P_3 , de cette façon, plus on se rapproche de l'horizon, moins le produit scalaire des vecteurs directeurs doit être grand.

V - 5. 3. Reconstruction tridimensionnelle de la route :

Une fois le filtrage de l'image et la segmentation des points de marquages effectués, on dispose des bords gauches et droits des marquages ainsi que de leur centre. Pour pouvoir exploiter correctement et facilement les informations apportées sur la forme de la route nous devons tout d'abord utiliser les coordonnées image de ces marquages pour en déduire leurs coordonnées tridimensionnelles et de cette façon disposer directement de la forme réelle de la route.

V - 5. 3. 1. Contexte :

L'équation (E_6) fait apparaître, comme on pouvait s'y attendre, la nécessité de disposer d'une troisième équation pour pouvoir reconstruire efficacement la route. En effet, avec seulement deux équations liant les trois inconnues de position, il n'est possible que de calculer deux inconnues en fonction de la troisième. Pour ce faire nous utilisons les propriétés des points considérés, qui appartiennent tous aux marquages de la route, dont la géométrie est imposée par la réglementation française. Leur largeur, la distance entre deux marquages consécutifs et la largeur de la voie comprise entre deux marquages parallèles sont liées et nous permettent donc de disposer d'hypothèses supplémentaires pour effectuer la reconstruction.

On supposera donc par la suite que les différentes voies de circulation, délimitées par les marquages au sol, ont une largeur constante. Cette largeur pourra être modifiée lors des changements de type de voie de circulation par le biais d'un calcul relativement simple que l'on expliquera par la suite. Ceci nous permettra aussi de vérifier régulièrement que la valeur de la largeur utilisée est correcte.

Cette hypothèse nous amène tout naturellement à utiliser le modèle ruban présenté dans les travaux de Dementhon que nous présentons maintenant.

V - 5. 3. 2. Modèle ruban de Dementhon :

Les travaux de Dementhon, présentés dans [DeMenthon 90], ont apporté un éclairage majeur dans la définition d'un modèle de route élaboré et tridimensionnel.

Dans ce modèle, la route est supposée de largeur constante L . Les coordonnées du vecteur vertical \vec{V} sont supposées connues dans le repère caméra. L'ensemble des segments de traverse (Dementhon compare son modèle à celui d'une voie de chemin de fer : un segment de traverse est orthogonal aux bords droit et gauche de la route, en les joignant), en plus d'être de largeur constante L , sont aussi supposés orthogonaux au vecteur \vec{V} . Les hypothèses suivantes sont donc faites :

- la route est de largeur constante L
- la route est sans dévers.
- les segments de traverse sont horizontaux.
- les tangentes aux bords droit et gauche de la route correspondant à la même traverse sont supposées parallèles (bien que rigoureusement nécessaire, cette hypothèse est très naturelle et tout à fait acceptable).

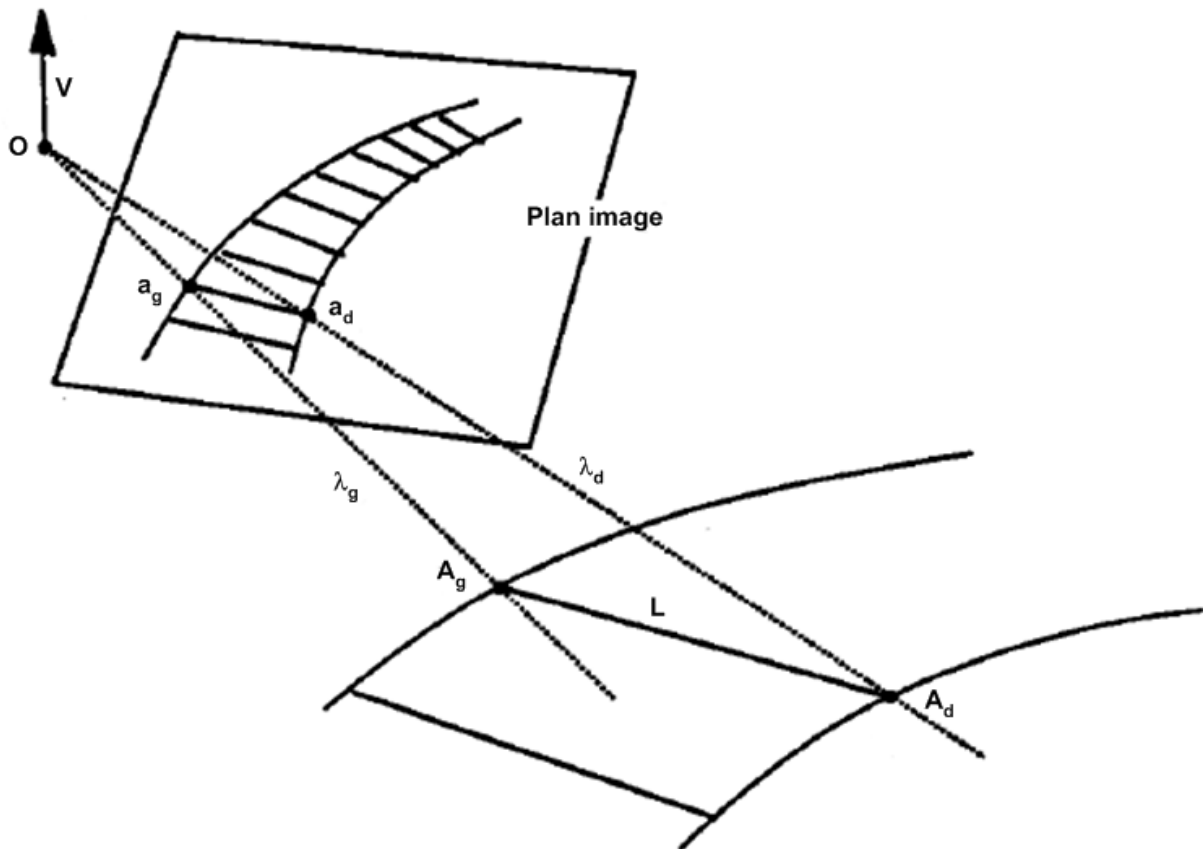


Figure 111 : Illustration des variables du modèle de Dementhon (d'après [DeMenthon 90])

La Figure 111 définit les différents vecteurs utilisés dans le modèle ruban de Dementhon. Si l'on se place uniquement dans le repère caméra, soient \vec{A}_d et \vec{A}_g les deux points opposés d'un segment de traverse de la route (sommets du bord droit et du bord gauche du segment), et \vec{a}_d et \vec{a}_g les projections de ces deux points sur le plan image. Soient aussi \vec{A}_d' et \vec{A}_g' les tangentes respectivement en \vec{A}_d au bord droit de la route et en \vec{A}_g au bord gauche de la route, et \vec{a}_d' et \vec{a}_g' les projections de ces deux vecteurs sur le plan image.

Dementhon montre alors que :

$$\bullet \quad \vec{A}_d = \frac{L}{\left(\vec{a}_d^2 + m^2 \cdot \vec{a}_g^2 - 2.m.[\vec{a}_d \cdot \vec{a}_g]\right)} \vec{a}_d \text{ et } \quad \vec{A}_g = \frac{L.m}{\left(\vec{a}_d^2 + m^2 \cdot \vec{a}_g^2 - 2.m.[\vec{a}_d \cdot \vec{a}_g]\right)} \vec{a}_g, \quad \text{avec}$$

$$m = \frac{[\vec{a}_d \cdot \vec{V}]}{[\vec{a}_g \cdot \vec{V}]}$$

- une condition nécessaire pour que \vec{a}_d et \vec{a}_g soient des points associés (c'est à dire correspondent à la projection respectivement du sommet droit et du sommet gauche d'une même traverse) est : $[\vec{V} \times (\vec{a}_d \times \vec{a}_g)] [(\vec{a}_d \times \vec{a}'_d) \times (\vec{a}_g \times \vec{a}'_g)] = 0$. En utilisant cette condition nécessaire, il montre alors :

- connaissant (\vec{a}_d, \vec{a}'_d) et recherchant $\vec{a}_g = \vec{p}_g + \lambda \overrightarrow{p_g q_g}, \lambda \in [0,1]$ le long d'un segment $[p_g q_g]$ de l'image, on obtient la condition nécessaire suivante sur λ :

$$\lambda = - \frac{(\vec{V} \cdot \vec{a}_d)(\vec{K} \cdot \vec{p}_g) - (\vec{K} \cdot \vec{a}_d)(\vec{V} \cdot \vec{p}_g)}{(\vec{V} \cdot \vec{a}_d)(\vec{K} \cdot \overrightarrow{p_g q_g}) - (\vec{K} \cdot \vec{a}_d)(\vec{V} \cdot \overrightarrow{p_g q_g})}, \text{ avec } K = (\vec{a}_d \times \vec{a}'_d) \times (\vec{p}_g \times \vec{q}_g).$$

- connaissant (\vec{a}_d, \vec{a}'_d) et recherchant $\vec{a}'_g = \overrightarrow{p_g a_g} + \mu (\overrightarrow{a_g r_g} - \overrightarrow{p_g a_g}), \mu \in [0,1]$ en un point \vec{a}_g de l'image, on obtient une condition nécessaire sur μ :

$$\mu = - \frac{(\vec{M} \cdot \vec{a}_g)(\vec{n}_d \cdot \overrightarrow{p_g a_g}) - (\vec{n}_d \cdot \vec{a}_g)(\vec{M} \cdot \overrightarrow{p_g a_g})}{(\vec{M} \cdot \vec{a}_g)(\vec{n}_d \cdot (\overrightarrow{a_g r_g} - \overrightarrow{p_g a_g})) - (\vec{n}_d \cdot \vec{a}_g)(\vec{M} \cdot (\overrightarrow{a_g r_g} - \overrightarrow{p_g a_g}))} \quad \text{avec}$$

$$\vec{n}_d = \vec{a}_d \times \vec{a}'_d \text{ et } \vec{M} = \vec{V} \times (\vec{a}_d \times \vec{a}_g)$$

Le modèle de route présenté par Dementhon, ainsi que les résultats qu'il en extrait, permettent en théorie de reconstruire la forme 3D de la route à partir d'une image dont les bords de route sont extraits sous forme de polygones (une liste de sommets par exemple) et de la connaissance de ce fameux vecteur vertical \vec{V} . De plus, on remarque qu'aucune approximation n'est faite tout au long de ce raisonnement géométrique, ce qui est particulièrement original dans ce domaine.

En pratique, la reconstruction dépend :

- du vecteur \vec{V} : il est nécessaire de connaître précisément ce vecteur qui est un pré-requis assez critique pour l'ensemble de la reconstruction.
- des résultats et de la complexité de la polygonisation, et notamment de la présence de marquages continus (conditions nécessaires pour obtenir une polygonisation fidèle).
- d'une reconstruction itérative suivie d'une minimisation globale dans l'image de l'association entre bords droit et gauche.

Sur des images réelles, et par conséquent pour des polygonisations qui peuvent être très bruitées, les reconstructions sont très instables. Il faut noter que le nombre de paramètres à estimer en est la principale cause. Outre les paramètres de roulis et tangage contenus dans le vecteur \vec{V} , la largeur de la route L ainsi que les paramètres intrinsèques de la caméra, la forme polygonale finale de la route 3D a un nombre de paramètres proportionnel au nombre N de segments du polygone (au moins $3*N$).

Quelques travaux ont repris l'hypothèse de route de largeur constante et l'ont associé avec d'autres hypothèses sur les angles de lacet, tangage, et roulis. Nous utiliserons quant à nous cette hypothèse sans faire d'hypothèses sur les angles de tangage, roulis et lacet.

V - 5. 3. 3. Modèle de route à largeur constante :

Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous utiliserons par la suite le modèle de route de largeur constante dans la suite de nos travaux. Ce modèle nous permet d'introduire un paramétrage de la forme de la route qui facilite l'expression des coordonnées des marquages de la route dans l'espace tridimensionnel en fonction des coordonnées image. On utilise pour cela une série d'hypothèses sur la forme de la route permettant un calcul direct de celle-ci plutôt que de devoir recourir à une optimisation globale comme avec le modèle de Dementhon. Ce faisant on perd en précision de reconstruction mais on gagne grandement en simplicité algorithmique. On verra par la suite que l'erreur de reconstruction introduite est relativement faible. On utilise pour cela la représentation de la Figure 112 qui provient des hypothèses du modèle ruban de Dementhon.

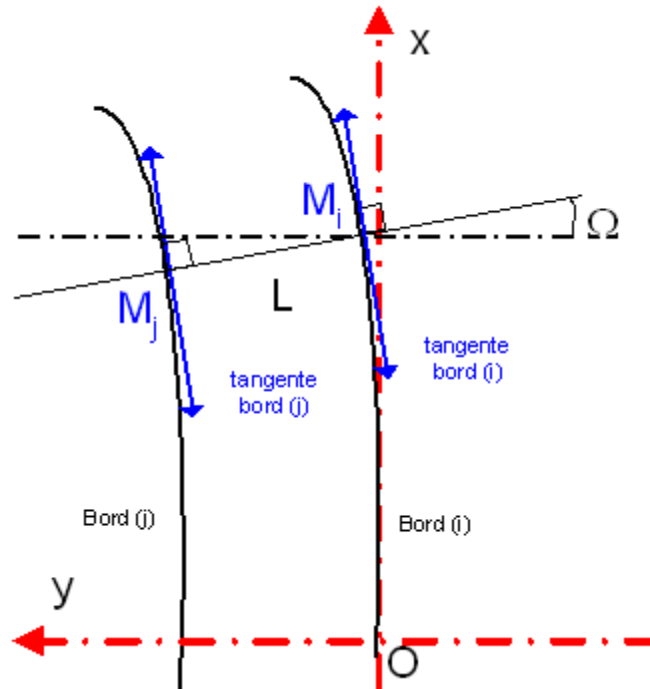


Figure 112 : Paramètres représentant la route

On note P_i la distance sur la droite $(M_i M_i)$ de M_i à l'axe x . On pose que les bords de route suivent des équations de la forme :

$$\begin{cases} x_i(x) = x - P_i * \sin(\Omega(x)) \\ y_i(x) = y(x) + P_i * \cos(\Omega(x)), \\ z_i(x) = z(x) \end{cases}$$

Cette hypothèse suppose donc que la route est sans dévers.

On peut de plus poser $x \gg P_i * \sin(\Omega(x))$

Puisqu'à proximité du véhicule on a $\Omega(x) = 0$ et en s'éloignant $\begin{cases} x \uparrow \\ \frac{P_i \sin(\Omega(x))}{x} \rightarrow 0 \end{cases}$.

On verra par la suite que cette hypothèse est vérifiée lorsque la courbure des virages est faible ou lorsque les virages sont éloignés. Elle introduira néanmoins une certaine erreur de positionnement dans le cas de virages proches et de forte courbure.

On rappelle les équations (E6) et (E7) qui vont être utiles dans la suite des calculs permettant de retrouver la forme tridimensionnelle de la route à partir des coordonnées image des bords de marquages. On rappelle de plus les différentes expressions des variables utilisées dans ces expressions, en fonction des paramètres de la caméra :

(E6) :

$$\begin{cases} u = u_\infty + \frac{Z(\cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi) - Y \cos\Theta \cos\Phi}{x \cos^2\Phi \cos^2\Psi + Y \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi - Z \cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi} k_u f \\ v = v_\infty + \frac{Y \sin\Theta \cos\Phi - Z(\cos\Theta \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi)}{x \cos^2\Phi \cos^2\Psi + Y \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi - Z \cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi} k_v f \end{cases}$$

(E7) :

$$\begin{cases} x \cos\Psi \gg Y \sin\Psi \\ x \cos\Psi \gg Z \cos\Phi \sin\Psi \end{cases}$$

Où on a $Z=z-t_z$ et $Y=y-t_y$ et :

$$u_\infty = \left(-\frac{\sin\Theta \sin\Phi}{\cos\Phi} + \frac{\cos\Theta \sin\Psi}{\cos\Phi \cos\Psi} \right) k_u f + u_0$$

$$v_\infty = -\left(\frac{\sin\Theta \sin\Psi}{\cos\Phi \cos\Psi} + \frac{\cos\Theta \sin\Phi}{\cos\Phi} \right) k_v f + v_0$$

Nous nous intéressons à la différence dans l'image entre la projection d'un point M_i du bord de route (i) et M_j du bord de route (j) situé sur la même traverse (Figure 112) : c'est à dire nous allons expliciter Δu et Δv à partir des équations (E6) et (E7) en ne faisant varier que le paramètre P. On pose $dP = P_j - P_i$. Nous pouvons montrer que :

(E8) :

$$\begin{cases} \Delta u = u_j - u_i = -\frac{k_u f \cos\Theta \cos\Omega}{x \cos\Phi \cos^2\Psi} dP \\ \Delta v = v_j - v_i = \frac{k_v f \sin\Theta \cos\Omega}{x \cos\Phi \cos^2\Psi} dP \end{cases}$$

Le résultat précédent est très important, puisqu'il souligne que, pour de faibles valeurs du roulis et après les approximations exprimées en (E7), la projection dans l'image des deux points M_i et M_j seront à la même ordonnée ($\Delta v = 0$). La seconde conséquence de ce résultat important est que nous pouvons déduire directement la coordonnée x de ce segment de traverse (nous rappelons que nous faisons plus haut l'approximation que tous les points du segment de traverse avaient le même x) en fonction de $\frac{\Delta u}{dP}$, (E9) :

$$x = -\frac{k_u f \cos\Theta \cos\Omega}{\cos\Phi \cos^2\Psi} \frac{dP}{\Delta u}$$

A partir de la valeur de x ainsi calculée, on peut obtenir les coordonnées Y et Z de chaque point de la traverse. Pour ce faire on réinjecte (E9) dans (E6). Pour ne pas accumuler les imprécisions on n'utilise pas cette fois-ci les simplifications (E7). On obtient ainsi le résultat (E10), dont le calcul détaillé est présenté en Annexe C.

(E10) :

$$\begin{cases} x = -\frac{k_u f \cos \Theta \cos \Omega}{\cos \Phi \cos^2 \Psi} \frac{dP}{\Delta u} \\ y = t_y + \frac{k_u f \cos \Theta \cos \Omega}{\cos \Psi} \frac{k_v (\cos \Theta \cos \Psi + \sin \Theta \sin \Phi \sin \Psi)(u - u_\omega) - k_u (\sin \Theta \cos \Psi - \cos \Theta \sin \Phi \sin \Psi)(v - v_\omega)}{k_u k_v f - k_u \cos \Theta \cos \Psi (\sin \Theta \sin \Psi + \cos \Theta \sin \Phi \cos \Psi)(v - v_\omega) + k_v \cos \Theta \cos \Psi (\cos \Theta \sin \Psi - \sin \Theta \sin \Phi \cos \Psi)(u - u_\omega)} \frac{dP}{\Delta u} \\ z = t_z + \frac{k_u f \cos \Theta \cos \Omega \cos \Phi}{\cos \Psi} \frac{k_v (u - u_\omega) \sin \Theta + k_u (v - v_\omega) \cos \Theta}{k_u k_v f - k_u \cos \Theta \cos \Psi (\sin \Theta \sin \Psi + \cos \Theta \sin \Phi \cos \Psi)(v - v_\omega) + k_v \cos \Theta \cos \Psi (\cos \Theta \sin \Psi - \sin \Theta \sin \Phi \cos \Psi)(u - u_\omega)} \frac{dP}{\Delta u} \end{cases}$$

L'équation (E10) doit théoriquement nous permettre à tout moment d'évaluer assez précisément les coordonnées tridimensionnelles de la route à partir de ses coordonnées image. Du fait de l'absence de données de référence concernant la forme exacte de la route au moment de ces développements, nous n'avons pas pu valider ce modèle à partir de données réelles. Nous avons donc procédé à la validation du modèle ainsi calculé à partir de données simulées. Ceci nous permet par la même occasion de nous affranchir des éventuelles erreurs de détection que nous aurions pu commettre.

V - 5. 3. 4. Validation sur données simulées :

L'équation (E4) nous permet, à partir d'une route simulée de créer son image d'après les paramètres internes et externes de la caméra. Ceci va nous permettre de comparer directement les résultats de la reconstruction tridimensionnelle aux données théoriques, ce qui nous permettra de valider notre modèle.

Les routes théoriques créées²⁶ sont représentées par deux listes de coordonnées représentant leurs bords droit et gauche. Ceci est totalement compatible avec les données que fournit notre algorithme d'extraction de marquages. Nous simulons des routes présentant des virages de courbures différentes ainsi que des modifications d'altitude. Enfin, nous testons notre algorithme avec des valeurs non nulles pour le roulis, le tangage et le lacet. Dans un premier temps nous supposons l'appariement des points de la route parfait de façon à ne pas multiplier les sources d'erreurs. Dans un deuxième temps nous étudions l'influence de l'erreur d'estimation des angles du repère caméra. Nous montrons enfin les mêmes modélisations en utilisant une méthode naïve d'appariement des points des bords de la route qui introduit une erreur additionnelle.

V - 5. 3. 4. 1. Résultats avec appariement parfait et angles connus

Le but de cette première validation est d'évaluer la pertinence des hypothèses effectuées pour simplifier le calcul. Nous considérons donc les valeurs du roulis, du tangage et du lacet parfaitement connues.

- *Cas 1* : Voie de 3 mètres de large, droite pendant 20 mètres puis virage à gauche de 300 mètres de rayon de courbure. A 10 mètres du véhicule, la route commence à monter et s'élève continuellement pour atteindre 1 mètre d'altitude à 30 mètres du véhicule. Roulis, tangage et lacet sont nuls. La Figure 113 représente l'image de la route ainsi formée, obtenue par une caméra PAL (figure du haut), ainsi que la vue de dessus de la route (en noir) et de ses reconstructions (en bleu et en rouge) dans la figure du bas.

²⁶ Au moyen du logiciel MATLAB®

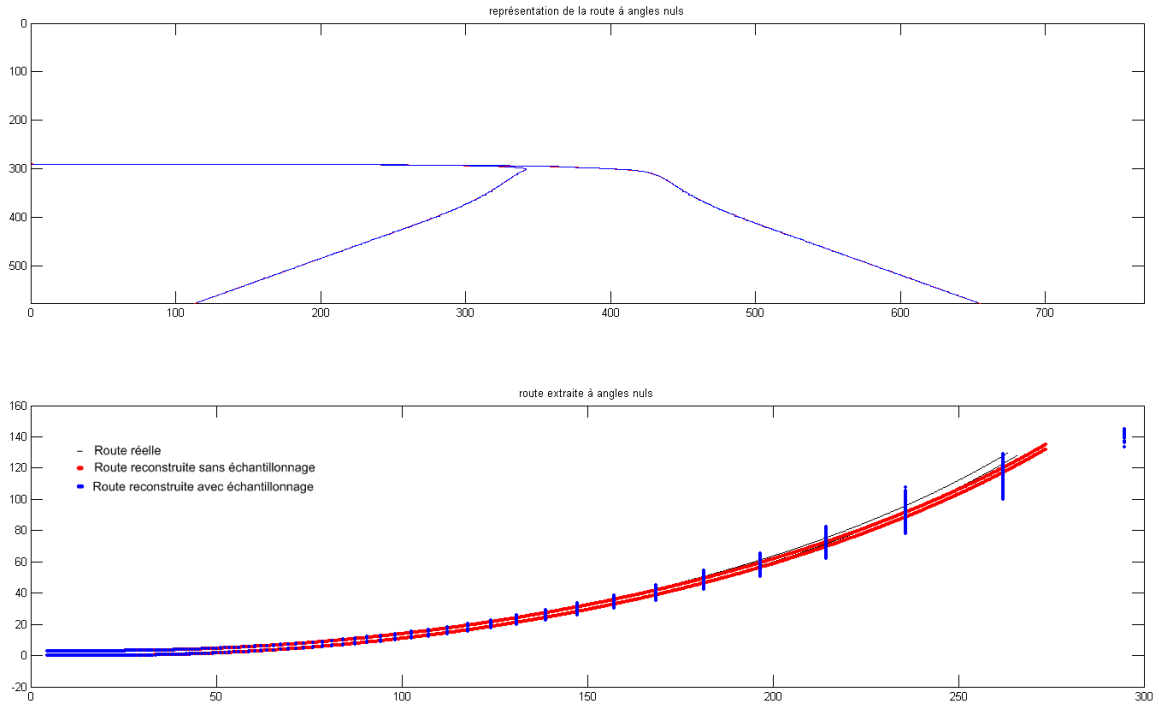


Figure 113 : Résultats de simulation à roulis, tangage et lacet nuls (cas 1)

On voit sur la figure précédente que l'algorithme de reconstruction tridimensionnelle donne de bons résultats dans les conditions du cas 1 même lorsque l'on utilise les coordonnées image échantillonnées (on réduit la précision de MATLAB pour simuler une image de caméra PAL en pleine résolution). Il a néanmoins tendance à sous estimer la courbure du virage à grande distance du véhicule. Les Figure 114 et Figure 115 permettent de mieux observer les erreurs commises lors de la reconstruction du cas 1.

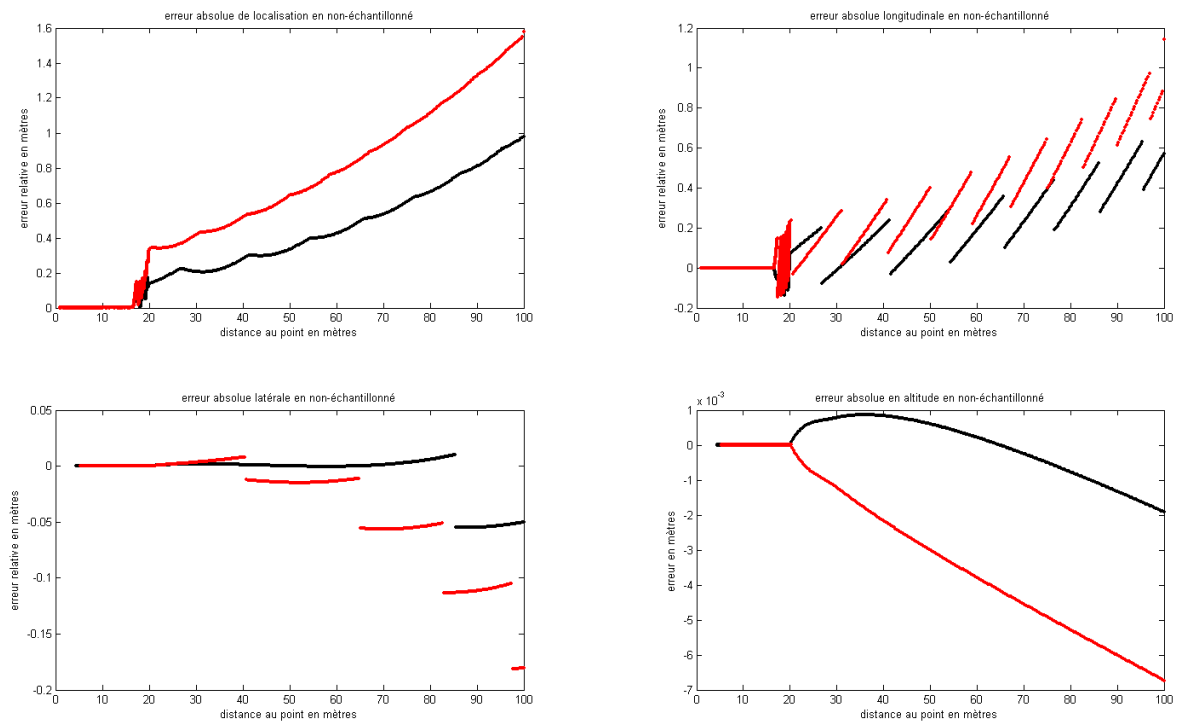


Figure 114 : Erreurs de reconstruction sans échantillonnage

Dans le cas où l'échantillonnage de l'image n'est pas fait, c'est-à-dire si on disposait d'une caméra à très haute définition (40000 x 30000 pixels environ) on voit que les erreurs commises pendant la reconstruction sont extrêmement faibles en altitude (quelques millimètres seulement à 100 mètres de distance !), très faibles en latéral (10 centimètres d'erreur à 90 mètres) et assez faibles en longitudinal (1 mètre d'erreur à 90 mètres). On voit aussi que ces erreurs dépendent du côté de la route traité. En effet, dans notre modélisation, le bord gauche (en noir sur les courbes d'erreur) de la route est privilégié par rapport au bord droit car l'erreur commise lors de l'approximation de la valeur de x est moindre ($P_i \sin \Omega$ étant moins grand).

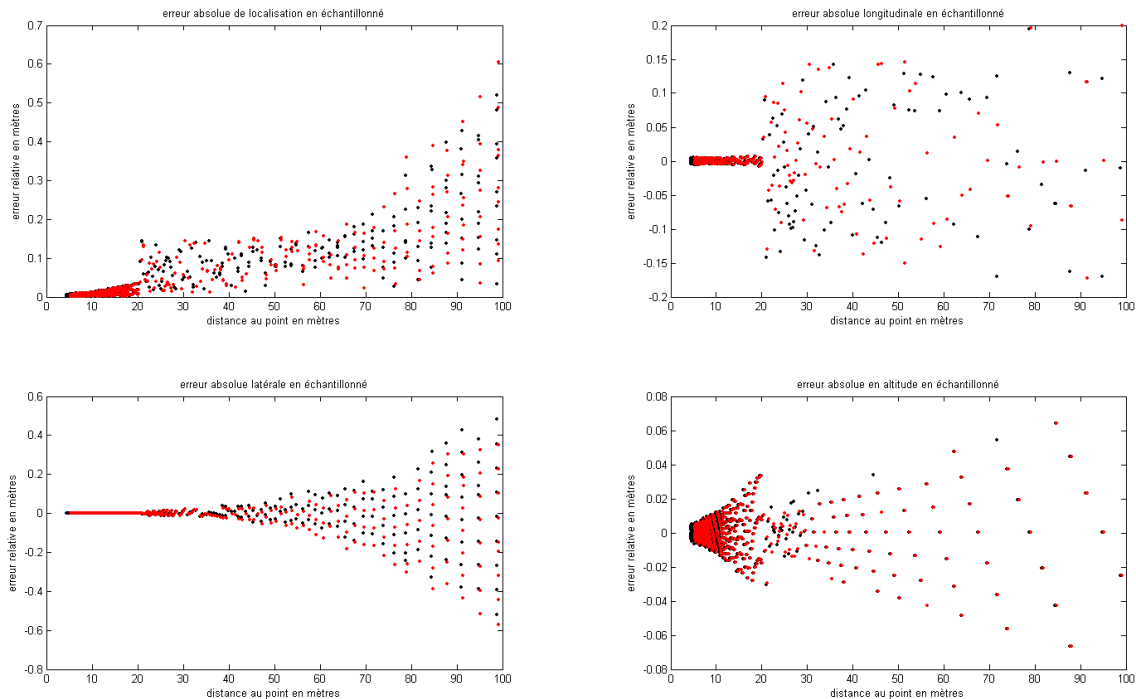


Figure 115 : Erreurs de reconstruction avec échantillonnage

Lorsque l'on considère l'image échantillonnée, c'est-à-dire lorsque l'on simule une image au format PAL, on constate que les erreurs de reconstruction sont plus fortes. Ceci provient de la pixellisation de l'image qui réduit la précision sur les coordonnées image des points. Néanmoins, on constate que l'erreur la plus importante est commise sur la distance longitudinale des marquages alors que les erreurs en altitude et en coordonnées latérales restent très faibles. Ici encore le côté gauche de la route est favorisé même si ce phénomène apparaît moins fortement que dans le cas non échantillonné.

- *Cas 2* : On utilise la même configuration que le cas 1 mais cette fois-ci tangage et roulis ne sont plus nuls. Tangage de 0.1 radian, lacet nul, roulis de 0.05 radians (Figure 116).

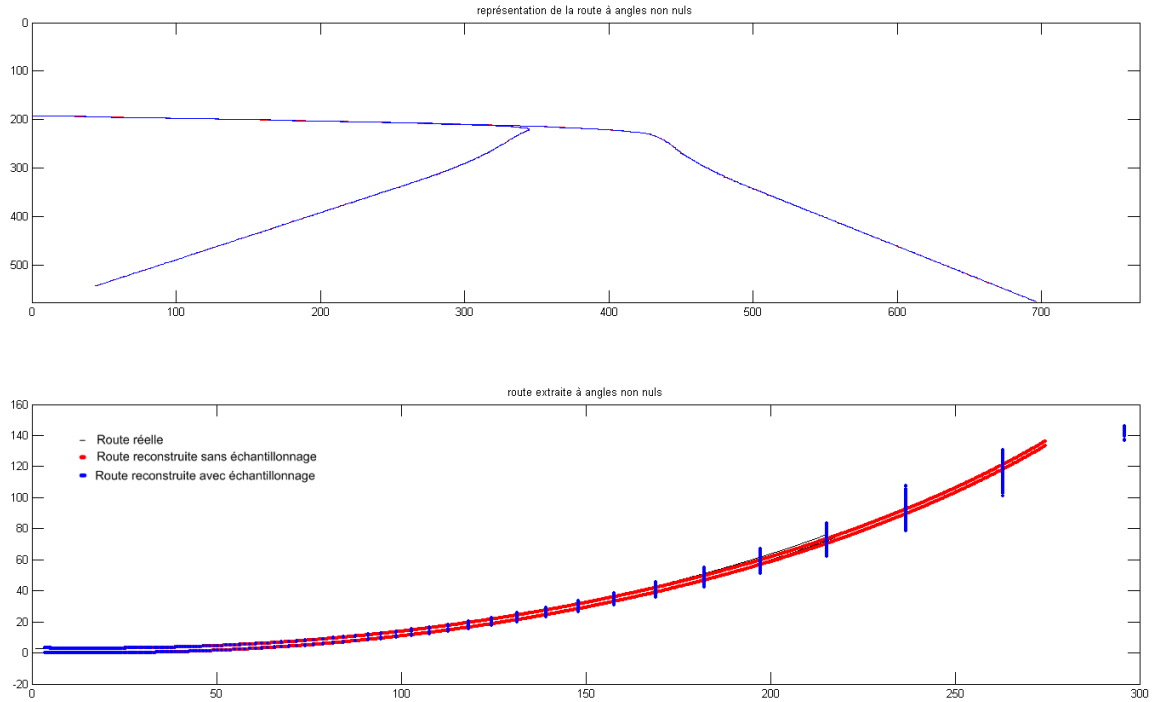


Figure 116 : Résultats de simulation avec les paramètres du cas 2

On voit ici encore que l'algorithme de reconstruction tridimensionnelle donne de bons résultats dans les conditions du cas 2 même lorsque l'on utilise les coordonnées image échantillonnées. On observe ici encore une certaine tendance à sous estimer la courbure du virage à grande distance du véhicule. Les Figure 117 et Figure 118 permettent de mieux observer les erreurs commises lors de la reconstruction du cas 2.

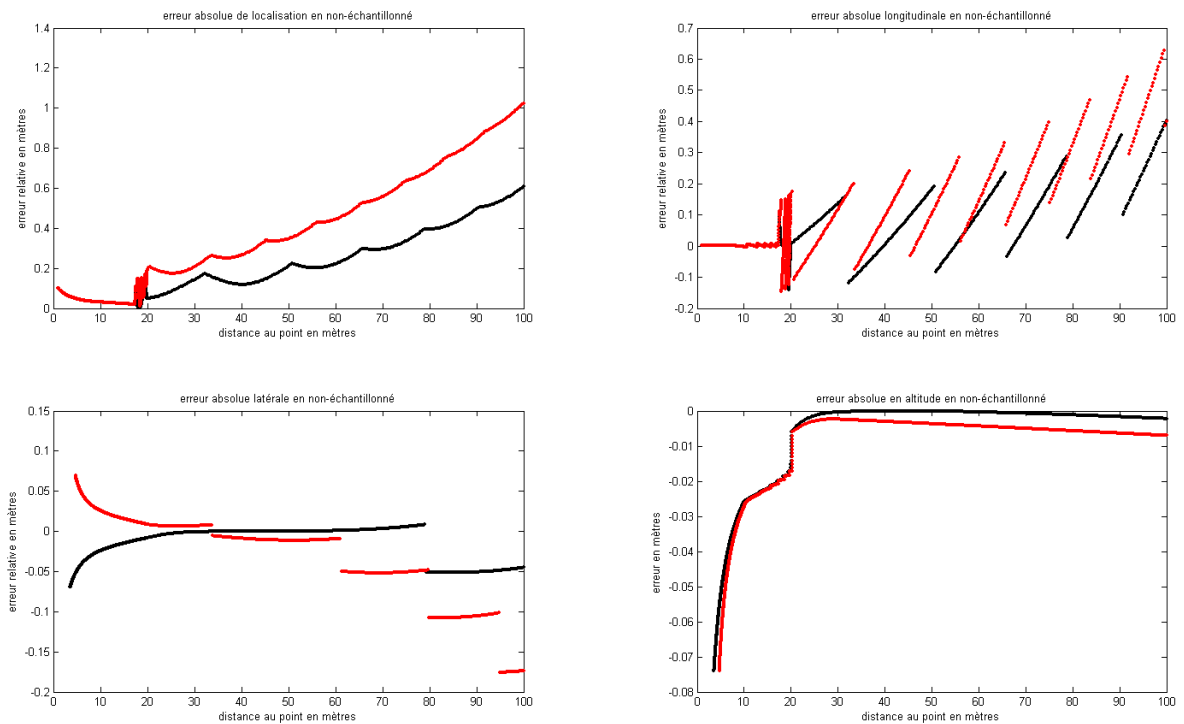


Figure 117 : Erreurs de reconstruction sans échantillonnage (cas 2)

On constate dans la Figure 117 que les angles de roulis et de tangages non nuls perturbent la reconstruction tridimensionnelle et augmentent l'erreur commise à courte distance du véhicule. Au contraire, ces angles n'ont pratiquement pas d'influence à très grande distance. Ceci provient de l'approximation (E7), utilisée pour pouvoir calculer la valeur de x , qui n'est pas utilisable dans ce cas. Ces erreurs commises à faible distance sont néanmoins très faibles (au maximum 5 centimètres) et ne nécessitent donc pas d'intervention pour les corriger. L'apparition de la discontinuité de l'erreur longitudinale au début du virage provient d'une erreur d'appariement de points lors de la simulation.

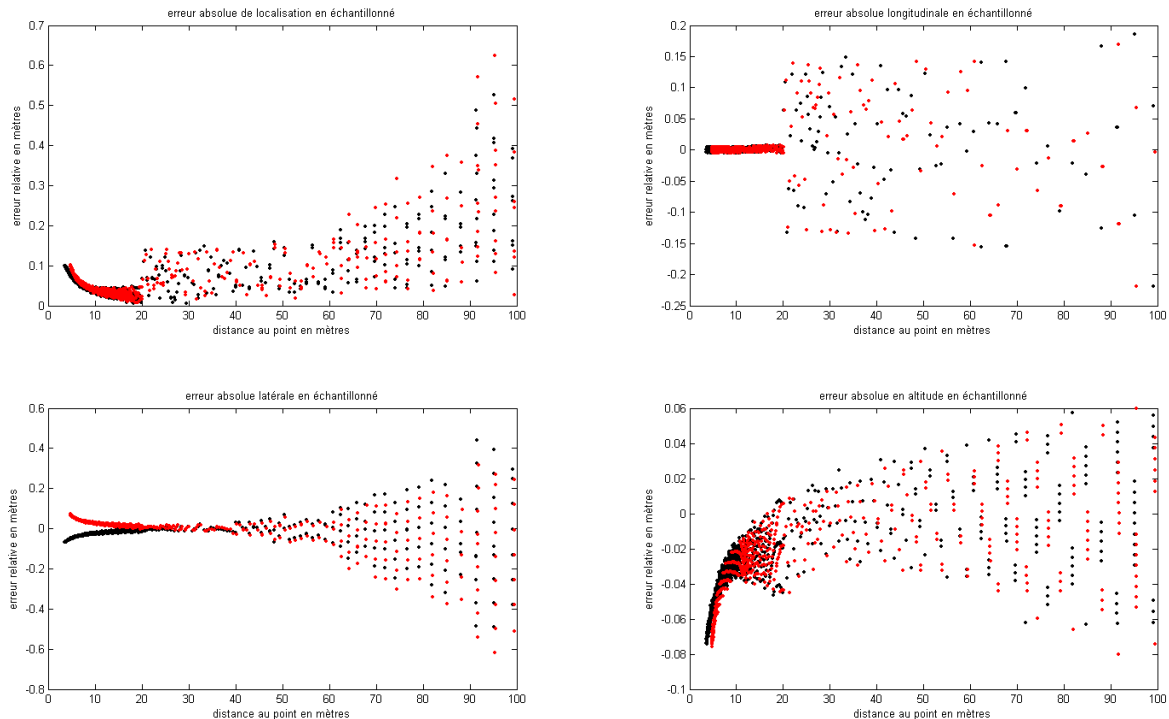


Figure 118 : Erreurs de reconstruction avec échantillonnage (cas 2)

L'erreur en échantillonnée est cette fois encore plus forte et est environ double de l'erreur commise dans le cas 1. Ceci s'explique non seulement par les erreurs commises lors de l'approximation de x mais aussi par les problèmes de visibilité de la route après la côte qui ne permettent pas d'avoir une bonne précision sur les contours de la route (comme on peut le voir sur la Figure 116).

Pour évaluer l'efficacité de l'algorithme avec une meilleure visibilité, on utilise le scénario suivant :

- *Cas 3* : Voie de 3 mètres de large, droite pendant 20 mètres puis virage à gauche de 300 mètres de rayon de courbure. A 10 mètres du véhicule, la route commence à monter et s'élève continûment pour atteindre 20 mètres d'altitude à 300 mètres du véhicule. Roulis, tangage et lacet sont semblables au cas 2 (tangage de 0.1 radian, lacet nul, roulis de 0.05 radian) (Figure 119).

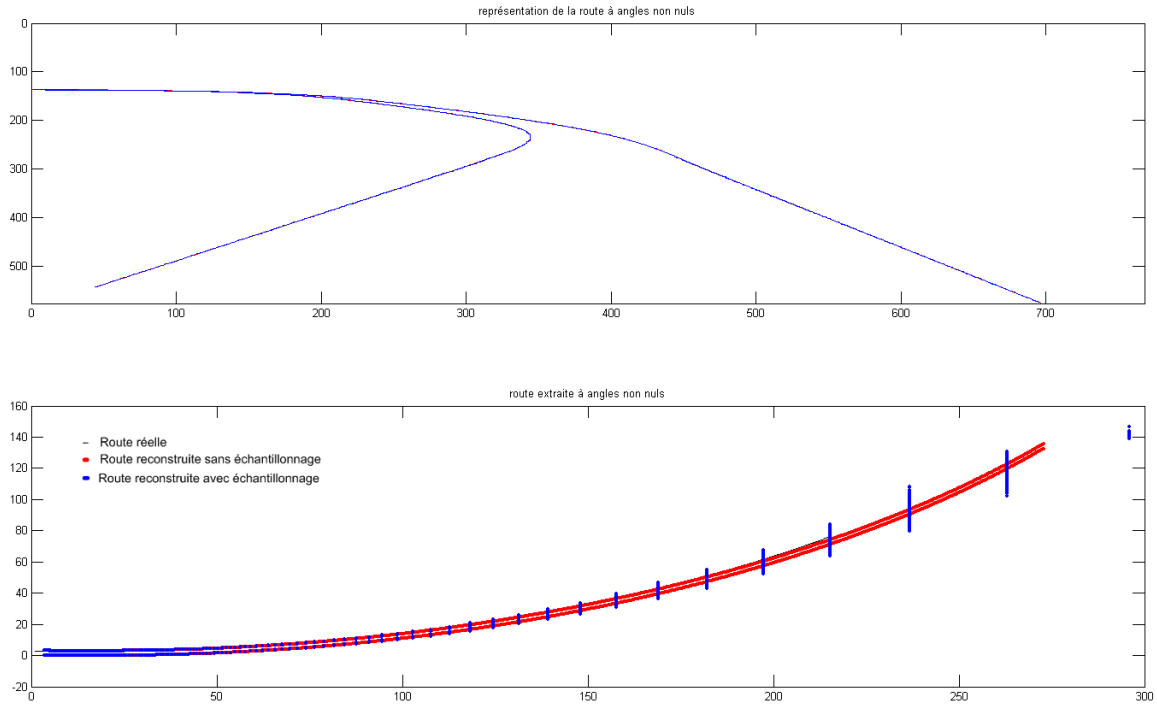


Figure 119 : Résultats de simulation avec les paramètres du cas 3

On voit ici que le virage est beaucoup plus visible, ce qui devrait aider l'algorithme de reconstruction tridimensionnelle à obtenir des erreurs faibles. On constate par ailleurs, comme dans les deux premiers cas, que la route reconstruite est très proche de la route réelle. On reproduit ici encore les courbes d'erreurs avec et sans échantillonnage (Figure 120 et Figure 121).

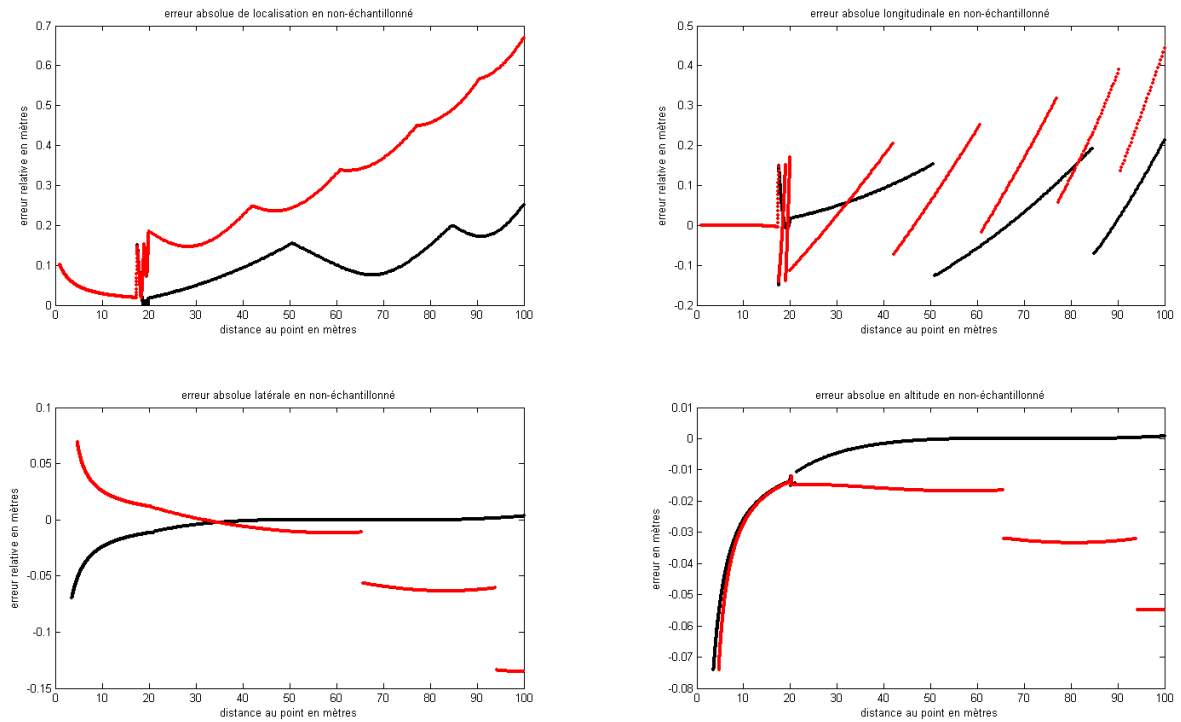


Figure 120 : Erreurs de reconstruction sans échantillonnage (cas 3)

On constate, dans les courbes d'erreurs précédentes, que l'erreur est légèrement plus faible que dans le cas 2 mais cette amélioration est extrêmement faible. On voit encore une fois apparaître un saut de l'erreur longitudinale du encore une fois à un problème d'appariement à l'interface droite virage.

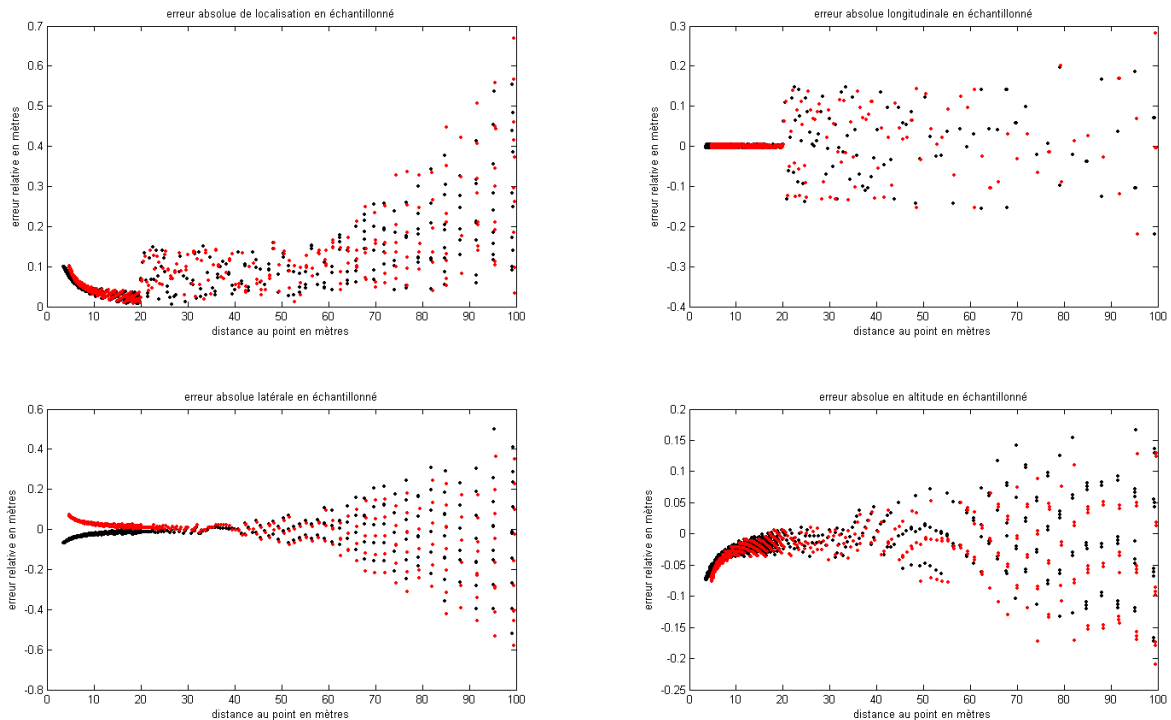


Figure 121 : Erreurs de reconstruction avec échantillonnage (cas 3)

On retrouve ici des résultats semblables aux résultats obtenus avec le cas 2. Il apparaît donc que, même si la visibilité de la route amène une réduction de l'erreur non négligeable lors de la reconstruction tridimensionnelle, les approximations utilisées pour simplifier le calcul de x sont la principale source d'erreurs de l'algorithme. Néanmoins, on peut considérer que les erreurs commises restent acceptables si l'on prend en considération la distance des points traités.

V - 5. 3. 4. 2. Résultats avec angles du repère mal évalués

On suppose maintenant que l'on évalue mal les angles du repère caméra. En effet, on considèrerait jusqu'à présent ces angles parfaitement connus, ce qui n'est pas forcément le cas dans la réalité.

- *Cas 4* : On utilise les mêmes paramètres qu'au cas 2, on introduit néanmoins un pourcentage d'erreur dans les angles du repère caméra. On ne s'intéresse ici qu'aux résultats avec échantillonnage qui sont toujours plus mauvais. On a considéré des erreurs de 5% (Figure 122), 10% (Figure 123), 20% (Figure 124) et 50% (Figure 125) sur les valeurs des angles.

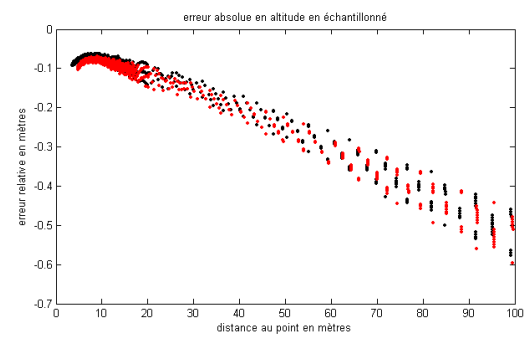
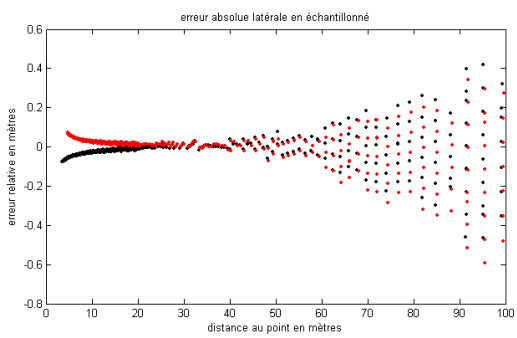
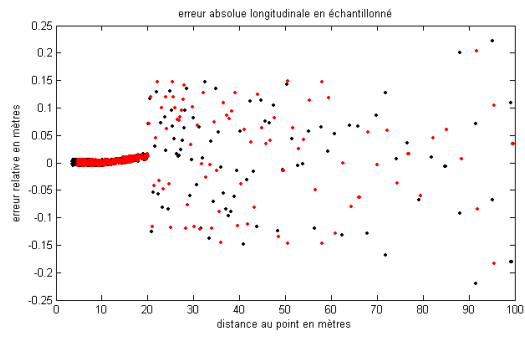
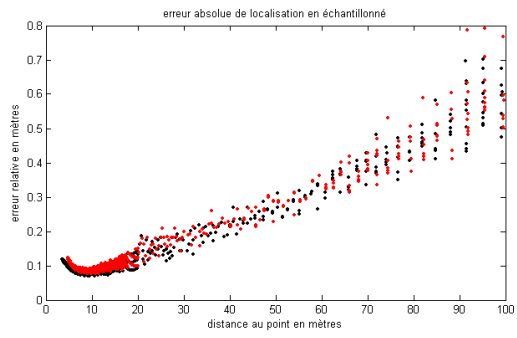


Figure 122 : Erreur de 5%

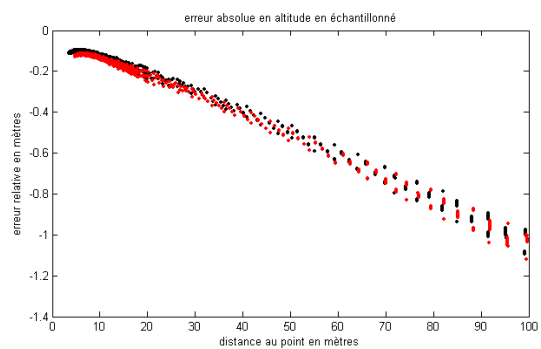
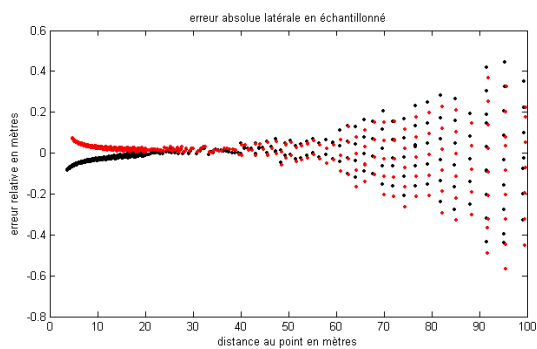
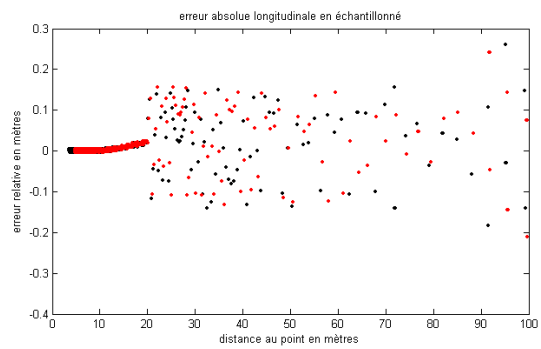
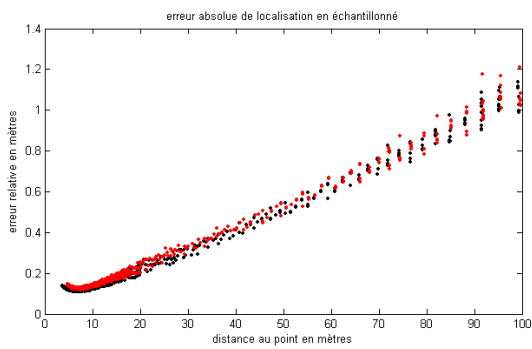


Figure 123 : Erreur de 10%

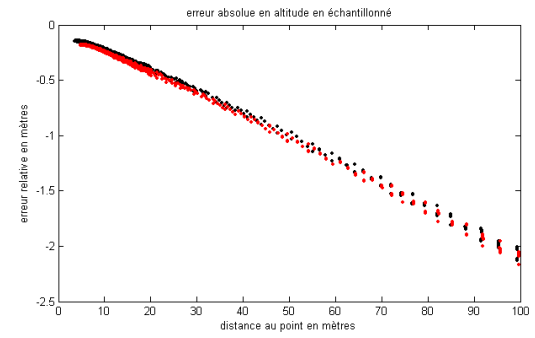
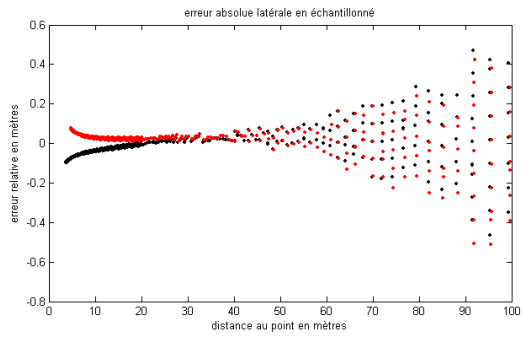
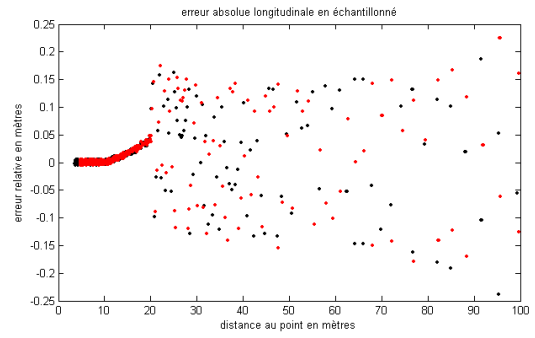
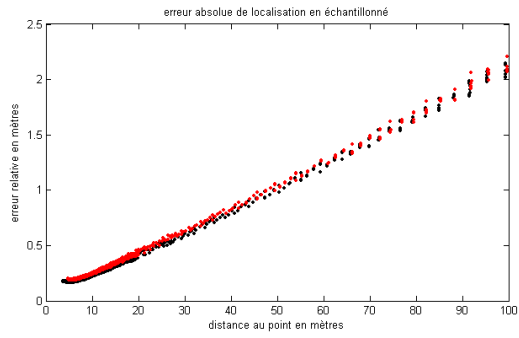


Figure 124 : Erreur de 20%

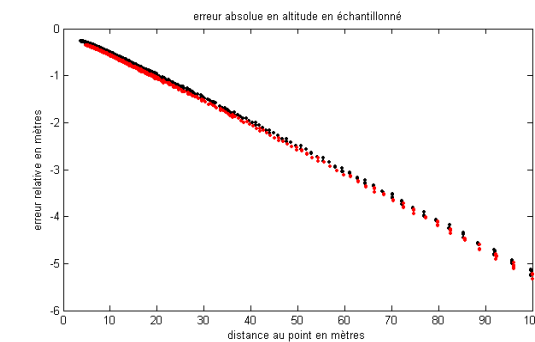
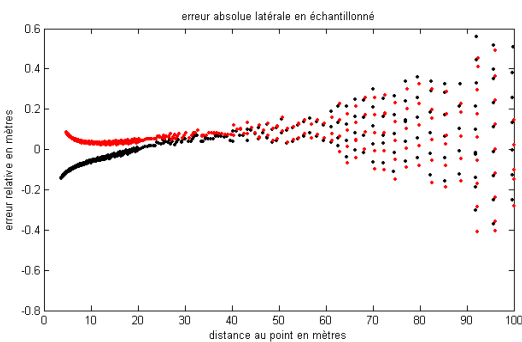
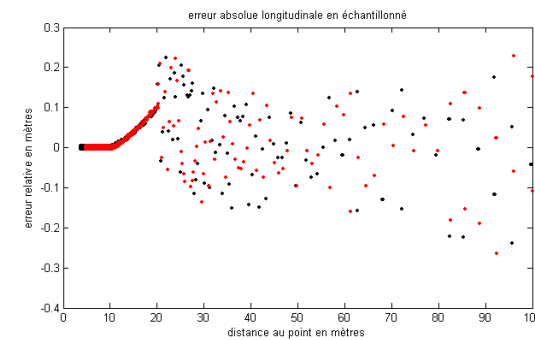
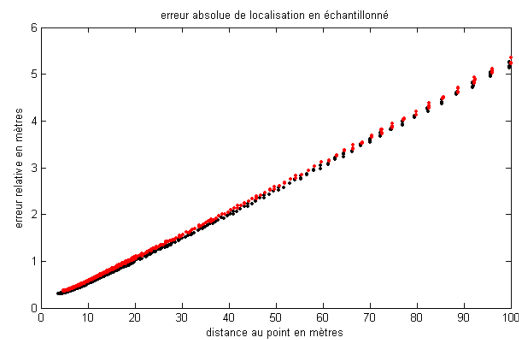


Figure 125 : Erreur de 50%

On constate dans ces différents graphiques que l'erreur introduite au niveau des angles n'a d'influence, dans le cas considéré que sur l'erreur en altitude et quasiment aucune sur les erreurs longitudinale et latérale. Néanmoins, il faut prendre en compte le fait que le lacet était nul dans le cas considéré et que le roulis était très faible. On a donc réalisé d'autres expériences à fort roulis mal mesuré (erreur de 20%) qui ont amené des erreurs de positionnement comprises entre 2% à 20 mètres du véhicule et 17% à 100 mètres du véhicule. D'autres expériences à lacet non nul et mal mesuré ont montré des résultats similaires avec cependant des erreurs encore plus fortes à très grande distance. Néanmoins, à distance relativement faible (jusqu'à 50 mètres environ) l'erreur relative est inférieure à 10% ce qui montre une certaine robustesse de notre algorithme face à ces erreurs de mesures.

V - 5. 3. 4. 3. Résultats avec erreurs d'appariement

Nous considérons maintenant les même cas que précédemment mais en utilisant cette fois une méthode naïve d'appariement consistant à considérer que deux points, ayant la même ordonnée dans l'image, peuvent être appariés. On montre ici les résultats ainsi obtenus.

- *Cas 1* : La Figure 126 montre l'erreur de reconstruction créée au cas 1 lorsque l'appariement n'est pas parfait. On voit que cette erreur est très faible tant que le virage n'est pas trop marqué. Ceci est dû à la très faible erreur d'appariement qui est alors commise. Au contraire, plus la courbure du virage est marquée et moins le virage est visible, plus cette erreur augmente. L'erreur d'appariement commise a ainsi tendance à amplifier la sous-évaluation de la courbure du virage. On peut cependant voir que les résultats restent corrects jusqu'à 50~60 mètres.

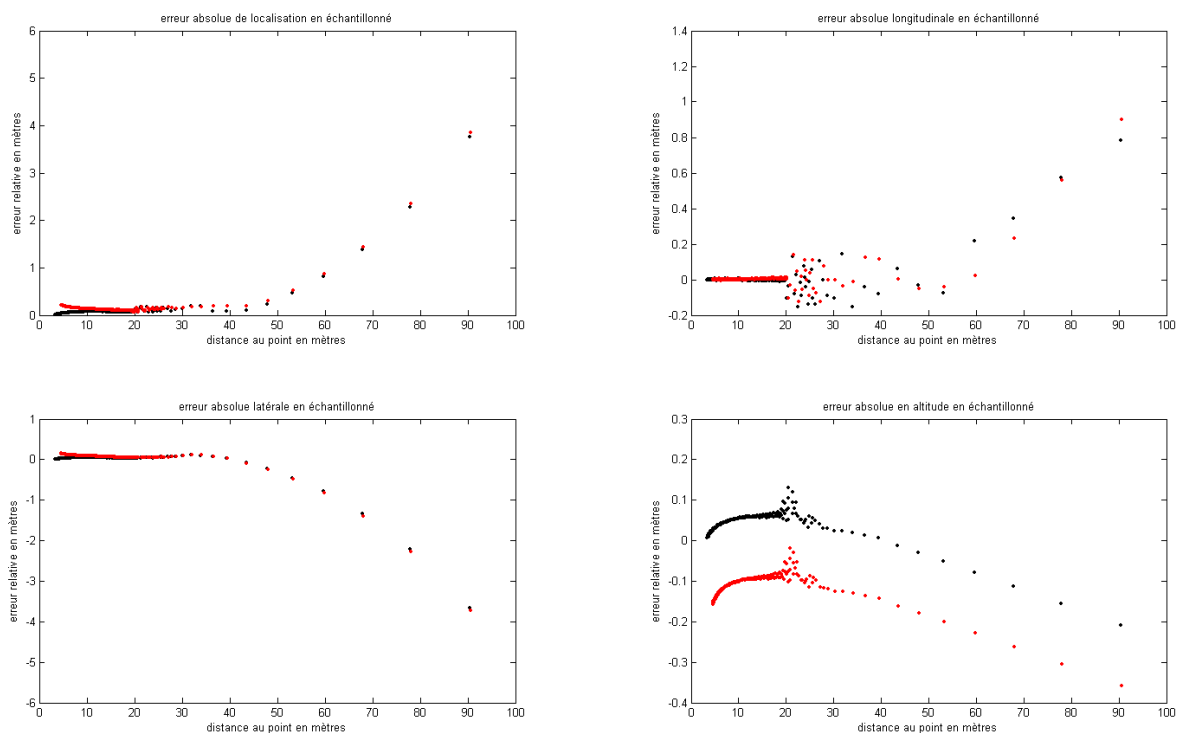


Figure 126 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement (cas 1)

- *Cas 2* : La Figure 127 montre l'erreur de reconstruction créée au cas 2 lorsque l'appariement n'est pas parfait. On voit une fois encore que cette erreur est très faible tant que le virage n'est pas trop marqué. Ceci est dû à la très faible erreur d'appariement qui est alors commise. On constate aussi que les angles du repère n'ont que peu d'influence sur l'erreur commise par rapport à la courbure du virage.

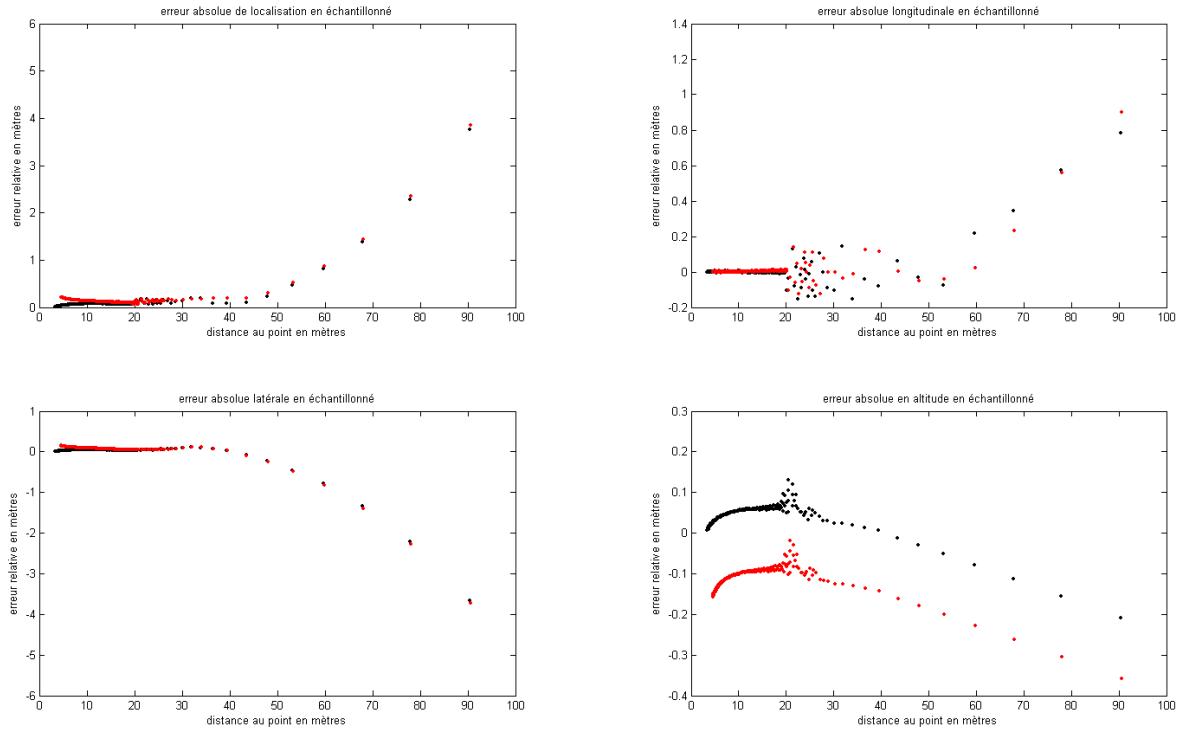


Figure 127 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement (cas 2)

- *Cas 3* : La Figure 128 montre l'erreur de reconstruction créée au cas 3 lorsque l'appariement n'est pas parfait. On voit ici que l'erreur commise est beaucoup plus faible que précédemment car le virage est beaucoup plus visible. L'erreur commise tend cependant toujours à faire sous-évaluer la courbure du virage.

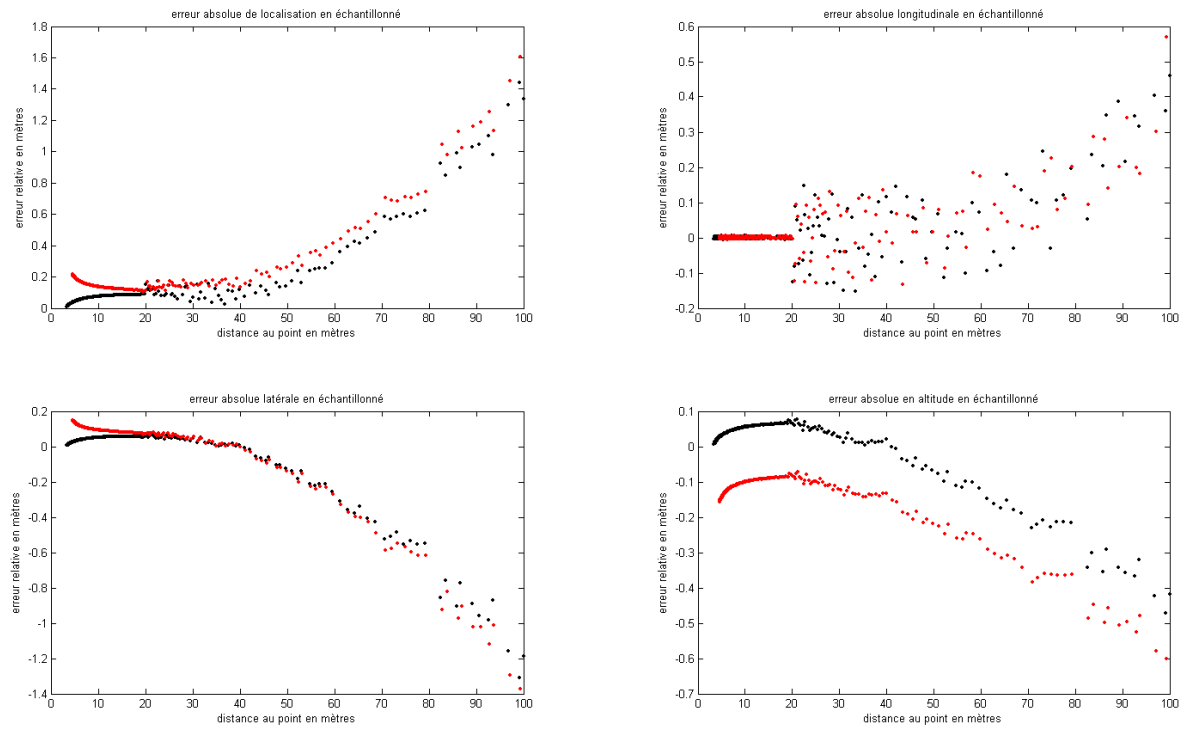


Figure 128 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement (cas 3)

- Cas 4 : Les Figure 129 à Figure 132 montre l'influence combinée des erreurs d'appariement et d'évaluation des angles du repère. On voit une fois encore que ces erreurs d'angles tendent principalement à augmenter l'erreur sur l'altitude de la route, ceci étant principalement dû au fort angle de tangage utilisé.

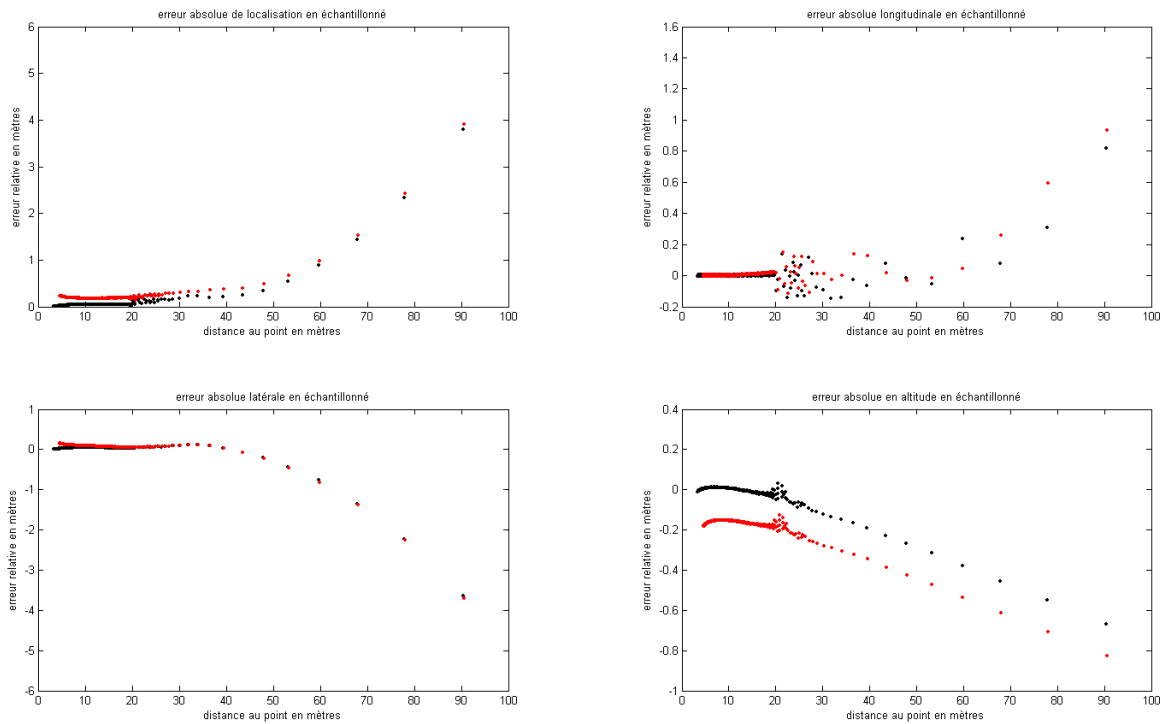


Figure 129 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (5%)

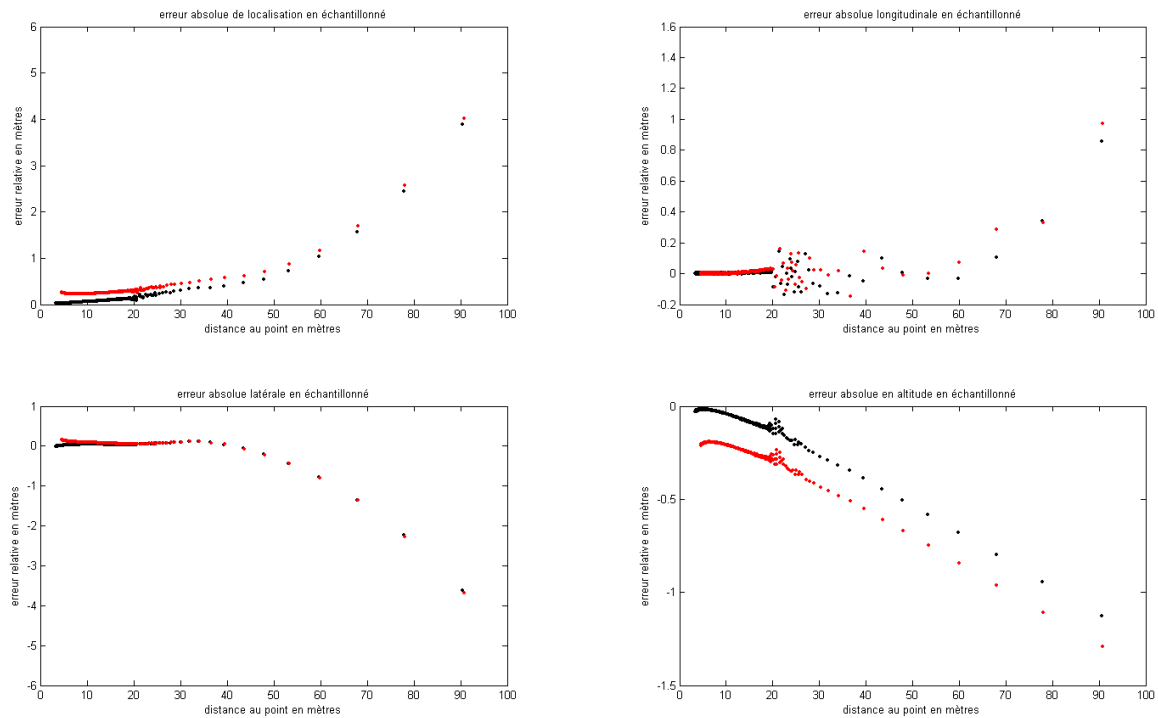


Figure 130 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (10%)

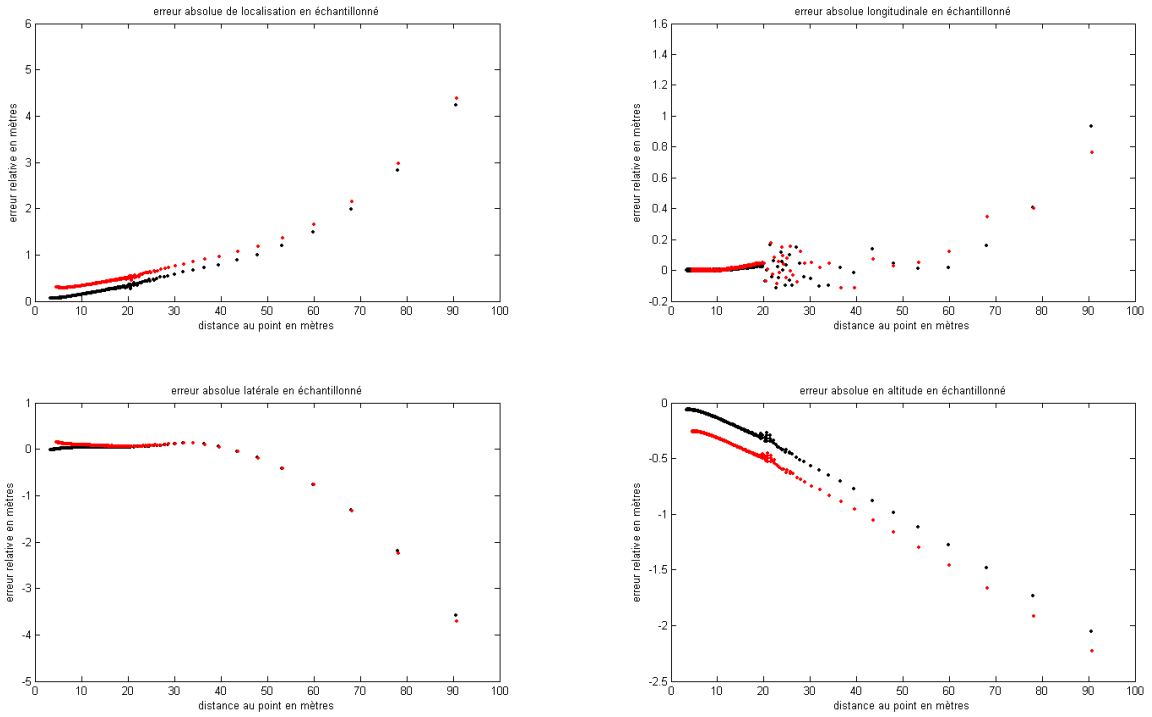


Figure 131 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (20%)

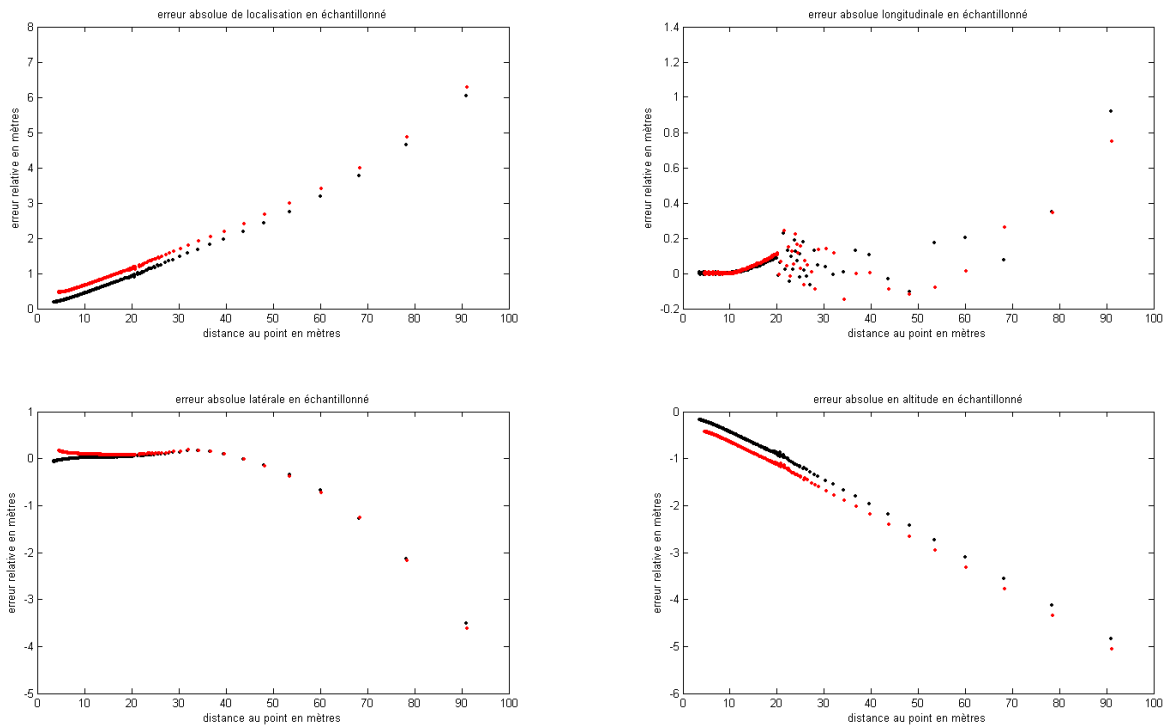


Figure 132 : Erreurs de reconstruction dues aux erreurs d'appariement et d'angles (50%)

V - 5. 3. 5. Conclusions

Les résultats de l'étude sur des données simulées ont montré que l'algorithme de reconstruction proposé donne de bons résultats, surtout lorsqu'on dispose d'une image à très haute résolution. On obtient alors des erreurs de localisation inférieures à 1% ce qui est un résultat excellent. Les résultats deviennent moins bons lorsqu'on utilise une résolution assez faible (PAL par exemple) et on a alors une marge d'erreur de l'ordre de 5 %. La précision de la reconstruction n'est donc pas parfaite mais devrait être amplement suffisante pour les applications considérées. Il sera néanmoins nécessaire d'utiliser une méthode d'appariement plus sophistiquée afin de limiter au maximum les erreurs d'appariement qui créent les plus fortes erreurs. La méthode naïve proposée ici ne permet en effet d'obtenir de bons résultats qu'à moyenne distance uniquement.

On constate néanmoins que, dans tous nos premiers tests, les valeurs des angles du repère caméra étaient supposées parfaitement connues. Cette hypothèse s'avère très contraignante et nous devons donc nous assurer que ces valeurs seront connues avec suffisamment de précision pour ne pas avoir d'erreurs trop fortes comme on l'a vu au cas 4. Ceci pourra être effectué de façon visuelle comme nous allons le présenter maintenant ou par le biais de la centrale inertielle embarquée dans le véhicule comme présenté dans la section V - 3. 1. La première solution a l'avantage d'être beaucoup moins onéreuse.

V - 5. 4. Estimation des angles du repère caméra :

L'algorithme de reconstruction tridimensionnelle de la route que nous utilisons offre, comme nous l'avons vu, une bonne précision sur les positions des marquages dans le cas parfait. Malheureusement, si l'on ne dispose pas des mesures exactes des angles du repère caméra par rapport à la route, l'algorithme introduit une erreur qui peut être non négligeable comme le montre le cas 4 de l'étude précédente. Pour remédier à ce problème nous introduisons une méthode de mesure de ces angles à partir de l'image reçue. On se place toujours dans le cas d'une route de largeur constante.

On rappelle le résultat (E5) présenté précédemment qui donne les coordonnées image du point de fuite :

$$u_{\infty} = \left(-\frac{\sin \Theta \sin \Phi}{\cos \Phi} + \frac{\cos \Theta \sin \Psi}{\cos \Phi \cos \Psi} \right) k_u f + u_0$$
$$v_{\infty} = - \left(\frac{\sin \Theta \sin \Psi}{\cos \Phi \cos \Psi} + \frac{\cos \Theta \sin \Phi}{\cos \Phi} \right) k_v f + v_0$$

On voit dans ces deux équations que la connaissance de l'angle de roulis Θ permet d'obtenir immédiatement les valeurs des angles de tangage Φ et de lacet Ψ à partir de la position du point de fuite par rapport à la projection image du centre optique (de coordonnées u_0, v_0).

V - 5. 4. 1. Calcul du roulis :

Il est nécessaire de pouvoir calculer le roulis pour pouvoir ensuite calculer simplement les angles de tangage et de lacet de la caméra par rapport à la route.

Les équations (E10) montrent que la connaissance de u, v et Δu permet d'établir de très bonnes équations de mesure de la forme de la route à partir de l'image comme on a pu le voir précédemment. Δu représente la différence entre les coordonnées horizontales dans l'image de la projection des points situés sur une même droite de traverse de la route. Les points sont dits associés. Lorsque le roulis est nul, on sait par l'équation (E8) que $\Delta v=0$, donc que les points associés sont situés sur une même ligne de l'image. Dès que le roulis n'est plus nul, les points associés ne sont plus sur cette même ligne, et il est indispensable de mesurer le couple $(\Delta u, \Delta v)$ pour utiliser les résultats des équations (E10).

La Figure 133 fait apparaître la modification de l'orientation des segments de traverse lorsque le roulis est non nul.

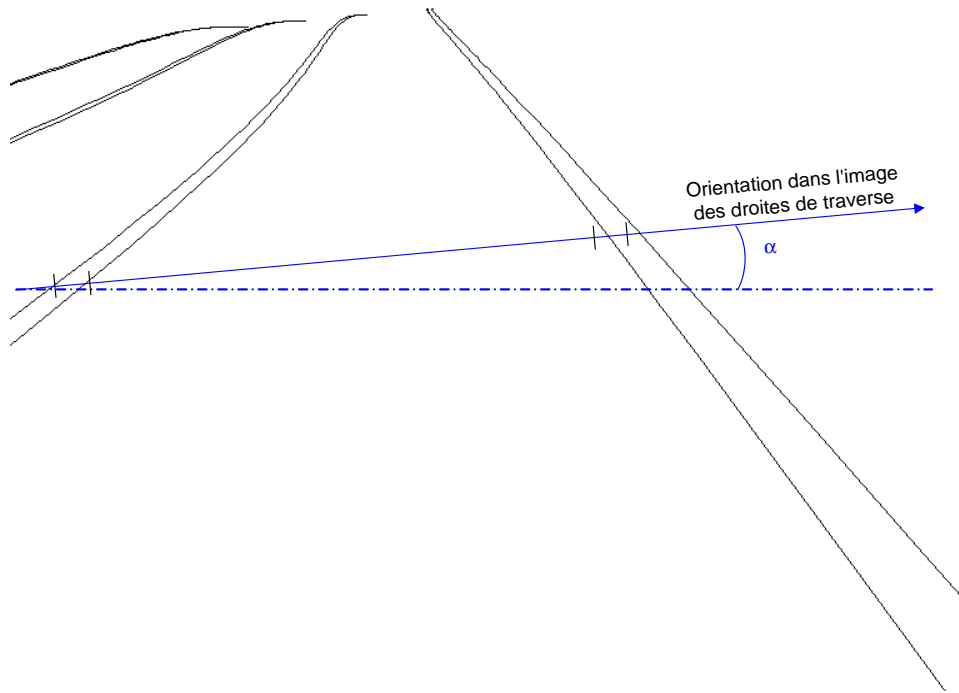


Figure 133 : Changement d'orientation des droites de traverse avec roulis

A partir des équations (E8), on obtient la relation liant les valeurs de Δu et Δv :

$$\Delta v = -\frac{k_v}{k_u} \tan \Theta \Delta u$$

Cette relation couplée à la Figure 133, qui montre comment se projettent les segments de traverse dans l'image en cas de roulis non nul, nous permet d'obtenir la relation suivante entre l'angle α et l'angle Θ (E11) :

$$\tan \alpha = \frac{k_v}{k_u} \tan \Theta$$

Les Figure 134, Figure 135 et Figure 136 montrent la superposition des mesures de $\Delta u_{\alpha=0}$ pour des images de route avec et sans roulis. Nous appelons $\Delta u_{\alpha=0}$ la différence entre les coordonnées horizontales de 2 points de 2 bords de route qui se projetteraient sur une même ligne de l'image : cela revient à dire que $\Delta u_{\alpha=0}$ est la mesure de Δu en supposant que le roulis nul, c'est à dire $\Delta v = 0$. Nous rappelons que nous appelons bord de route le bord gauche ou le bord droit d'un marquage.

Dans ces figures, nous avons donc superposé (en gris) l'intervalle $\Delta u_{\alpha=0}$ de deux bords consécutifs d'une même ligne de l'image, lorsqu'ils existent : le bord gauche d'un marquage et le bord droit de ce même marquage, ou encore le bord droit d'un marquage et le bord gauche du marquage suivant. Dans les lignes les plus basses de l'image, nous n'avons donc superposé que la courbe $\Delta u_{\alpha=0}$ du seul marquage présent, celui le plus à droite de la route. Puis en remontant dans l'image, apparaît le marquage directement à gauche et donc très rapidement deux nouvelles mesures de $\Delta u_{\alpha=0}$: celle entre les bords gauche et droit de ce marquage, et celle entre le bord droit du marquage le plus à droite, et le bord gauche du nouveau marquage. On procède ainsi jusqu'à l'ordonnée de la ligne d'horizon.

Les trois figures considérées représentent la vue d'une même route avec des valeurs du roulis croissantes. La route simulée est composée de trois voies de largeur constante (3.5 m) séparées par des marquages de largeur constante (20 cm). Elle présente de plus une courbure horizontale et verticale. Les marquages sont en gris foncé, les courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ en gris clair.

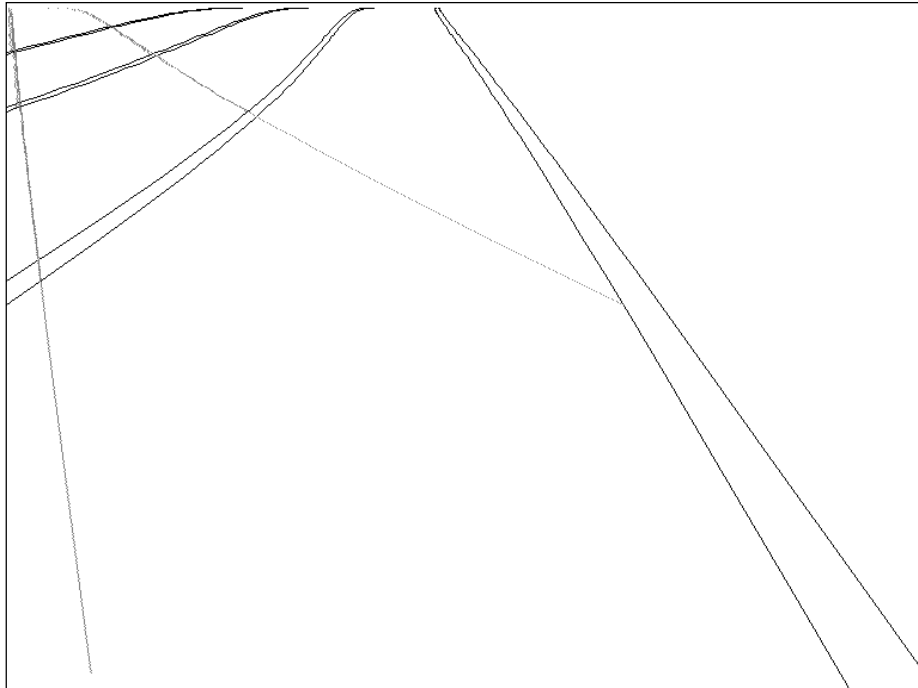


Figure 134 : Route à roulis nul et courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ superposées

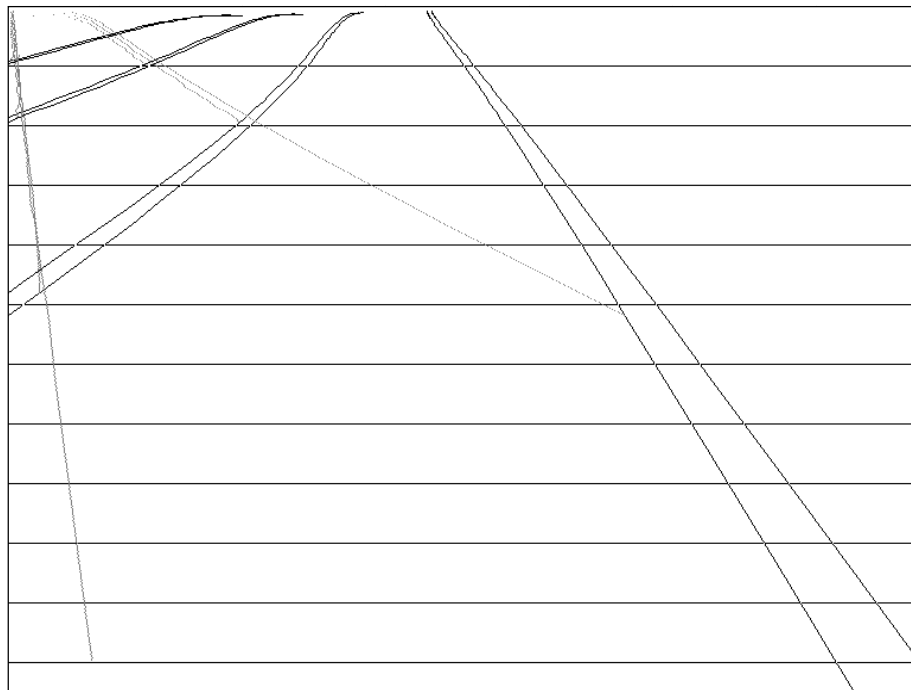


Figure 135 : Route non nul (0.5°) et courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ superposées

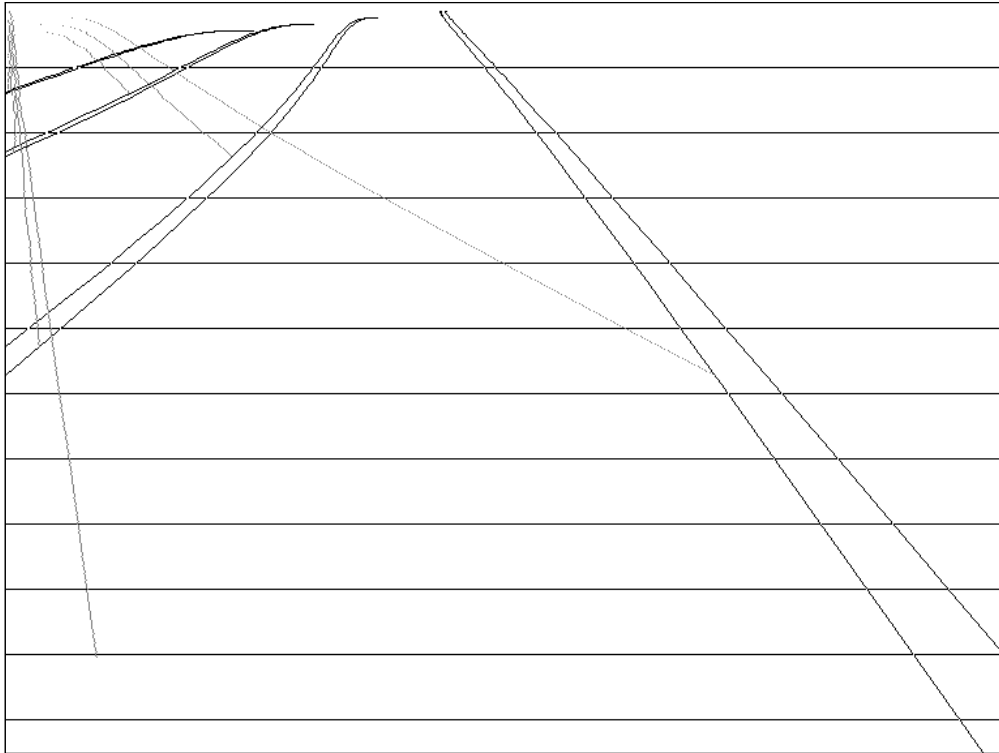


Figure 136 : Route à roulis non nul (1°) et courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ superposées

Les Figure 135 et Figure 136 font apparaître un phénomène très intéressant pour nous puisqu'on remarque que même pour de très faibles valeurs du roulis les courbes $\Delta u_{\alpha=0}$ ne se superposent plus.

Le principe de notre estimation du roulis est donc simple puisqu'il repose sur l'estimation de l'angle α pour lequel les courbes Δu_{α} se superposent (Figure 137). Cette estimation demandera donc une certaine quantité de ressources pour calculer toutes les courbes Δu_{α} nécessaires à l'obtention d'une bonne précision sur le roulis. On utilisera pour cette estimation une méthode multi échelles qui nous permettra de réduire considérablement les temps de calcul nécessaires. Cette méthode consistera à tester les valeurs de α avec une résolution grossière, trouver les deux valeurs de α donnant les meilleurs résultats, puis recommencer sur ce nouvel intervalle avec une résolution plus fine et ainsi de suite jusqu'à obtenir une précision suffisante pour le roulis afin de limiter les erreurs lors de la reconstruction.

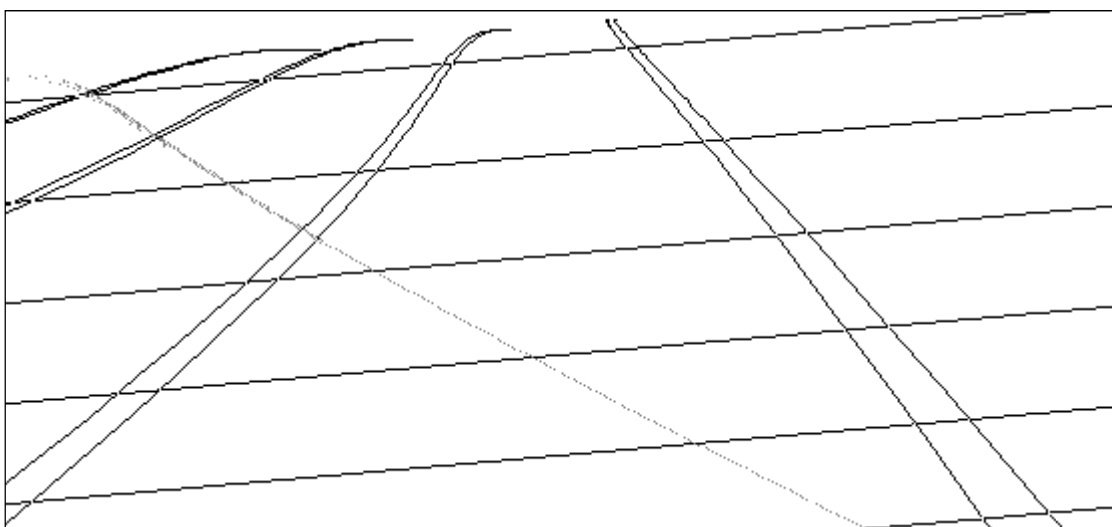


Figure 137 : Route avec $\Theta=5^\circ$ et superposition de la courbe $\Delta u_{\alpha=5^\circ}$ ($k_u=k_v$)

V - 5. 4. 2. Calcul des angles de lacet et de tangage :

Une fois le roulis calculé, les valeurs des angles de lacet et de tangage, peuvent être obtenues facilement à partir de l'équation (E5). On obtient ainsi (E12) :

$$\begin{cases} \tan \Phi = \frac{v_{\infty} - v_0}{k_v f} \cos \Theta - \frac{u_{\infty} - u_0}{k_u f} \sin \Theta \\ \frac{\tan \Psi}{\cos \Phi} = \frac{u_{\infty} - u_0}{k_u f} \cos \Theta + \frac{v_{\infty} - v_0}{k_v f} \sin \Theta \end{cases}$$

V - 5. 4. 3. Détermination du point de fuite :

On voit qu'il est relativement facile d'obtenir les valeurs des angles du repère caméra par rapport au repère route à partir de la position du point de fuite et des bords de route. Le filtre de convolution appliqué à l'image présentée précédemment nous permet d'obtenir avec une bonne précision les bords des marquages.

L'obtention du point de fuite se fait alors simplement en appliquant une transformation de Hough à la partie de la route la plus proche du véhicule. En effet, cette partie de la route peut être considérée comme plane et de hauteur nulle, or dans l'image, toutes les droites parallèles du monde réel appartenant au plan d'altitude nulle se coupent au point de fuite. La transformée de Hough va donc nous fournir ces droites par le biais des marquages qui sont parallèles. Il ne nous reste plus alors qu'à trouver la position de l'intersection de ces droites dans l'image pour obtenir les coordonnées du point de fuite (Figure 138).

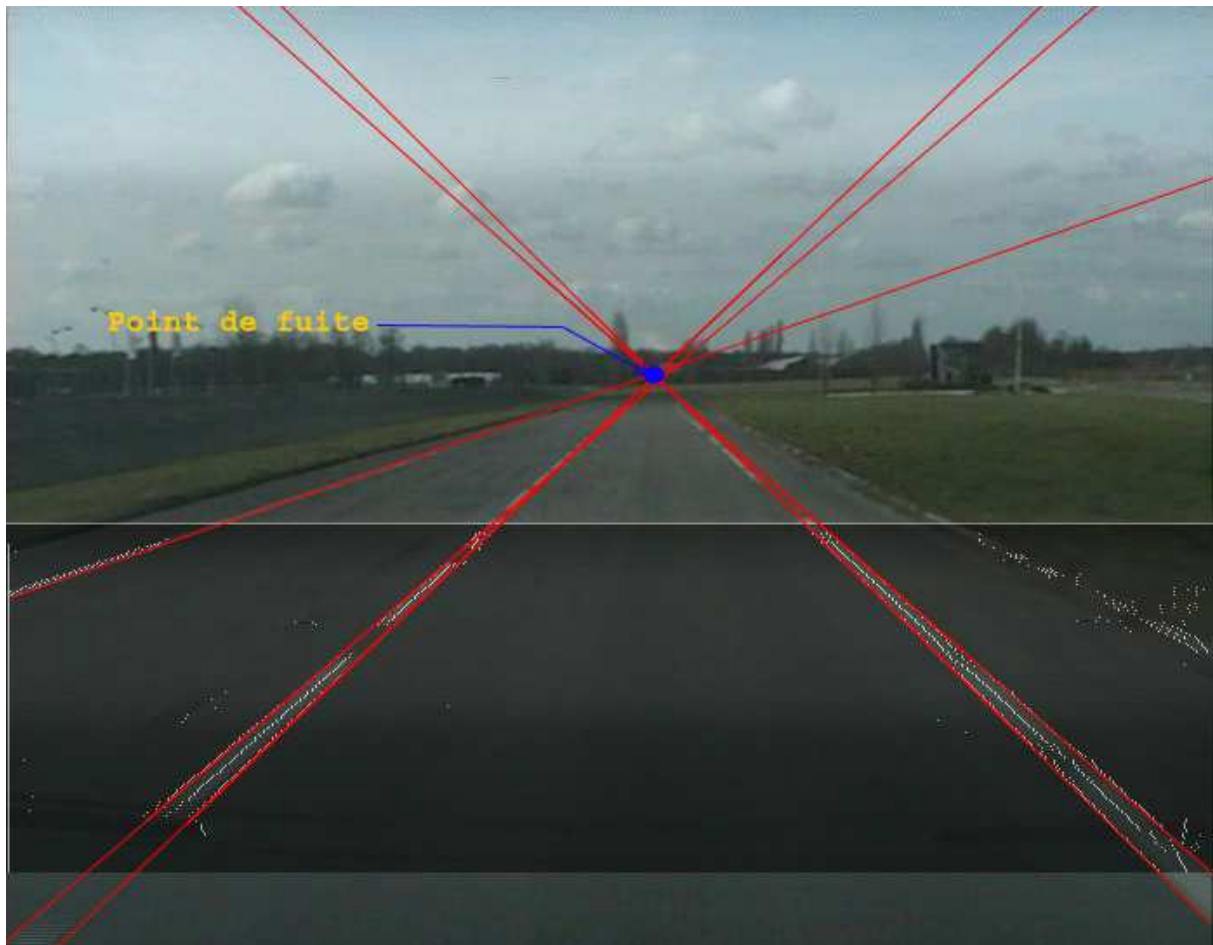


Figure 138 : Illustration de la méthode de détermination du point de fuite

La Figure 138 montre bien que les différentes droites extraites par la transformation de Hough ne sont pas forcément toutes concourantes au même point. La détermination du point de fuite se fait donc avec une erreur de quelques pixels (généralement 3 ou 4 pixels d'erreur). Ces erreurs peuvent être provoquées par une détermination des bords des marquages légèrement erronée en certains points ou par le fait que les marquages au sol ne sont pas exactement parallèles. Enfin, la transformation de Hough peut elle aussi introduire une erreur du fait de son pas en angle et en distance.

V - 5. 4. 4. Estimation de l'erreur commise sur la valeur des angles :

On considère ici une image en résolution PAL, soit 576 lignes de 768 pixels chacune. Comme on l'a vu précédemment l'erreur commise sur la détermination du point de fuite est de 3 ou 4 pixels. De plus, la distance entre deux marquages consécutifs est au maximum d'environ 500 pixels.

L'angle α est donc connu avec une précision de $1/500$ radians (on approxime α et $\tan \alpha$). L'angle Θ est donc connu avec la même précision d'après la relation (E11). On rappelle que lors de nos essais nous considérons une valeur du roulis de 0.1 radians avec des erreurs de 20%, ici l'erreur n'est que de 2% soit dix fois plus faible.

Au niveau du tangage et du lacet, on doit rajouter l'erreur introduite lors de la détermination du point de fuite. Or, comme nous l'avons rappelé, cette erreur n'est que de 3 ou 4 pixels soit environ 1% de la valeur exacte. Au total, l'erreur de détermination des angles de tangage Φ et de lacet Ψ est inférieure à 5%. Cette erreur est acceptable pour une détermination précise de la forme de la route comme nous l'avons vu précédemment.

V - 5. 4. 5. Conclusion :

La détermination des angles du repère caméra par rapport au repère route peut se faire, grâce à la méthode exposée précédemment, de façon précise. Elle impose néanmoins de nouveaux calculs qui peuvent s'avérer lourds à effectuer pour chaque nouvelle image. En effet, le calcul des angles doit être fait sur chaque nouvelle image que l'on souhaite utiliser pour la reconstruction tridimensionnelle. Ce besoin peut imposer une forte charge de travail au système lors du calcul de l'angle de roulis qui est l'opération la plus longue. Pour ne pas être incommodés par ce problème nous considérons pour l'instant le roulis comme nul. Cette simplification est raisonnable tant que l'on ne conduit pas vite dans des virages serrés et surtout si l'on dispose d'un véhicule ayant une suspension active et une barre antiroulis qui limitent les mouvements de la caisse du véhicule par rapport au plan de la route.

V - 5. 5. Conclusions :

L'algorithme de détection de la route que nous proposons permet d'obtenir rapidement et efficacement la forme tridimensionnelle de la route (à partir d'une image obtenue par la caméra avant ainsi que de sa calibration) sous réserve que l'appariement des points de marquage soit correctement fait. Comme nous l'avons vu, la méthode naïve que nous proposons permet déjà un appariement correct jusqu'à moyenne distance. Pour des distances plus lointaines on peut se poser la question de la nécessité de réaliser un bon appariement. En effet, si cet appariement est nécessaire théoriquement on a vu que la faible résolution de la caméra ne permet pas une très bonne précision.

De plus, la méthode d'appariement proposée n'est mise en défaut que dans lorsque des virages serrés sont rencontrés. Or de tels virages posent alors le problème de la visibilité de la route dans ce virage. Dans un tel contexte l'utilisation des bases de données cartographiques récentes qui incluent le détail de la forme de la route paraît plus amène de fournir les informations nécessaires à longue distance. On se servira alors de l'algorithme proposé pour détecter et calculer la forme de la route jusqu'à moyenne portée pour recalculer au mieux le modèle fourni par les bases de données cartographiques par rapport au véhicule.

V - 6. Synthèse :

Nous avons proposé ici les cinq principaux modules de traitement des données recueillies par les capteurs du cindynomètre. La réalisation de ces cinq modules permet d'obtenir un grand nombre d'informations sur l'état de la relation tripartite conducteur – véhicule – environnement à tout moment aussi bien au niveau des interactions entre chacun des acteurs qu'au niveau de l'état de ceux-ci. La Figure 140, résume ainsi les différents modules nécessaires à la compréhension de cette relation tripartite.

Ainsi l'évaluation du comportement du conducteur permettra d'obtenir l'état du conducteur (en termes de niveau de vigilance, de fatigue, de stress, ...) mais elle permettra aussi d'évaluer la prise d'information dans l'environnement du conducteur (en surveillant la direction de son regard) ainsi que les actions qu'il effectue (par le biais des capteurs d'angle volant, des capteurs sur le pédalier, ...).

De même, l'évaluation des conditions météorologiques permettra de connaître une partie de l'état de l'environnement mais aussi une partie de la relation entre l'environnement et le véhicule par le biais du calcul de l'adhérence du véhicule. La détection des obstacles, la détection de la forme de la route ainsi que la localisation précise du véhicule dans l'infrastructure permettent ensuite de compléter la connaissance de l'état de l'environnement du véhicule.

Enfin, l'utilisation des données internes au véhicule permet de connaître l'état du véhicule à tout moment ainsi que les accélérations et vibrations que peut ressentir le conducteur (par le biais de la centrale inertielle principalement mais aussi par le régime moteur par exemple).

La connaissance de cette relation tripartite va ainsi permettre au cindynomètre d'évaluer le niveau de risques à tout moment et d'en informer le conducteur tout en pouvant localiser les dangers immédiats. De ce fait il devrait être possible pour le conducteur de réduire le niveau de risques pris en ralentissant avant un virage ou en laissant une marge de sécurité avec le véhicule précédent par exemple. Pour ce faire, il est nécessaire de fusionner les résultats de ces algorithmes de traitement.

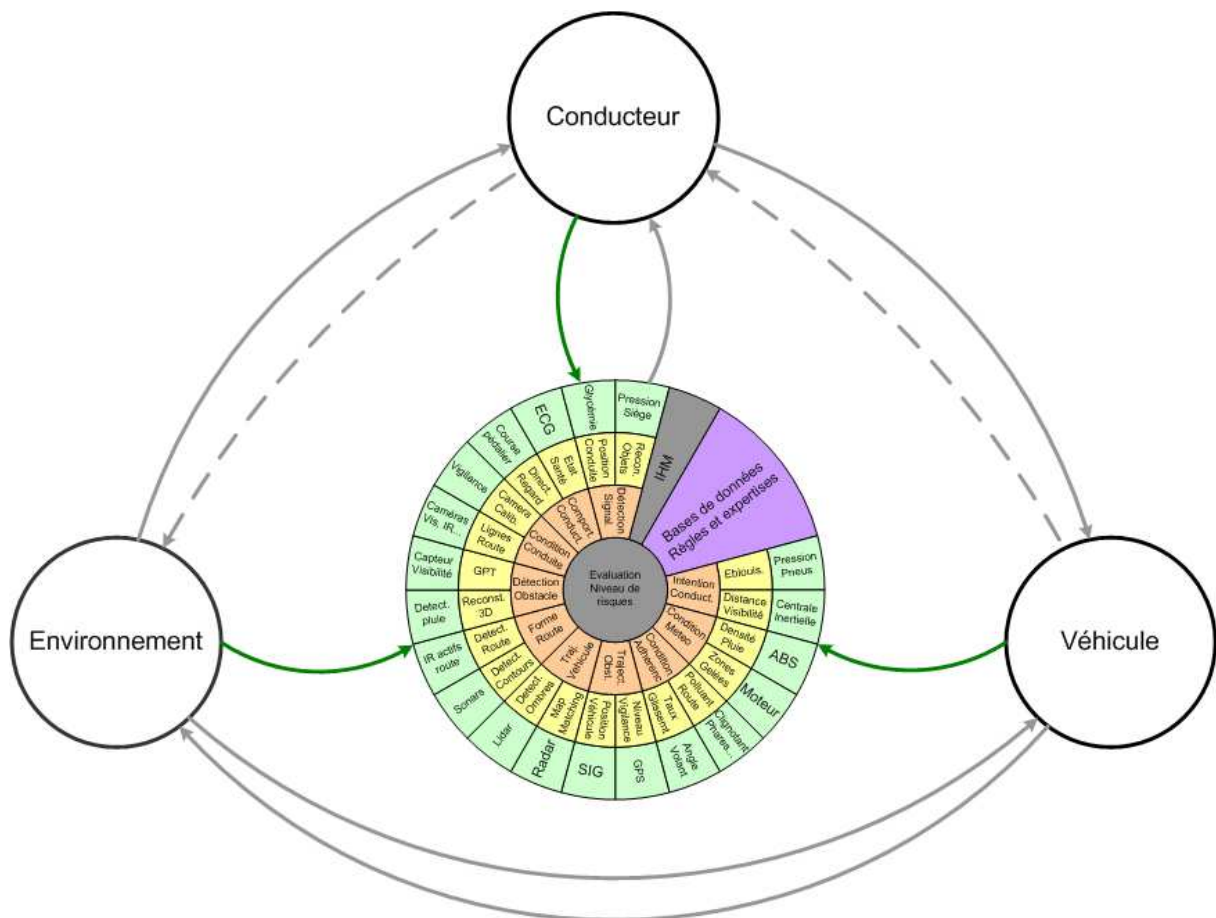


Figure 140 : Niveau perception et compréhension du cindynomètre

CHAPITRE VI – PERCEPTION DES RISQUES

Les modules de traitement et de fusion des données recueillies par les capteurs du cindynamètre permettent d'extraire un grand nombre d'informations nécessaires à la détection des situations accidentogènes par le biais de la connaissance de l'état de la relation tripartite conducteur – véhicule – environnement. Néanmoins, seuls, ces modules n'offrent pas une information suffisamment évoluée pour pouvoir être montrée au conducteur. L'information disponible demanderait en effet un travail intellectuel d'abstraction au conducteur beaucoup trop fort pour être utile et risquerait au contraire d'être négative pour la sécurité de la conduite.

Nous cherchons donc ici à utiliser ces informations pour extraire les informations utiles au conducteur en calculant les risques présents afin d'en informer le conducteur. Les risques menaçant le conducteur sont alors de trois types : risque de collision (avec un autre véhicule ou un quelconque obstacle), risque de perte de contrôle du véhicule et risque de non-respect involontaire de la réglementation. Pour déterminer ces risques on voit qu'il est essentiel d'être capable de prédire la trajectoire du véhicule ainsi que de tous les obstacles détectés.

VI - 1. Prédiction de la trajectoire des obstacles

La gestion des interactions (éviter d'obstacles par exemple) entre véhicules sur la route est une des tâches essentielles du conducteur. Le conducteur s'acquitte généralement très bien de cette tâche mais il arrive malheureusement qu'il commette des erreurs. Le cindynamètre doit donc être capable de réaliser cette gestion des interactions entre véhicules et d'informer le conducteur en cas d'erreur. Nous présentons donc ici le module de prédiction de la trajectoire des obstacles utilisé par le cindynamètre.

VI - 1. 1. Contexte :

La tâche de prédiction de la trajectoire des obstacles dans l'environnement est particulièrement ardue pour l'être humain, comme on peut s'en rendre compte lorsqu'on conduit sur une autoroute qui est pourtant le contexte le plus simple a priori (peu de véhicules, peu de changements de direction, types d'obstacles limités). Elle devient quasiment impossible dans des contextes beaucoup plus complexes comme la circulation urbaine par exemple (beaucoup de véhicules, nombreuses possibilités de changements de direction nombreuses, tous les types d'obstacles présents).

Les difficultés liées à la prédiction de la trajectoire des obstacles sont dues à plusieurs facteurs importants :

- Le nombre d'obstacles à traiter est généralement très important ce qui met à mal les capacités de gestion humaine.
- Les possibilités multiples de trajectoires, puisque la destination et les intentions des autres conducteurs ne sont pas connues au moment de la prédiction.
- Le risque de transgression des règles de conduite par l'un des véhicules qui impose de prendre en compte des trajectoires théoriquement interdites aux véhicules.
- Les trajectoires possibles très différentes selon le type d'obstacle considéré (véhicule particulier, poids lourd, piéton, moto, vélo, ...)
- La durée de la prédiction. L'évolution des trajectoires doit être prévue plusieurs secondes à l'avance pour avoir le temps de réagir.

Le module de prédiction des trajectoires des obstacles du cindynamètre doit donc être capable d'affronter toutes ces difficultés de façon efficace et en temps réel. Ceci exclut de fait les méthodes classiques de prédiction de trajectoire qui ne prennent pas en compte l'aspect probabiliste lié à l'incertitude sur les décisions prises par les autres conducteurs.

On verra de plus que les contraintes liées à la prédiction de trajectoire rendent les différents calculs extrêmement lourds, ce qui nécessitera de notre part une optimisation des algorithmes pour permettre une exécution en temps réel.

VI - 1. 2. Problèmes des méthodes classiques :

Dans le domaine automobile, la recherche sur la prédiction de trajectoire a principalement été conduite dans l'optique du calcul du TLC (Time to Line Crossing) afin d'estimer le temps restant avant une sortie de route ou un changement de voie.

VI - 1. 2. 1. Approches liées au calcul du TLC

La méthode la plus couramment utilisée pour calculer le TLC consiste à considérer que la vitesse et l'angle volant ne changent pas. Ainsi, comme le rappellent Liu et Peng : "*It is a common practice to assume that the steering angle is fixed and the vehicle speed remain constant in this future period of time*" ([Liu 96], page 418). Cette approche n'est cependant valable sur des intervalles de temps très courts où la vitesse de l'objet considéré n'est effectivement pas modifiée. On peut néanmoins douter de l'efficacité de cette méthode dans le cas de la prédiction à plusieurs secondes à l'avance de la trajectoire d'un véhicule arrivant sur une intersection par exemple.

Il existe de nombreuses autres méthodes similaires, parmi lesquelles les différentes variations du filtrage de Kalman sont les plus courantes, qui utilisent plus d'informations provenant du passé pour réaliser leurs prédictions. Néanmoins, malgré la sophistication de certaines de ces méthodes, aucune ne permet de prendre en compte toutes les contraintes liées à la prédiction à long terme de la trajectoire d'un véhicule piloté par un humain.

Ces méthodes présentent ainsi les problèmes suivants qu'il convient de résoudre pour effectuer une prédiction efficace de la trajectoire :

- Prédiction valide sur un futur très court par rapport au temps de prédiction nécessaire.
- Pas de prise en compte des modifications possibles de la trajectoire (accélération, freinage, changement brusque de direction, ...).
- Pas de prise en compte de l'infrastructure routière qui influe sur les trajectoires (virage, intersections, nombre de voies).
- Pas de prise en compte de la signalisation qui influe théoriquement sur les trajectoires des obstacles (feu tricolore, stop, ...) et qui peuvent renseigner indirectement sur la perception de la trajectoire d'un obstacle par le conducteur (il arrive souvent que le conducteur ne prenne pas en compte un obstacle non prioritaire qui peut pourtant être dangereux).
- Prise en compte de la trajectoire uniquement, les indicateurs de trajectoire (clignotants, feux de stop, ...) n'étant quant à eux pas considérés.

Il est donc nécessaire pour le cindynamètre de disposer d'un algorithme plus adapté pour réaliser la prédiction de trajectoires des obstacles. Cet algorithme devra donc compléter les lacunes des algorithmes classiques, aussi bien dans la durée de validité de prédiction que dans la prise en compte des différents facteurs spécifiques à ce contexte. Ce dernier point implique donc la possibilité de prise en compte de données qualitatives autant que quantitatives, ce qui n'était pas le cas des méthodes classiques entièrement numériques (et donc quantitatives).

VI - 1. 2. 2. Approches liées à la détection du changement de voies

Récemment cependant de nouvelles approches ont cherché à détecter les intentions des conducteurs pour prévoir ainsi la trajectoire future de leur véhicule. Ces travaux se sont cependant principalement intéressés au problème de la détection de l'intention de changement de file, principalement dans un contexte autoroutier.

[Salvucci 04] propose ainsi de reconnaître l'intention de changer de file du conducteur par le biais de l'analyse des informations de position sur la voie, d'angle volant, de courses de pédales et de distance libre jusqu'au prochain obstacle. Ces informations sont ensuite fournies à un modèle cognitif de conducteur présenté dans [Salvucci 06].

[McCall 07] quant à lui propose de réaliser la même prédiction en utilisant l'information de mouvement de la tête et des yeux en complément des informations tirées de l'environnement et du contrôle du véhicule. Ces informations sont ensuite utilisées en entrée d'un classificateur bayésien afin de reconnaître le scénario de changement de file à l'avance (c'est-à-dire de reconnaître l'intention du conducteur de changer de file).

On constate cependant que ces approches cherchent uniquement à reconnaître l'action la plus probable que va mener ou que mène un conducteur et sont limitées à un contexte autoroutiers relativement simple. Enfin, ces approches requièrent un accès aux données obtenues par les capteurs internes au véhicule et sont donc en cela limitées au seul véhicule hôte.

[Han 07] a cependant proposé la prédiction du changement de voie du véhicule précédent en se basant sur l'analyse du mouvement du véhicule dans sa voie. Cette approche reste cependant toujours limitée au seul problème de la prédiction du changement de voie dans un contexte relativement contrôlé (autoroute).

VI - 1. 2. 3. Autres approches

A l'image des recherches menées ces dernières années sur la modélisation du comportement du conducteur à l'INRETS, [Dapzöl 06] propose de reconnaître l'activité du conducteur de façon automatique par le biais de chaînes de Markov cachées pondérées permettant ainsi d'utiliser l'apport de connaissances des experts dans la prédiction des trajectoires. Bien que ce système offre apparemment de très bonnes performances il n'en reste pas moins dédié à la prédiction de la trajectoire du véhicule hôte du fait du recours aux informations fournies par les capteurs véhicules. De plus, il ne permet d'obtenir que la prédiction de la trajectoire la plus probable, rejetant ainsi de fait les trajectoires moins probables mais potentiellement accidentogènes.

Broadhurst, [Broadhurst 04] et [Broadhurst 05], a proposé une approche de la prédiction des trajectoires de véhicules basée sur la théorie des jeux afin de définir quelles actions sont dangereuses pour le conducteur. Cette approche permet de calculer le meilleur choix stratégique (doubler, freiner, tourner, ...) pour le véhicule hôte en évitant les situations dangereuses et en considérant certaines des actions possibles des autres véhicules. Elle diffère en cela de l'approche suivie pour le cindynamètre qui cherche à établir la probabilité de chaque action afin d'établir le risque global courant encouru par le conducteur.

VI - 1. 2. 4. Synthèse

Comme nous l'avons vu la prédiction de la trajectoire d'un véhicule connaît un fort engouement ces dernières années avec le développement de modélisation plus fines du comportement du conducteur et avec l'analyse de son activité antérieure aux différentes actions. L'étude de [Georgeon 08] offre à ce titre un outil d'analyse permettant de simplifier la création et la modélisation des scénarii d'action du conducteur.

Contrairement aux premières études qui extrapolaient la trajectoire courante du véhicule, ces nouvelles études ont démontré qu'il est possible de prédire avec une certaine confiance la prochaine action du conducteur sur un horizon temporel de quelques secondes et donc d'en déduire une prédiction de la trajectoire future. On constate cependant que ces études souffrent de deux problèmes majeurs pour leur application dans un cindynamètre :

- La nécessité de disposer d'informations issues de capteurs dans le véhicule limite de fait l'application de ces méthodes à la seule prédiction de la trajectoire du véhicule hôte. Il n'existe en effet pas de capteur capable de déterminer l'angle du volant ou la course pédalier d'un véhicule proche du véhicule hôte et on peut douter que de telles informations soient disponibles dans l'avenir par le biais des communications inter véhicules.

- La prédiction effectuée ne cherche qu'à obtenir l'action suivante sans prendre en compte la probabilité qu'une autre action moins probable puisse être effectuée à sa place. Ainsi ces systèmes ne prédisent que la trajectoire la plus probable et non l'ensemble des trajectoires probables. Cette limitation impose de fait de disposer d'une certitude absolue sur l'action qui va suivre pour pouvoir correctement évaluer le risque de collision par exemple.

Nous présentons donc maintenant la méthode que nous avons retenue et développée pour bénéficier d'une prédiction de trajectoire efficace, qui satisfasse les contraintes de la tâche et qui fournisse l'ensemble des trajectoires possibles ainsi que leur probabilité de façon à pouvoir évaluer l'ensemble des risques encourus par le conducteur.

VI - 1. 3. Le moteur de prédiction de trajectoire :

L'étude du problème de la prédiction de trajectoires fait apparaître la nécessité de pouvoir fusionner des informations quantitatives (vitesse, position et accélération du véhicule par exemple) qui concernent la trajectoire passée du véhicule avec des informations qualitatives renseignant sur les trajectoires futures du véhicule (clignotants, feux de stop, infrastructure routière, ...).

Une telle étude montre aussi qu'il faut être capable de prendre en compte plusieurs trajectoires possibles et non pas une seule trajectoire (qui sera alors la trajectoire la plus probable et pas forcément la trajectoire accidentogène). Il est donc nécessaire de pouvoir calculer la probabilité associée à chacune des trajectoires possibles. Ceci nous permettra aussi d'avoir une validité de la prédiction plus longue car plus de trajectoires seront calculées au prix de calculs beaucoup plus complexes cependant.

Enfin, l'algorithme de prédiction de la trajectoire doit pouvoir être interrompu par l'arrivée de nouvelles données et doit donc être capable de traiter ces nouvelles données dans la prédiction en cours. Ce dernier point renforce l'intérêt d'une procédure multi-trajectoires qui permet, lorsqu'une nouvelle donnée arrive, d'invalidier immédiatement toutes les trajectoires prédites non conformes au nouveau contexte.

Ces différentes contraintes nous ont conduits à développer un algorithme récursif en plusieurs parties qui répond au problème posé. La Figure 141 montre l'architecture utilisée par l'algorithme. On expliquera par la suite les différents modules utilisés par l'algorithme et qui apparaissent dans ce schéma.

VI - 1. 3. 1. Principes généraux de fonctionnement de l'algorithme :

L'algorithme que l'on utilise est, comme on l'a précisé précédemment, de type récursif. Il est utilisé pour prédire la trajectoire d'un obstacle sur une période de quelques secondes. Il est initialisé par les données provenant de la trajectoire passée de l'obstacle traité ainsi que par les informations que l'obstacle affiche (feux de stop ou clignotants par exemple). Une fois initialisé, l'algorithme est exécuté itérativement ; les positions, vitesses et accélérations possibles à $t+\Delta t$ sont alors calculées à chaque itération jusqu'à t_{max} . Les nouvelles positions possibles à $t+\Delta t$ sont réutilisées pour prédire les positions à $t+2\Delta t$. Pour permettre une compatibilité totale entre la phase d'initialisation et les itérations, on prédit aussi l'état des affichages (stops, clignotants, ...) du véhicule aux instants de prédiction.

L'algorithme utilise par ailleurs des informations provenant de sources extérieures (fichiers ou autres programmes que l'on explicitera plus tard) concernant la réglementation en vigueur, la signalisation ou l'infrastructure. Il requiert aussi une configuration extérieure du réseau d'inférence probabiliste et des fonctions d'appartenance. Ces données externes à l'algorithme peuvent être comparées aux bases de connaissances nécessaires au fonctionnement des systèmes experts et plus généralement à tous les systèmes à base de règles.

Nous présentons maintenant plus en détail le fonctionnement de chacun des blocs fonctionnels de l'algorithme présenté Figure 141.

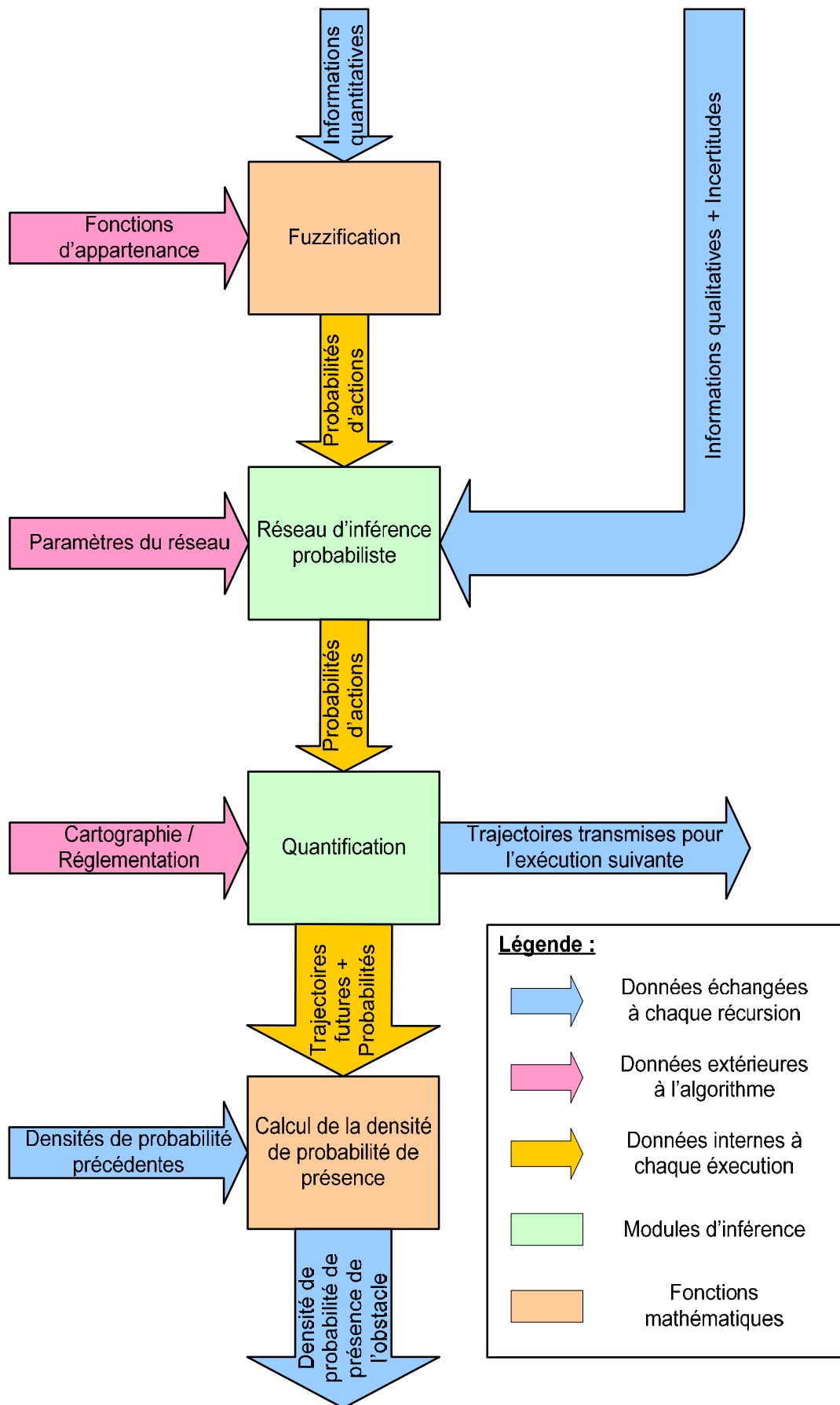


Figure 141 : Architecture de l'algorithme de prédiction de trajectoires

VI - 1. 3. 2. La fuzzification de la trajectoire :

On rappelle tout d'abord le sens du terme fuzzification : la transformation de variables réelles (c'est-à-dire qui ont une réalité physique) en variables floues. On n'expliquera pas ici la logique floue qui nécessiterait un chapitre à elle seule. Le lecteur intéressé pourra néanmoins se référer à [Liu 02] pour une présentation complète de la théorie de la programmation floue.

La fuzzification de la trajectoire est utilisée pour n'avoir à utiliser que des informations qualitatives sur la trajectoire. Ainsi, on va décrire la trajectoire d'un véhicule en qualifiant son comportement latéral et longitudinal à partir des valeurs de l'accélération et du rayon de courbure courants. Cette étape permet dans le même temps d'attribuer une probabilité à l'action considérée. En effet, un véhicule qui dévie légèrement sur la gauche peut évidemment tourner dans cette direction mais il peut aussi se préparer à tourner à droite ou éviter un obstacle sur la route. On attribuera ainsi dans un tel cas une très forte probabilité à l'action **TOURNE A DROITE** mais on donnera quand même une probabilité non nulle à **NE TOURNE PAS** et à **TOURNE A GAUCHE**.

L'introduction de la fuzzification s'est donc faite dans cet état d'esprit à l'aide de fonctions d'appartenance classiques qui permettent une fuzzification facile des données numériques provenant de la trajectoire des obstacles concernés. Les Figure 142 et Figure 143 donnent un aperçu des fonctions d'appartenance utilisées pour classifier les actions en cours.

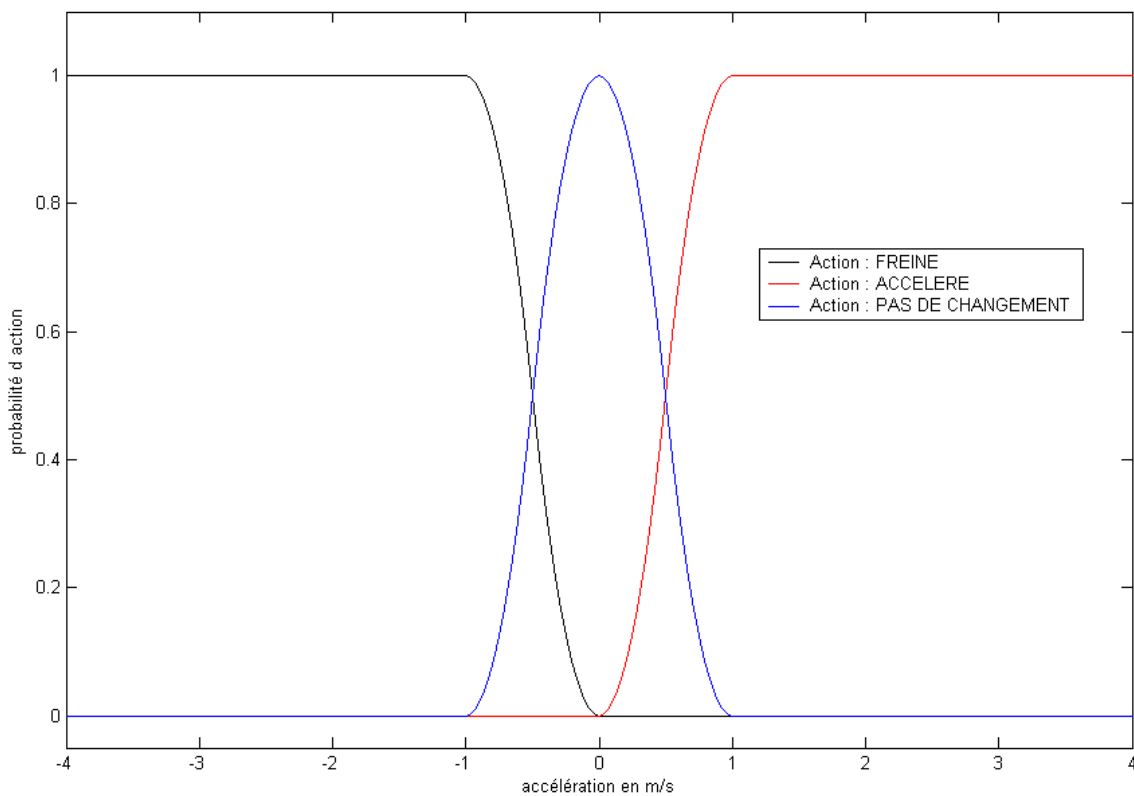


Figure 142 : Fonctions d'appartenance liées à l'accélération du véhicule

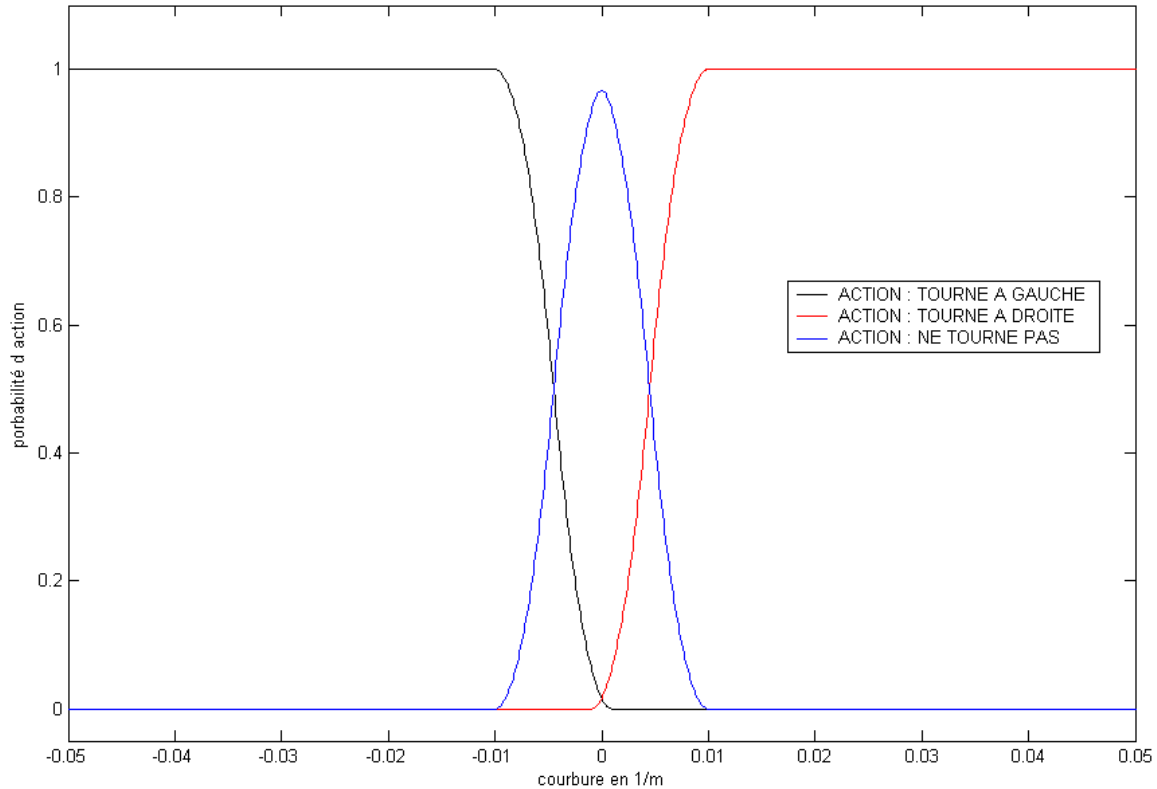


Figure 143 : Fonctions d'appartenance liées au rayon de courbure de la trajectoire

Les fonctions utilisées pour obtenir ces six fonctions d'appartenance permettent immédiatement d'obtenir la probabilité d'une action future puisque la valeur de leur sortie varie entre 0 et 1. On a conçu ces fonctions pour que la somme des probabilités d'actions liées à l'accélération ou au rayon de courbure soit égale à 1. Cette contrainte est imposée par le bon sens car les trois possibilités d'actions liées à chacune de ces deux valeurs sont complémentaires (il n'y a donc pas d'autre action possible).

La Figure 143 représente les possibilités d'actions en fonction de la courbure de la trajectoire. En effet, la courbure de la trajectoire est bornée et continue entre ces bornes alors que le rayon de courbure, défini comme l'inverse de la courbure, n'est pas borné. De plus, de nombreux véhicules ont un rayon de braquage minimum ce qui rend difficile l'application d'une fonction mathématique simple qui donne la probabilité de ce rayon de braquage.

Les fonctions d'appartenance utilisées pour l'accélération et la courbure sont les mêmes, seules les valeurs caractéristiques changent. Ces fonctions sont :

- SMF : fonction d'appartenance dite en S à cause de sa forme, caractérisée par ses valeurs x_0 et x_1 . Elle donne la probabilité des actions ACCELERER et TOURNE A DROITE et est définie par :

$$\begin{cases} x \in]-\infty ; x_0] : SMF(x, [x_0, x_1]) = 0 \\ x \in]x_0 ; \frac{x_0 + x_1}{2}] : SMF(x, [x_0, x_1]) = 2 * \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^2 \\ x \in]\frac{x_0 + x_1}{2} ; x_1] : SMF(x, [x_0, x_1]) = 1 - 2 * \left(\frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} \right)^2 \\ x \in]x_1 ; \infty[: SMF(x, [x_0, x_1]) = 1 \end{cases}$$

- ZMF : fonction d'appartenance dite en Z à cause de sa forme, caractérisée elle aussi par ses valeurs x_0 et x_1 . Elle donne quant à elle la probabilité des actions FREINE et TOURNE A GAUCHE. Elle est définie de façon similaire à la fonction SMF comme on peut le voir ci-dessous :

$$\begin{cases} x \in]-\infty; x_0] : ZMF(x, [x_0, x_1]) = 1 \\ x \in \left] x_0; \frac{x_0 + x_1}{2} \right] : ZMF(x, [x_0, x_1]) = 1 - 2 * \left(\frac{x - x_1}{x_1 - x_0} \right)^2 \\ x \in \left] \frac{x_0 + x_1}{2}; x_1 \right] : ZMF(x, [x_0, x_1]) = 2 * \left(\frac{x_0 - x}{x_1 - x_0} \right)^2 \\ x \in]x_1; \infty[: ZMF(x, [x_0, x_1]) = 0 \end{cases}$$

Les probabilités des actions complémentaires PAS DE CHANGEMENT et NE TOURNE PAS sont définies comme complément à 1 de la somme des fonctions SMF et ZMF. Si on note P cette probabilité d'action on a :

$$P(x) = 1 - SMF(x, [x_0, x_1]) - ZMF(x, [x_2, x_3])$$

Les valeurs caractéristiques de chacune de ces fonctions ont été fixées de façon arbitraire pour les Figure 142 et Figure 143. Ces valeurs peuvent facilement être modifiées et pourraient bénéficier d'une phase d'apprentissage automatique de façon à obtenir des valeurs optimisées. De la même façon, les fonctions d'appartenance utilisées ont été choisies de façon arbitraire. Il existe en effet de très nombreuses fonctions d'appartenance plus ou moins complexes qui pourraient jouer le même rôle. Des tests d'efficacité devront être effectués là aussi pour déterminer les fonctions les plus efficaces en termes de résultats mais aussi en termes de temps de calcul.

VI - 1. 3. 3. Fuzzification de la distance à l'intersection :

Cette deuxième étape de fuzzification est utilisée pour caractériser la distance à une intersection et donc la possibilité, pour le véhicule, de tourner dans cette intersection. Ce calcul est hautement dépendant de la vitesse et de l'accélération du véhicule, on utilisera donc le temps de déplacement jusqu'à l'intersection comme variable d'entrée. Ce temps sera prédit de la façon la plus simple possible pour ne pas augmenter le temps de calcul. On utilise donc pour ce faire une simple propagation de la trajectoire qui équivaut à résoudre l'équation $at^2 + 2vt = 2d_{intersection}$, où a est l'accélération et v la vitesse au moment de la prédiction. La fonction d'appartenance utilisée pour cette fonction est une simple fonction de type ZMF (voir précédemment) qui traduit le fait que plus un véhicule est proche de l'intersection, plus il peut commencer à tourner immédiatement dans celle-ci.

Pour améliorer l'expression de cette probabilité on prend en compte la vitesse et le mouvement actuellement prédit pour limiter cette probabilité si le véhicule est trop engagé dans l'intersection et ne semble pas tourner. Cette amélioration nécessite l'utilisation d'une nouvelle fonction d'appartenance qui traduit la probabilité très faible de tourner lorsque l'on est trop près de l'intersection, car le virage à effectuer alors serait beaucoup trop serré. On note cette fonction PiMF du fait de sa forme, elle est définie comme l'intersection floue d'une fonction SMF (voir précédemment), de paramètres caractéristiques x_0 et x_1 , et d'une fonction ZMF, de paramètres caractéristiques x_2 et x_3 , avec $x_0 < x_1 < x_2 < x_3$. L'intersection floue utilisée ici est la fonction multiplication, qui est une fonction classique dans la littérature pour réaliser une intersection floue. On aurait aussi pu utiliser la fonction minimum, elle aussi très classique pour réaliser une intersection floue.

On représente Figure 144 la possibilité de changer de route à l'intersection en fonction de la distance à celle-ci. Cette figure permet ainsi de se faire une meilleure idée de la forme de la fonction d'appartenance PiMF. On représente dans le même temps la possibilité d'action complémentaire qui est ici donné par $1 - PiMF$. Ces valeurs des possibilités sont très utiles pour déterminer le comportement d'un véhicule et distinguer par exemple un changement de voie d'un changement de route.

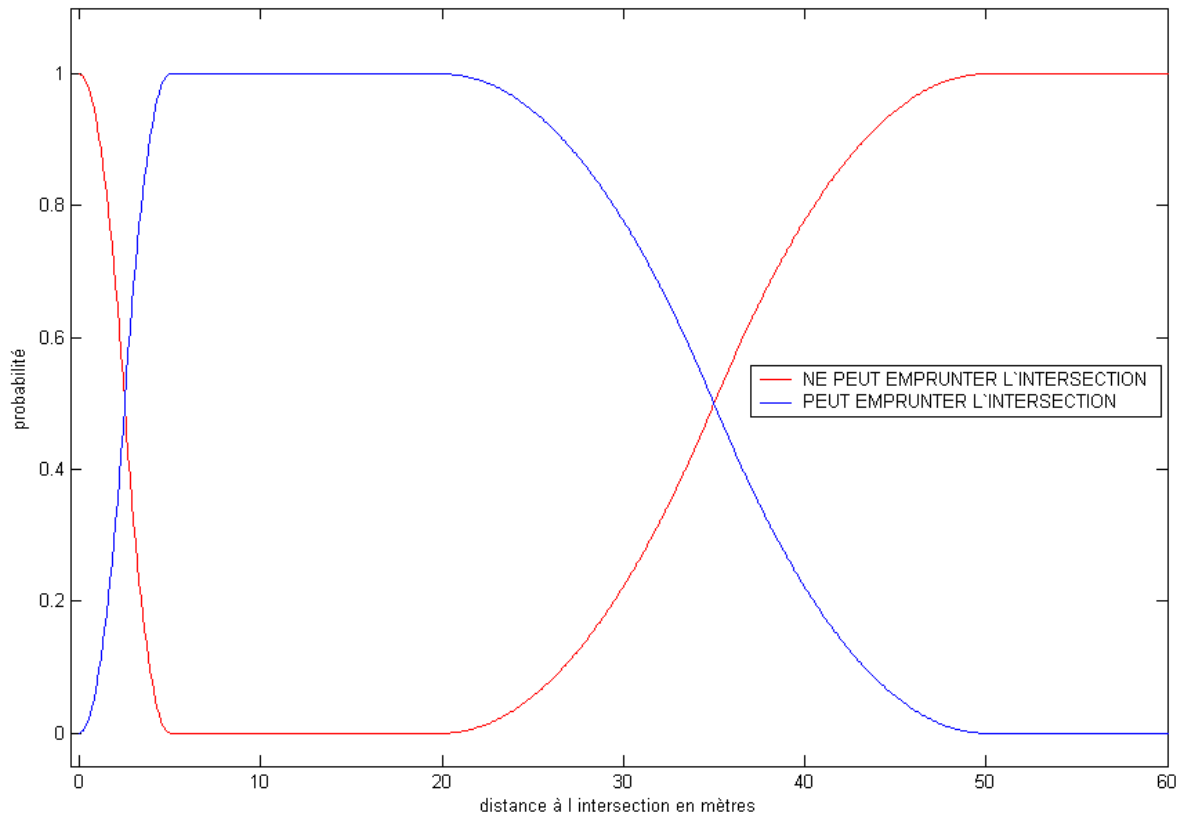


Figure 144 : Possibilité de changement de route à une intersection

VI - 1. 3. 4. Le réseau d'inférence probabiliste :

Cette partie de l'algorithme de prédiction des trajectoires est utilisée pour déterminer quelles sont les actions qu'un obstacle est susceptible d'accomplir. Ce module associe également à chaque action possible une probabilité calculée à partir des données d'entrée du réseau.

VI - 1. 3. 4. 1. Description du réseau (Figure 145)

La fusion des données se fait selon un mode proche des réseaux neuronaux multicouches. Chaque couche du réseau est le résultat de combinaisons des résultats des modules des couches précédentes. Ces combinaisons peuvent être linéaires (comme dans réseau neuronal réel) ou floues (utilisation des fonctions de logique floue, comme dans un réseau neuro-flou). On notera cependant que l'on utilise ici une description explicite des couches du réseau ce qui permet de s'affranchir d'une limitation courante des réseaux de neurones souvent perçus comme une "boîte noire".

La première couche contient les données d'entrée, c'est-à-dire les données issues de la fuzzification de la trajectoire ainsi que les données qualitatives sur les affichages du véhicule (feux de stops, clignotants). La deuxième couche permet d'obtenir la probabilité des événements conjoints (TOURNE A GAUCHE et CLIGNOTANT A GAUCHE par exemple). La troisième couche donne les probabilités d'actions liant direction et accélération (TOURNE A GAUCHE et FREINE par exemple).

Les couches suivantes sont utilisées pour définir le type d'actions liées aux résultats de la troisième couche (DOUBLE A GAUCHE, TOURNE DANS UNE INTERSECTION, ...). L'obtention de ces couches se fait par ajout des données provenant de la signalisation et de la cartographie (par le biais de la fuzzification de la distance à l'intersection par exemple). L'écriture de ces couches demande un travail descriptif fastidieux afin de couvrir le plus grand nombre de possibilités.

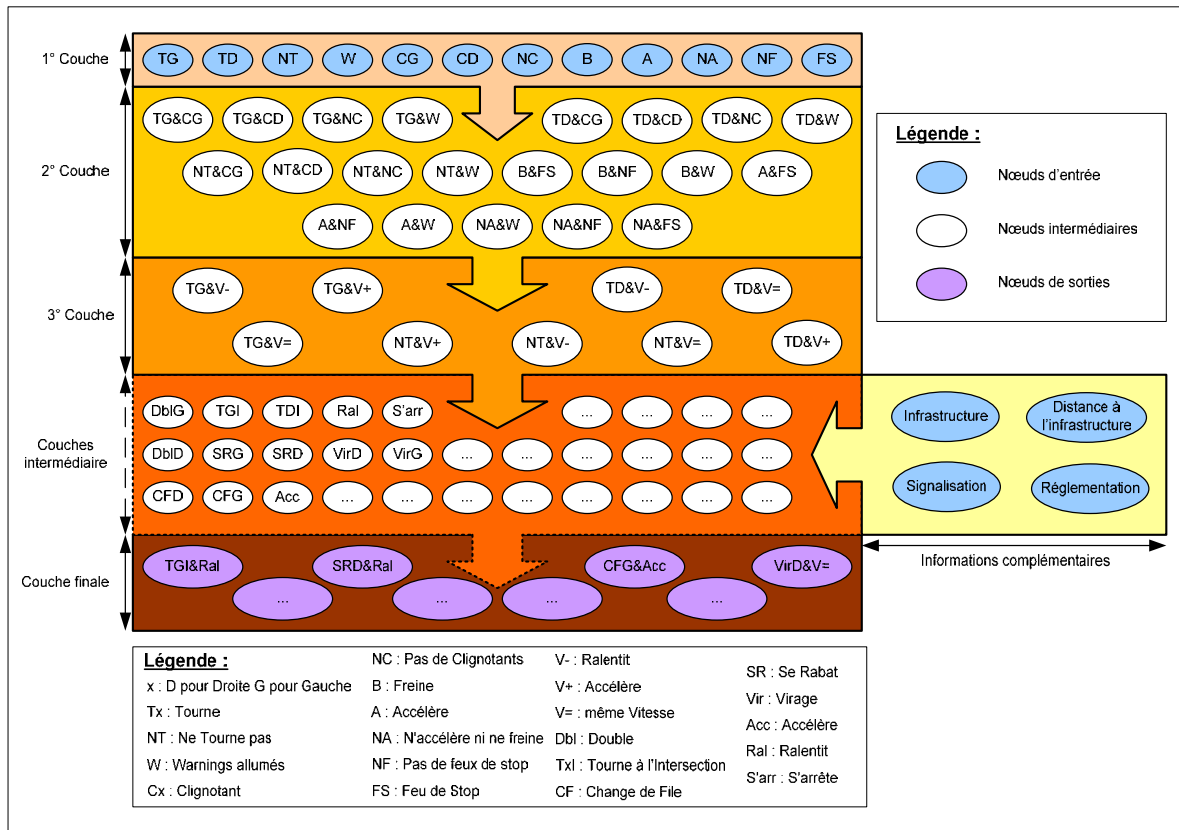


Figure 145 : Schéma représentatif du réseau d'inférence

Les résultats de ces couches pourraient aussi être améliorés par la prise en compte des trajectoires des autres véhicules présents dans l'environnement. Cette possibilité implique malheureusement certaines modifications de l'algorithme de prédiction des trajectoires qui risquent de réduire son efficacité. En effet, on serait alors contraint d'utiliser une approche au tour par tour (semblable à celle utilisée dans [Broadhurst 04]) pour prendre en compte ses interactions. On devrait alors effectuer simultanément la prédiction des trajectoires pour tous les obstacles alors qu'on a pour le moment privilégié la rapidité de traitement en traitant d'abord les obstacles les plus prioritaires (les plus dangereux) puis les autres obstacles en fonction du temps de calcul disponible restant. On a donc fait le choix dans un premier temps de privilégier la performance de l'algorithme en n'incluant pas l'influence temporelle des autres obstacles. On pourra cependant utiliser la position courante des obstacles ainsi qu'une prédiction simple de leurs trajectoires (par le biais d'une interpolation linéaire de la trajectoire ou d'un Kalman par exemple) pour améliorer les résultats sans passer par un mécanisme au tour par tour.

La dernière couche contient les nœuds de sortie du réseau. Chacun de ces nœuds est associé à une action précise (DOUBLE A GAUCHE EN ACCELERANT, RALENTIT POUR SE RABATTRE, ...). Ces actions permettent d'évaluer la trajectoire que va suivre l'obstacle et de la quantifier comme nous le verrons par la suite. Il faut noter que hormis leur statut, les nœuds de sortie du réseau se comportent de la même façon que les autres nœuds et peuvent donc exécuter les mêmes opérations.

VI - 1. 3. 4. 2. Création du réseau

Le réseau est décrit dans un fichier de configuration qui contient le nombre de nœuds du réseau, le nom (ou la fonction) et le type (opérateur linéaire ou flou à appliquer sur les entrées) de chaque nœud, les descriptions de toutes les liaisons entre nœuds ainsi que le poids attribué à chacune de ces liaisons. Ce dernier élément est utilisé pour signifier l'importance de la contribution d'un nœud dans les différents nœuds du niveau inférieur.

Lors de son initialisation, l'algorithme de prédiction des trajectoires effectue une lecture du fichier de configuration et crée le réseau en mémoire. Celui-ci est ensuite conservé en mémoire tout au long de l'exécution de l'algorithme. Il serait possible de redéfinir à chaque itération la structure du réseau mais cette possibilité demanderait une relecture du fichier de configuration ou une réorganisation de la mémoire attribuée au réseau, deux opérations qui s'avèrent fort coûteuses en temps. On a donc limité les modifications des paramètres du réseau aux poids affectés aux différentes liaisons entre les couches et à la fonction de chaque nœud.

VI - 1. 3. 4. 3. Calcul du réseau

A chaque itération de l'algorithme de prédiction des trajectoires le réseau est recalculé. Ce calcul se fait selon une méthode descendante, c'est-à-dire que l'on calcule le premier niveau puis le second et ainsi de suite jusqu'à atteindre les nœuds de sortie. En effet, le réseau est composé de plusieurs couches de nœuds où chaque nœud est calculé à partir des nœuds de la couche supérieure (voir Figure 145), il n'est donc pas possible d'utiliser une autre méthode de calcul pour le réseau.

La structure du réseau et ses entrées font qu'il est possible qu'une partie des nœuds du réseau n'aient pas à être recalculés. En effet, un véhicule roulant tout droit sans modifier sa vitesse apparaîtra toujours de la même façon à l'entrée du réseau. Il pourrait donc être intéressant de tester les valeurs des différentes entrées pour éviter de recalculer certaines parties du réseau. Cette optimisation risque néanmoins de nécessiter trop de tests par rapport au gain de performance attendu. De plus, les situations où le gain d'une telle simplification est grand, sont extrêmement rares (route droites, pas d'intersection, véhicule roulant sans changement de vitesse). On a donc préféré ne pas mettre en œuvre cette optimisation.

VI - 1. 3. 5. Quantification de la trajectoire :

L'étape de quantification de la trajectoire peut être vue comme l'inverse de l'étape de fuzzification. En effet, on utilise les données qualitatives probabilistes fournies par le réseau d'inférence pour extraire la trajectoire réelle qui sera suivie par l'obstacle.

Pour mener à bien cette tâche, on utilise à nouveau la cartographie mais cette fois pour les données géométriques qu'elle contient. Par exemple, dans le cas d'une intersection, la cartographie fournit les différents segments de route qui se croisent. Ces segments permettent de connaître l'orientation des routes qui partent de l'intersection par rapport à la route courante (celle sur laquelle se trouve l'obstacle considéré). Dans le cas d'un virage les segments décrivent la forme de la route, il est donc possible d'en extraire approximativement la courbure de la route.

On voit que les informations fournies par la cartographie sont encore peu précises et nécessitent un traitement ultérieur pour être utiles. Néanmoins, les fournisseurs de système d'information géographique se penchent de plus en plus sur les informations complémentaires à fournir à la cartographie. Ainsi, dans le cadre du projet ARCOS [ARCOS 04], des bases de données géographiques bien plus précises contenant des informations de bien meilleure qualité (adhérence, courbure, ...) ont été développées et utilisées [Nashashibi 03].

On utilise ensuite les données géométriques extraites pour déterminer la trajectoire compatible avec une action déterminée. Ainsi, dans le cas d'une action de type TOURNE A DROITE DANS L'INTERSECTION on déterminera le rayon de courbure nécessaire pour emprunter la route visée par cette action. Si l'action visée demande un changement de vitesse on déterminera aussi la valeur de l'accélération nécessaire pour réaliser cette action.

Cette procédure est répétée pour toutes les actions identifiées comme probables (c'est-à-dire dont la probabilité est non nulle). On obtient ainsi un certain nombre de couples (a, ρ) , où a est l'accélération longitudinale du véhicule et ρ est la courbure, correspondant aux différentes trajectoires de l'obstacle prédites par le réseau d'inférence. On note que ces couples sont déterminés de façon à respecter les contraintes dynamiques du véhicule et prennent donc aussi en compte sa vitesse (on ne peut pas effectuer un demi tour à 100km/h ni avoir une accélération longitudinale de 10 G). Chacun de ces couples est associé à la probabilité de l'action correspondante. On précise que ces couples correspondent à la trajectoire qui va être suivie entre t et $t+\Delta t$ pour réaliser les actions considérées, on considèrera d'ailleurs que ces valeurs sont constantes entre deux itérations (donc entre t et $t+\Delta t$).

Malheureusement, la détermination de ces couples (a, ϱ) ne peut être considérée comme exacte. Tous les conducteurs étant différents, il est très probable que la trajectoire suivie par un conducteur soit différente de celle suivie par un autre conducteur dans les mêmes circonstances. On prend donc en compte cette méconnaissance en introduisant une incertitude sur les couples calculés. Cette incertitude dépend directement de l'action considérée et de l'amplitude de l'accélération et de la courbure nécessaire. Tout couple de valeurs (a, ϱ) appartenant à l'intervalle créé par l'ajout d'incertitude doit ainsi permettre de réaliser l'action considérée. En pratique cela se traduit par la prise en compte des différentes trajectoires possibles pour réaliser une même action. La Figure 146 montre ainsi l'exemple d'un virage à droite dans une intersection ainsi que la trajectoire optimale (ou du moins la plus probable) et les trajectoires limites (en fonction des caractéristiques moyennes du véhicule).

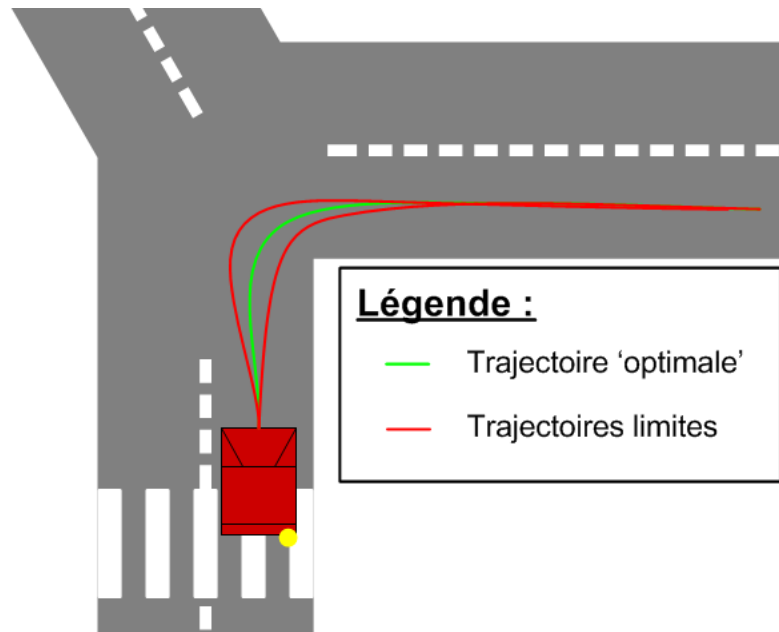


Figure 146 : Illustration des trajectoires possibles pour un virage à droite

La partie quantification de l'algorithme de prédiction de trajectoire nous permet donc d'obtenir à sa sortie, pour chaque action i possible :

- La probabilité P_i de réalisation de cette action
- La valeur 'nominale' a_i de l'accélération pour suivre cette action
- L'incertitude sur la valeur de a_i notée σ_{a_i}
- La valeur 'nominale' ϱ_i de la courbure pour suivre cette action
- L'incertitude sur la valeur de ϱ_i notée σ_{ϱ_i}
- Les valeurs maximales et minimales de a et ϱ pour chaque action

Les valeurs σ_{a_i} et σ_{ϱ_i} sont choisies de façon à caractériser la répartition des trajectoires autour de la trajectoire moyenne. Cette caractérisation se fait actuellement de façon arbitraire mais pourrait être améliorée par le biais d'études statistiques sur les trajectoires suivies pour différentes actions. On disposerait alors d'une base de données (basée sur un conducteur "standard") permettant, pour chaque action, de mieux décrire la trajectoire probable. La constitution de cette base de données demandera néanmoins un travail colossal de recueil de données.

VI - 1. 3. 6. Calcul de la densité de probabilité de présence dans l'espace :

La partie quantification nous fournit toutes les informations nécessaires à la prédiction de la position future de l'obstacle suivi. Ces informations permettent de plus de caractériser les incertitudes planant sur la position prédite et d'obtenir ainsi un espace probabilisé où le véhicule peut se trouver. Cet espace probabilisé est en fait une densité spatiale de probabilité, c'est-à-dire qu'on attribue à chaque point de l'espace une valeur exprimant la probabilité que l'obstacle se trouve en ce point.

Cette méthode nous permet donc de représenter très rapidement l'ensemble des zones de l'espace où l'obstacle pourra se trouver mais aussi la probabilité que l'obstacle se trouve dans cette zone à l'instant considéré. On verra par la suite que cette représentation est nécessaire pour déterminer une valeur numérique du risque de collision entre l'obstacle et le véhicule hôte.

Les données calculées lors de la quantification des trajectoires permettent de calculer les densités de probabilité partielles D_{p_i} liées à chaque action. En considérant l'ensemble de ces densités de probabilité partielles, on obtient la densité de probabilité totale pour l'obstacle considéré. Il ne reste plus alors qu'à transformer cette densité de probabilité totale exprimée en (a, ρ) en une densité de probabilité spatiale exprimée dans le domaine (x, y) (on ne prend pas en compte l'élévation car on ne traite que des cibles se déplaçant sur le sol).

VI - 1. 3. 6. 1. Calcul des densités de probabilité partielles

Les données de sortie de la quantification ont été définies de façon à pouvoir être utilisées facilement pour calculer une densité de probabilité. Notre choix s'est porté sur une densité de probabilité bidimensionnelle de type gaussienne qui est une des plus classiques. D'autres densités de probabilité existent et peuvent être utilisées moyennant une modification des données de sortie de la quantification.

Les densités de probabilité partielles D_{p_i} s'expriment donc :

$$D_{p_i}(a, \rho) = \frac{1}{2\pi\sigma_{a_i}\sigma_{\rho_i}} e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{a-a_i}{\sigma_{a_i}} \right)^2 + \left(\frac{\rho-\rho_i}{\sigma_{\rho_i}} \right)^2 \right]}$$

La Figure 147 montre la forme de D_{p_i} , représentée sous forme tridimensionnelle. Les paramètres choisis pour cette figure sont $a_i=0$, $\rho_i=0$, $\sigma_{a_i}=0.5$, $\sigma_{\rho_i}=0.01$. On voit bien que la valeur en un point ne représente pas la probabilité de présence de l'obstacle car cette valeur peut être très supérieure à 1. On rappelle donc que la probabilité de présence dans une zone donnée est calculée en intégrant la densité de probabilité sur cette zone.

On notera que l'on utilise un "espace des possibles" pour la description des densités de probabilité. Cet "espace des possibles" traduit simplement les limitations physiques du véhicule qui ne pourra pas générer des accélérations de 20 m/s² ou tourner selon un rayon de courbure de 1 mètre par exemple.

Représentation tridimensionnelle de D_p en fonction de la courbure et de l'accélération

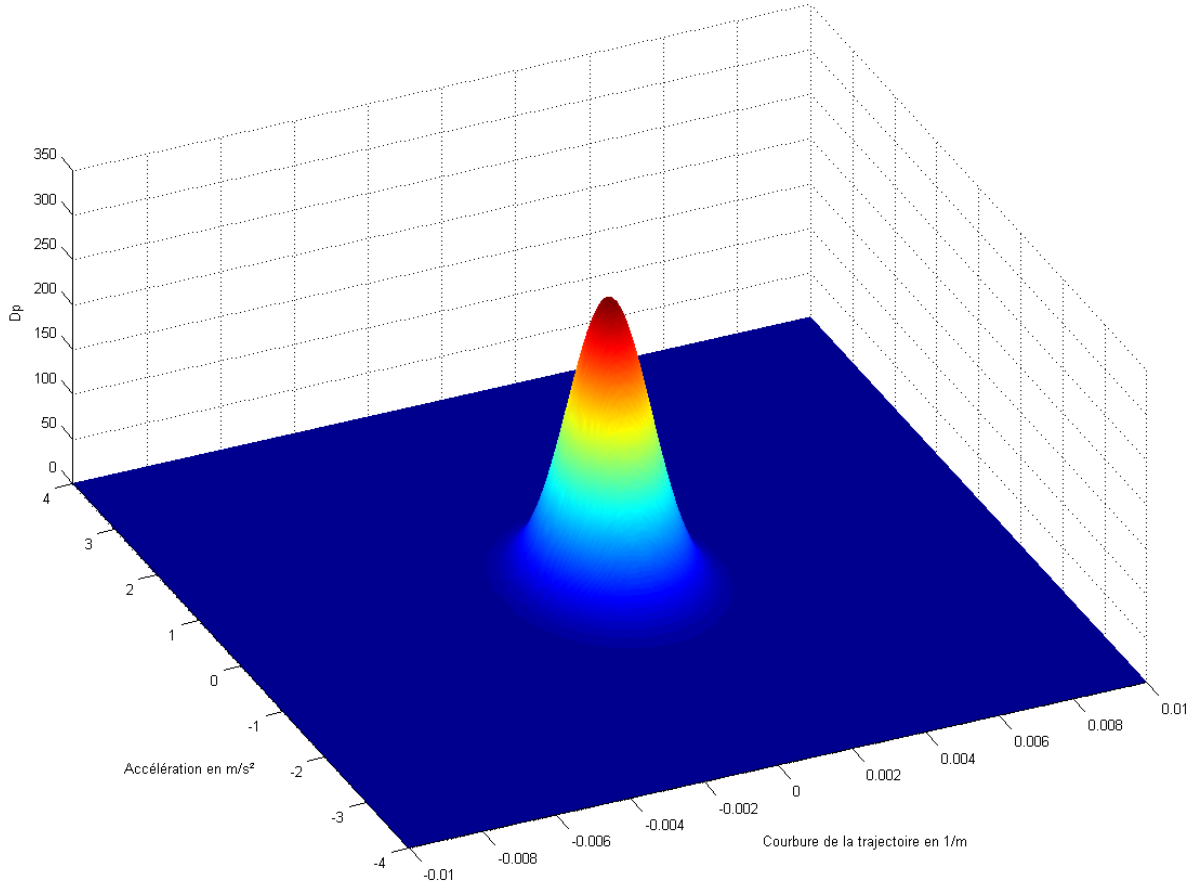


Figure 147 : Représentation 3D d'une densité D_{P_i}

VI - 1. 3. 6. 2. Calcul de la densité de probabilité totale dans le domaine (a, ρ)

Une fois calculées toutes les densités de probabilité partielles associées à chaque action possible. On dispose des informations nécessaires à l'obtention d'une densité de probabilité totale. En effet, chacune des densités de probabilité partielles est associée à la probabilité P_i de réalisation de l'action. Or par construction la somme de toutes les probabilités d'action P_i est égale à 1 (on a décrit l'ensemble des actions possibles). On peut donc bien obtenir une densité de probabilité en effectuant une simple moyenne pondérée des densités de probabilité partielles. On a donc l'expression suivante de D_p :

$$D_p(a, \rho) = \sum_{i=0}^{i_{max}} P_i D_{p_i}(a, \rho) = \sum_{i=0}^{i_{max}} \frac{P_i}{2\pi\sigma_{a_i}\sigma_{\rho_i}} e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{a-a_i}{\sigma_{a_i}} \right)^2 + \left(\frac{\rho-\rho_i}{\sigma_{\rho_i}} \right)^2 \right]}$$

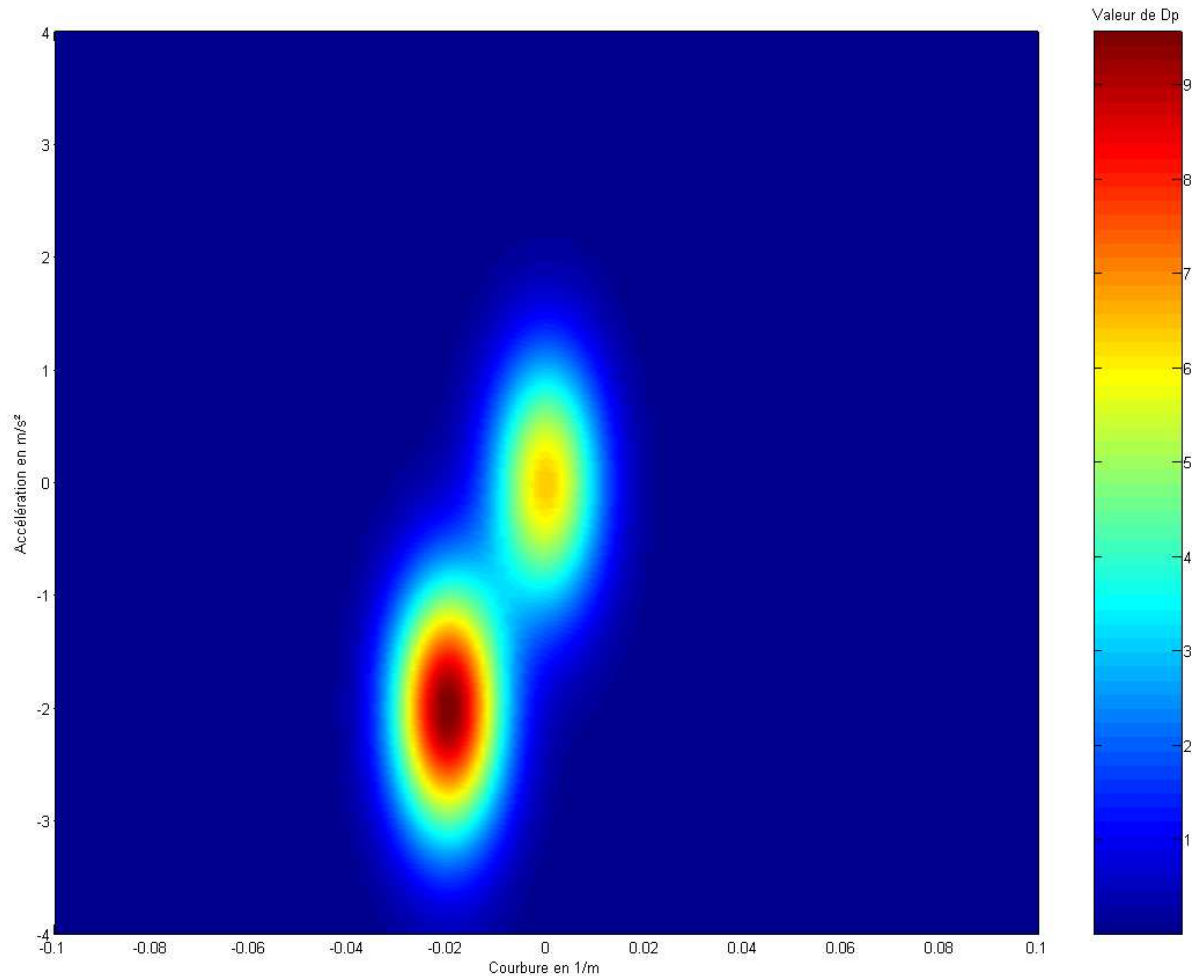


Figure 148 : Densité de probabilité totale en (a, ρ) calculée pour la Figure 146

On représente sur la Figure 148 la densité de probabilité totale dans le domaine (a, ρ) dans la situation correspondant à la Figure 146. On n'a considéré ici que les actions TOURNE A DROITE EN RALENTISSANT et CONTINUE TOUT DROIT SANS RALENTIR. On a donc deux pics centrés en $(-2, -0.02)$ et $(0, 0)$. On notera que l'action TOURNER A DROITE correspond à une courbure négative. Ce choix a été fait pour rester cohérent avec les repères utilisés précédemment.

VI - 1. 3. 6. 3. Calcul de la densité de probabilité spatiale de présence

Lorsque l'on dispose de la densité de probabilité totale dans le domaine (a, ρ) on peut facilement déterminer la densité de probabilité totale de présence en n'importe quel point de l'espace en appliquant de simple formule mathématique décrivant la cinématique du véhicule selon le point (a, ρ) considéré. On effectue ce raisonnement sur l'ensemble de l'espace (a, ρ) pour déterminer ainsi la densité de probabilité spatiale de présence.

Pour faire ce calcul, nous devons disposer, en sus de la densité de probabilité en (a, ρ) , du vecteur vitesse initial et de la position du véhicule à l'instant considéré. On rappelle que sur l'intervalle de prédiction (qui sépare donc deux itérations de l'algorithme de prédiction de trajectoire) la valeur du couple (a, ρ) est supposée constante. La Figure 149 décrit la géométrie utilisée pour obtenir la formule mathématique de passage du couple (a, ρ) au couple de positions (x, y) .

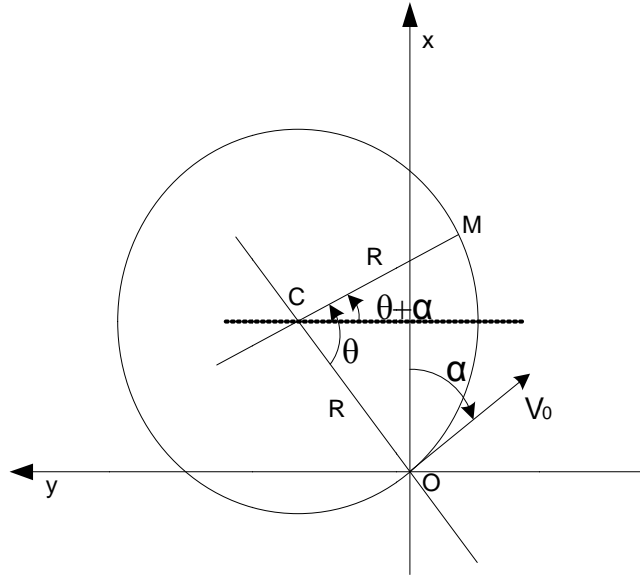


Figure 149 : Géométrie utilisée pour passer de (a, ρ) à (x, y)

Dans la Figure 149, on appelle :

- O, de coordonnées (x_0, y_0) , le point initial lors de la prédiction.
- C, de coordonnées (x_c, y_c) , le centre de courbure instantanée à l'instant initial.
- R, le rayon de cette courbure, égal à $1/\rho$.
- M, le point atteint après Δt , fin de l'intervalle de prédiction.
- Θ , l'angle orienté (CO, CM)
- V_0 , le vecteur vitesse initial
- α , l'angle orienté (x, V_0)

$$\text{On a alors : } \begin{cases} x_M = R(\sin(\theta + \alpha) - \sin \alpha) \\ y_M = R(\cos \alpha - \cos(\theta + \alpha)) \end{cases}$$

$$\text{avec } R\theta = v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

On constate dans cette formule que R est négatif lorsque la courbure est à droite ce qui correspond à notre choix de repère. La position (x_M, y_M) est donnée par rapport à la position initiale de l'obstacle lors de la prédiction. On pourra éventuellement ajouter (x_0, y_0) pour obtenir la position absolue.

On donne sur les Figure 150 et Figure 151 et le résultat du calcul de densité spatiale de probabilité de présence, obtenu à partir du résultat de la Figure 148, pour un Δt de 0.1 et 1 seconde. La position est une position relative, la vitesse initiale était considérée comme égale à 20 m/s selon l'axe x et 0 selon l'axe y. Pour la Figure 151, on a limité les valeurs possibles du rayon de courbure entre -20 et 20 mètres pour limiter la taille de la figure.

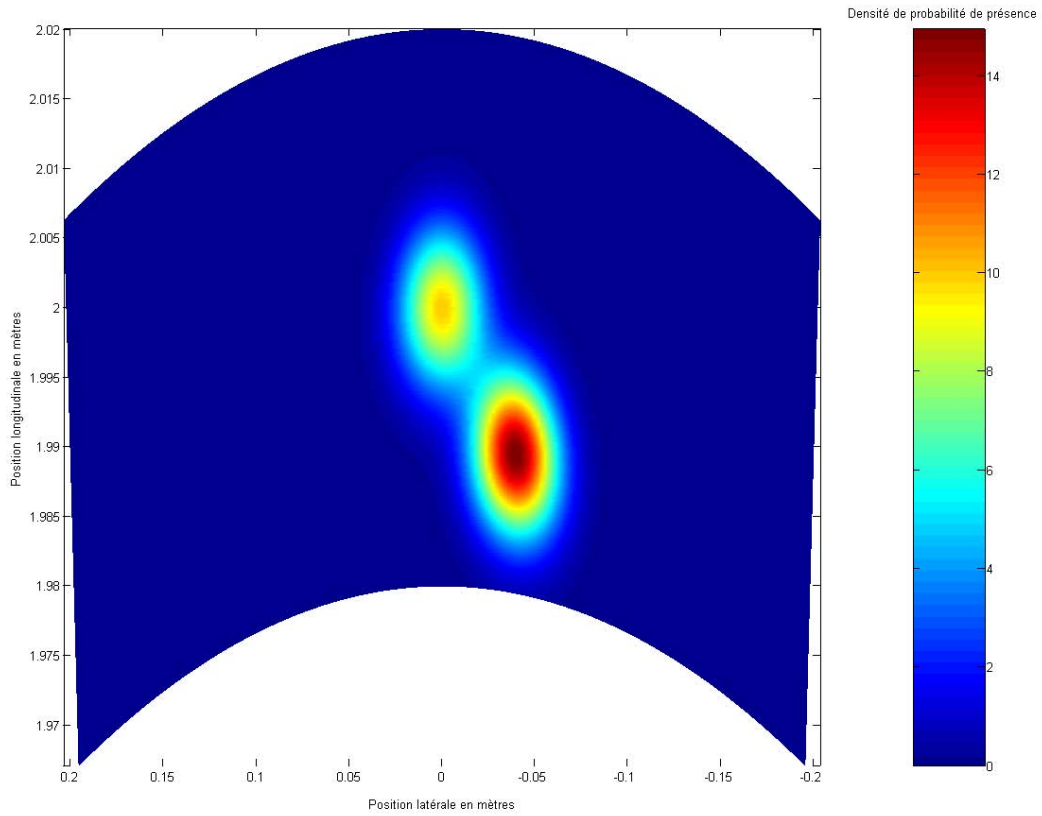


Figure 150 : Densité de probabilité de présence à $t=t_0+0.1s$ appliqué à la Figure 146

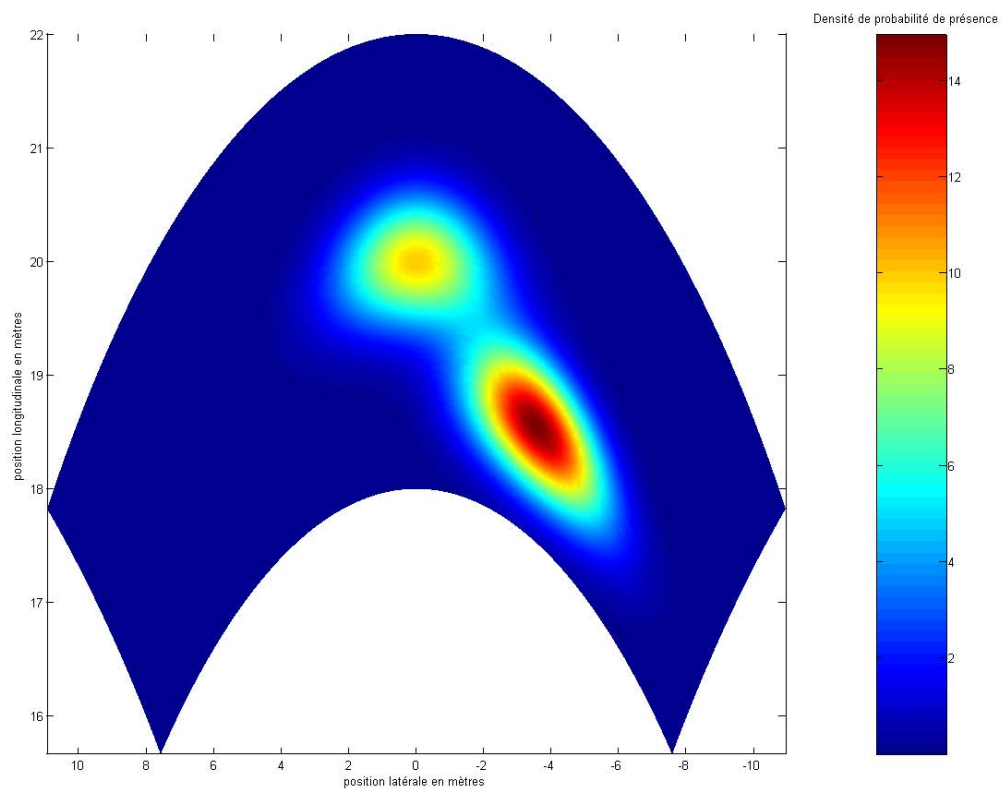


Figure 151 : Densité de probabilité de présence à $t=t_0+1s$ appliqué à la Figure 146

On voit que la prédiction à 100 ms donne des localisations très précises alors que la prédiction à 1 seconde donne déjà des résultats beaucoup moins sûrs. De plus, en une seconde un véhicule a le temps de changer de trajectoire. On préférera donc utiliser un pas temporel de prédiction plus faible, de l'ordre de quelques centaines de millisecondes. Le choix du pas se fera en pratique comme un compromis entre la précision spatio-temporelle souhaitée et la charge de calcul qu'elle impose. En effet, plus on cherchera à obtenir une précision importante, plus il faudra d'itérations et donc de calculs pour réaliser la prédiction sur l'intervalle de temps complet.

VI - 1. 3. 6. 4. Prise en compte de la densité de probabilité précédemment calculée

Jusqu'à présent, nous n'avons pas pris en compte les prédictions précédentes dans le calcul de la densité de probabilité spatiale de présence. Cette prise en compte se fait de façon relativement simple sur le plan théorique en effectuant une convolution de la densité de probabilité calculée précédemment avec la nouvelle densité de probabilité. En effet, à la fin d'une itération, on dispose d'une carte spatiale représentant toutes les positions possibles pour un obstacle avec la densité de probabilité associée. On pourrait alors utiliser chacune de ces positions pour l'algorithme de prédiction de trajectoire, mais les calculs nécessaires deviendraient vite astronomiques.

Pour obtenir un résultat approximatif beaucoup plus rapidement, on sépare chaque hypothèse de direction de la prédiction précédente (chaque pic de la densité de probabilité) et on effectue la nouvelle prédiction sur chacune de ces positions. On obtient ainsi une densité de probabilité pour chacun de ces pics. On effectue alors la convolution de la densité de probabilité calculée avec la densité correspondant au pic précédent. On obtient ainsi une prédiction qui prend en compte les incertitudes précédentes. En recombinaison, toutes ces densités de probabilités on obtient la densité spatiale de probabilité de présence totale à l'instant suivant. On résume ce mode de fonctionnement dans la Figure 152.

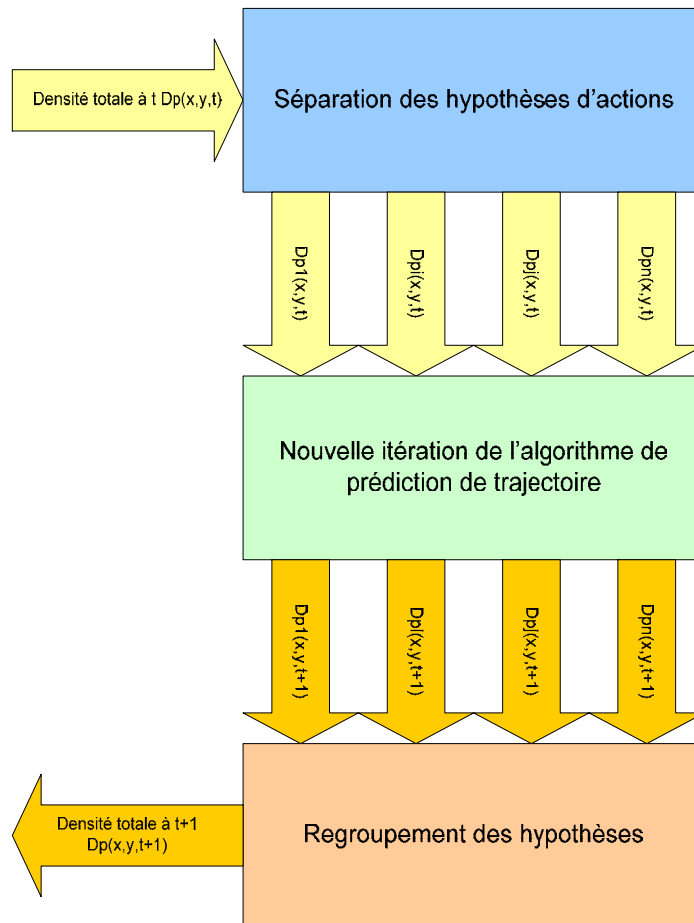


Figure 152 : Principe de la prise en compte des prédictions précédentes

VI - 1. 4. Optimisations de l'algorithme de prédiction :

On a vu apparaître, lors de l'étude de l'algorithme, plusieurs problèmes potentiels au niveau des performances de l'algorithme. Celui-ci fait en effet appel à de nombreux calculs, répétitifs et relativement lourds, ou à des calculs portant sur de très nombreuses données (typiquement la convolution des densités de probabilité) qui imposent une forte demande en bande passante mémoire.

VI - 1. 4. 1. Algorithme récursif et problèmes de mémoires

La première optimisation que nous avons apportée provient de l'utilisation de la récursivité. Cette optimisation provient de la structure même de l'algorithme qui s'y prête particulièrement bien. L'utilisation de la récursivité introduit par contre un choix à faire quant au type d'optimisation souhaité. Il est en effet possible d'optimiser l'algorithme pour utiliser moins de mémoire ou pour que l'exécution soit plus rapide et surtout incrémentale et interruptible.

Dans le premier cas, on stocke à chaque itération les diverses possibilités d'actions puis on effectue une nouvelle itération sur une seule de ces actions, et on continue de cette façon jusqu'à arriver au temps final de prédiction. On remonte ensuite les diverses étapes pour compléter la prédiction totale, toujours de la même façon. Cette méthode permet de limiter le nombre de cartes de densité de probabilité à stocker en mémoire, elle impose par contre de finir le calcul pour disposer des cartes de densités de probabilité totale aux divers instants de prédiction, ce qui rend impossible l'interruption en cours d'exécution.

Dans le deuxième cas, que nous avons choisi d'ailleurs, on calcule à chaque itération l'ensemble des densités de probabilités spatiales partielles. On dispose ainsi à tout moment des prédictions précédentes, ce qui rend l'algorithme interruptible. Malheureusement, cette optimisation se fait au détriment de l'espace mémoire utilisé, l'algorithme devant stocker l'intégralité des cartes de densités de probabilités spatiales partielles. En supposant que chaque carte utilise 20 Ko en mémoire, que pour chaque itération on génère 5 hypothèses d'actions, qu'on utilise une période d'échantillonnage de 100 ms entre chaque itération et que l'on veuille réaliser une prédiction à 5 secondes, on devrait stocker environ $5^{50} \times 20$ Ko. Cette valeur est évidemment beaucoup trop importante et doit donc être réduite de façon à rendre possible l'exécution de l'algorithme. Pour ce faire on peut réduire la précision temporelle, ce qui conduit à un manque de réactivité face à un changement brusque de trajectoire. Une telle réduction peut néanmoins amener des changements extrêmement bénéfiques, par exemple si la période d'échantillonnage n'est plus que de 1 seconde la mémoire totale utilisée est de environ $5^5 \times 20$ Ko = 61 Mo. Une telle valeur est beaucoup plus acceptable et peut être mise en œuvre sur un ordinateur. En pratique on devra donc établir un équilibre entre la précision souhaitée et la charge mémoire qu'elle impose. Enfin, pour réduire la taille mémoire utilisée on pourra réduire assez fortement la taille des cartes de densités de probabilités, dont une grande partie des valeurs est très faible. On pourra alors utiliser un codage de type RLE²⁸ ou similaire pour réduire fortement la taille de ces cartes. Cette réduction se fera là encore au détriment de la vitesse d'exécution, mais elle permettra d'augmenter la précision temporelle et de baisser la quantité de mémoire nécessaire à la bonne marche de l'algorithme.

VI - 1. 4. 2. Parallélisme du traitement des obstacles :

L'algorithme que l'on a développé ne permet de traiter, comme on peut le constater, qu'un seul obstacle à la fois. Il est donc nécessaire, dans un environnement multi obstacles, d'appliquer cet algorithme à chacun des obstacles. Une exécution séquentielle, c'est-à-dire un traitement séquentiel des obstacles, ne permet pas d'interrompre le calcul total et d'obtenir la prédiction pour tous les obstacles à un instant donné. De plus, dans un tel mode d'exécution séquentiel, la puissance de calcul du processeur n'est pas utilisée lors des appels mémoires qui auront forcément lieu.

²⁸ Pour Run Length Encoding. Ce codage est particulièrement adapté aux images présentant de grandes surfaces homogènes puisqu'il encode un groupe de pixels de même valeurs sous la forme (valeur, nombre de pixels). Cet encodage est par contre inadapté aux images très bruitées.

Ces inconvénients, liés à une exécution séquentielle, nous ont naturellement amené à introduire du parallélisme dans le traitement des obstacles. Ainsi, le programme a été développé pour que chaque obstacle soit traité dans un thread²⁹ distinct. On crée ainsi un parallélisme naturel grâce au système d'exploitation de l'ordinateur qui va basculer régulièrement entre les différents threads. De cette façon, les obstacles sont traités de façon quasi simultanée ce qui permet d'avoir les résultats partiels de la prédiction pour tous les obstacles sans attendre la fin de l'exécution.

L'utilisation d'un thread par obstacle permet aussi d'utiliser le parallélisme matériel qui existe désormais sur la quasi-totalité des processeurs récents. Ainsi, si l'on dispose de plusieurs processeurs ou de processeurs multi-cœurs, les threads seront exécutés en parallèle sur les différents cœurs logiques disponibles. Il en ira de même avec les processeurs de dernière génération capables d'exécuter simultanément plusieurs threads sur un même processeur (technologie hyperthreading d'Intel par exemple). Sur de tels processeurs, un thread pourra utiliser toutes les capacités de calcul du processeur pendant qu'un autre accédera aux données en mémoire, accélérant d'autant plus l'exécution du programme.

Enfin, l'utilisation des threads nous permet de prioriser les obstacles et d'introduire ainsi un traitement plus précis par exemple sur les obstacles plus dangereux. On détaillera cette application dans la partie dédiée au calcul du risque de collision. L'utilisation de priorités différentes entre les différents threads permet en effet de donner plus de temps processeur (c'est-à-dire plus de ressources) aux threads les plus prioritaires.

VI - 1. 4. 3. Parallélisme de l'algorithme :

On a vu que l'on pouvait utiliser le parallélisme du programme global, mais l'algorithme lui-même présente un certain parallélisme dans les tâches qu'il exécute. Ainsi tous les traitements appliqués sur les densités de probabilité effectuent des opérations répétitives sur un très grand nombre de données. Les processeurs modernes disposent d'unités de traitement vectorielles capables d'effectuer une opération sur plusieurs données à la fois. On programme donc l'algorithme pour qu'il utilise au maximum ces unités vectorielles qui permettent d'accélérer très fortement l'exécution. Cette programmation optimisée se fait par l'utilisation de bibliothèques spécifiques (IPL et OpenCV d'Intel par exemple) qui donnent accès à ces unités de façon simple et rapide.

En complément de l'utilisation des unités vectorielles des processeurs, on pourra aussi tirer avantageusement partie du ou des processeurs graphiques présents dans l'ordinateur. En effet, les générations les plus récentes de processeurs graphiques disposent de centaines d'unités de calcul vectoriel spécialisées dans le traitement répétitif de très grande quantité de données (points 3D et textures pour la visualisation 3D par exemple). Cette puissance de calcul est désormais accessible, là encore par le biais de bibliothèques spécifiques (OpenCL ou CUDA par exemple), pour effectuer des calculs non liés à l'affichage de l'ordinateur. On pourra donc utiliser cette possibilité pour décharger le processeur d'un maximum de ces traitements répétitifs afin d'obtenir les résultats beaucoup plus rapidement.

VI - 2. Prédiction de la trajectoire du véhicule

Le module de prédiction des trajectoires des obstacles permet, comme on a pu le voir, de déterminer à l'avance les différentes trajectoires que les obstacles peuvent suivre ainsi que leurs probabilités. Ceci est très utile si nous sommes aussi capables de déterminer la position de notre véhicule sur ce même intervalle de prédiction. La prédiction de la trajectoire du véhicule hôte doit donc permettre de prévoir la situation dans laquelle le véhicule se trouvera au bout d'un certain temps. Ceci s'avérera utile pour identifier un risque de collision potentielle mais aussi le risque de sortie de route. Cette prédiction permettra enfin de prévoir à l'avance une violation des règles de la conduite, ce qui permettra au cindynamètre d'avertir le conducteur pour lui éviter d'être en infraction.

²⁹ On rappelle que les threads sont des morceaux de programmes qui peuvent être exécutés simultanément et séparément les uns des autres sur plusieurs processeurs ou sur plusieurs unités logiques d'un processeur sans avoir à effectuer d'appels mémoires supplémentaires.

Une étude de la tâche incombant à ce module de prédiction de la trajectoire du véhicule hôte permet de voir de très nombreuses similitudes avec le module de prédiction de trajectoire des obstacles. En effet, la prédiction de la trajectoire du véhicule hôte peut apparaître simplement comme la prédiction de la trajectoire d'un obstacle sur lequel on dispose de davantage d'informations beaucoup plus précises. C'est effectivement le cas et on ne représentera donc pas l'algorithme présenté précédemment. On va donc simplement montrer où se trouvent les différences au niveau du traitement dans les différentes parties de l'algorithme.

On aurait aussi pu utiliser les recherches citées précédemment qui visent à prédire les actions du conducteur à partir de chaînes de Markov ou de réseaux Bayésiens (voir section VI - 1. 2). On a cependant préféré privilégier la réutilisation de l'architecture dédiée à la prédiction de la trajectoire des obstacles du fait de la limitation de ces approches à la seule trajectoire la plus probable mais aussi afin de simplifier le programme du cindynomètre.

VI - 2. 1. Différences entre algorithmes de prédiction de trajectoires

La structure même des algorithmes reste la même puisqu'on se base sur le même algorithme. On a donc toujours un algorithme récursif dont chaque itération correspond à l'architecture décrite Figure 141. On aura donc toujours une étape de fuzzification avant d'entrer dans le réseau d'inférence, puis une quantification de la trajectoire pour disposer en sortie des cartes de densité de probabilité.

VI - 2. 1. 1. Différences dans l'étape de fuzzification :

L'étape de fuzzification de la trajectoire permet de passer de données quantitatives à des données qualitatives mais aussi de prendre en compte l'incertitude due aux erreurs de mesure sur ces valeurs. Dans le cas de la trajectoire du véhicule hôte cette incertitude est beaucoup plus faible. Les fonctions d'appartenance utilisées pour la fuzzification seront donc beaucoup plus franches que pour les obstacles. Les transitions entre probabilité d'action nulle et égale à 1 seront donc beaucoup plus rapides.

On dispose de plus d'autres capteurs sur le véhicule qui nous permettent de mieux caractériser la trajectoire en cours. Ainsi, le capteur d'angle volant nous donne la vitesse de rotation du volant et donc ainsi la tendance de la direction du véhicule. De même, les capteurs de course sur le pédalier permettent de déterminer la pression et la course appliquées aux différentes pédales ce qui nous permet de déterminer la tendance de l'accélération.

Ces données seront donc passées elles aussi dans l'étape de fuzzification et on leur appliquera des fonctions d'appartenance similaires. Ainsi, l'angle volant utilisera une fonction d'appartenance de même type que pour la détermination de la direction suivie (une fonction SMF, une ZMF et une fonction complémentaire). La course de la pédale de frein n'introduira qu'une action FREINE et son action complémentaire NE FREINE PAS. La course de la pédale d'accélérateur introduira quant à elle trois actions possibles ACCELERE, MAINTIENT SA VITESSE et RALENTIT. Les fonctions d'appartenance utilisées prennent la position neutre de la pédale comme valeur de changement entre ces états (équivalent du 0 dans la Figure 142 par exemple). Cette valeur sera déterminée en fonction du régime moteur et de la vitesse du véhicule.

VI - 2. 1. 2. Différences dans le réseau d'inférence probabiliste :

On vient de voir que l'étape de fuzzification avait maintenant plus d'entrées, il est donc logique que le réseau d'inférence ait lui aussi plus d'entrées. Celui-ci gèrera en effet, en plus de l'angle volant et de la course pédalier, les informations de la navigation qui indiquent où le conducteur souhaite se rendre, la présence d'obstacles autour du véhicule (qui pourraient l'inciter à doubler par exemple) mais aussi, éventuellement, les données fournies par les capteurs introduits dans l'habitacle (caméra filmant le conducteur, ...) qui renseignent sur le comportement du conducteur. Toutes ces données seront fusionnées de la même façon que pour la prédiction appliquée aux obstacles, seul le réseau d'inférence changera. On gardera donc la même structure multicouche présentée Figure 145.

VI - 2. 1. 3. Différences dans la quantification des trajectoires prédites :

L'étape de quantification de la trajectoire consiste, comme nous l'avons vu, à fusionner les intentions prédites avec l'environnement du véhicule, pour en extraire les paramètres des trajectoires probables. Dans le cas de la prédiction de la trajectoire des obstacles, cette quantification se fait à l'aide d'une base de données reprenant les comportements moyens des conducteurs en général. Dans le cas particulier de la trajectoire du véhicule hôte on dispose de données supplémentaires très importantes pour la quantification :

- Le modèle dynamique du véhicule, qui permet de ne considérer que les trajectoires possibles pour ce véhicule alors que l'on doit prendre en compte toutes les trajectoires possible pour un véhicule non identifié par exemple (une Twingo a ainsi un diamètre de braquage minimal beaucoup plus faible qu'une berline de type Laguna par exemple).
- Une base de données secondaire construite par apprentissage du mode de conduite du conducteur. Il sera alors important, en plus d'être capable de détecter ce mode de conduite d'être capable de reconnaître le conducteur afin de disposer d'une base indexée par conducteur du véhicule. On pourra aussi disposer d'une base de mode de conduite en fonction du comportement du conducteur.

Cette base de données secondaire est actuellement en projet car elle permettrait de mieux adapter la trajectoire prédite à la trajectoire prise réellement par le conducteur. Il faut néanmoins faire attention à l'utilisation d'une telle base qui ne prend pas en compte naturellement les changements d'humeur du conducteur ou son état de fatigue ou de stress. On risque donc, si on n'y prend pas garde, de prédire une action alors que l'état d'esprit du conducteur n'aboutira pas du tout à cette action.

La dernière différence dans la partie quantification de l'algorithme provient de l'ajout d'incertitude qui sera beaucoup plus faible puisque la trajectoire prédite sera, a priori, beaucoup plus proche de la trajectoire future grâce à notre meilleure connaissance de la dynamique du véhicule et de la façon de conduire du conducteur. Les densités de probabilité seront donc beaucoup plus concentrées sur les pics les plus probables. On remarquera qu'il n'y a pas de différences dans la création des densités de probabilité totales ou partielles.

VI - 2. 2. Différences de programmation

On a vu que l'algorithme de prédiction de trajectoire du véhicule hôte est similaire à l'algorithme de prédiction de la trajectoire des obstacles. Les différences se trouvent principalement dans la précision des données en entrée et dans la prise en compte d'informations supplémentaires disponibles dans le véhicule hôte. Au niveau de la programmation, ces différences se traduisent par une nécessité de modifier le réseau d'inférence pour prendre en compte les nouvelles entrées, d'ajouter certaines entrées et sorties dans le module de fuzzification et de modifier légèrement la partie quantification de la trajectoire pour prendre en compte la meilleure précision sur la trajectoire prédite.

Au niveau du programme lui-même, les différences sont un peu plus sensibles. Ainsi, le programme n'utilise plus qu'un thread puisqu'il n'y a que le véhicule hôte à traiter. Pour accélérer la prédiction de la trajectoire du véhicule hôte on lui attribue une priorité plus forte qu'aux autres obstacles. La trajectoire du véhicule hôte est en effet beaucoup plus importante à déterminer que celles des obstacles car elle permet d'identifier le risque de sortie de route ou de violation des réglementations. On attribuera cependant toujours aux différents obstacles des priorités telles que la prédiction de leurs trajectoires puisse être faite au moins partiellement afin de pouvoir calculer le risque de collision entre le véhicule et un des obstacles.

De même, le programme est écrit comme un module indépendant et pourra donc disposer de développements complémentaires par la suite sans modifier le programme dédié à la prédiction de la trajectoire des obstacles. Parmi ces développements, on peut citer la prise en compte de la base de données de trajectoires liée au conducteur ou les mécanismes de création de cette base.

VI - 3. Calcul du risque de collision

La détection d'un risque de collision et la quantification de ce risque sont deux des buts principaux du 'cerveau' du cindynomètre. Il est en effet extrêmement important de pouvoir avertir le conducteur d'une collision éventuelle, et ce, suffisamment à l'avance pour qu'il puisse choisir les bonnes contre-mesures. Ce sujet concentre actuellement un certain nombre de recherches qui visent à mieux estimer le risque de collision entre véhicules de façon à réduire le risque d'accident.

Eidehall [Eidehall 07] propose ainsi un système d'anti collision baptisé ELA (pour Emergency Lane Assist) visant à corriger la trajectoire du véhicule lorsque celui-ci sort de la route et risque de percuter un autre véhicule. Le risque de collision est évalué uniquement par rapport aux véhicules circulant dans les voies adjacentes. Eidehall évalue alors les TLC du véhicule hôte avec les bords de la voie la voie adjacente. Il définit ainsi une zone de danger (comprise entre les zones d'entrée et de sortie de la voie par le véhicule hôte) qu'il élargit pour prendre en compte la taille du véhicule hôte, la taille de l'obstacle ainsi qu'une marge de sécurité. Il interpole alors la trajectoire de l'obstacle et considère qu'il y a un risque si la trajectoire de l'obstacle se situe dans la zone de danger entre les deux TLC calculés.

Broadhurst [Broadhurst 04] de son côté propose un système donnant au conducteur un choix entre quelques choix stratégiques déterminés comme sûrs. Ce système se base, comme nous l'avons présenté précédemment, sur la théorie des jeux pour déterminer quelles actions ne mènent pas à une collision durant le temps de prédiction choisi. Il n'y a donc pas de calcul du risque de collision a priori mais plutôt un calcul du chemin le plus sûr permettant de naviguer sans collision. Broadhurst calcule ainsi les trajectoires associées à chaque décision que pourrait prendre le conducteur et vérifie que ces trajectoires n'intersectent pas la trajectoire extrapolée des autres obstacles. Ce calcul se fait en calculant l'intersection des enveloppes des différentes trajectoires de façon similaire à Eidehall.

On constate ainsi sur ces deux approches que le calcul du risque de collision se base tout d'abord sur la détermination de la zone de collision entre 2 mobiles dans l'environnement tridimensionnel x, y, t (on considère que tous les obstacles se déplacent sur la route ce qui est raisonnable dans le cas de la conduite automobile). Le risque de collision est alors calculé en mesurant la probabilité que chacun des mobiles se trouve dans la zone de collision potentielle.

Nous avons vu précédemment que nous pouvions disposer d'une prédiction des positions futures possibles de chaque obstacle mais aussi des positions futures du véhicule hôte. On conçoit alors qu'il est possible de déterminer les zones où une collision risque de se produire (la Figure 153 montre l'intersection de deux espaces de probabilités au cours du temps). Cette zone de collision contiendra de plus la probabilité pour chaque véhicule d'être présent. Il sera donc possible de calculer le risque de collision en suivant une approche similaire à Eidehall ou Broadhurst. Nous allons donc maintenant montrer plus en détails comment le risque de collision est déterminé et quantifié.

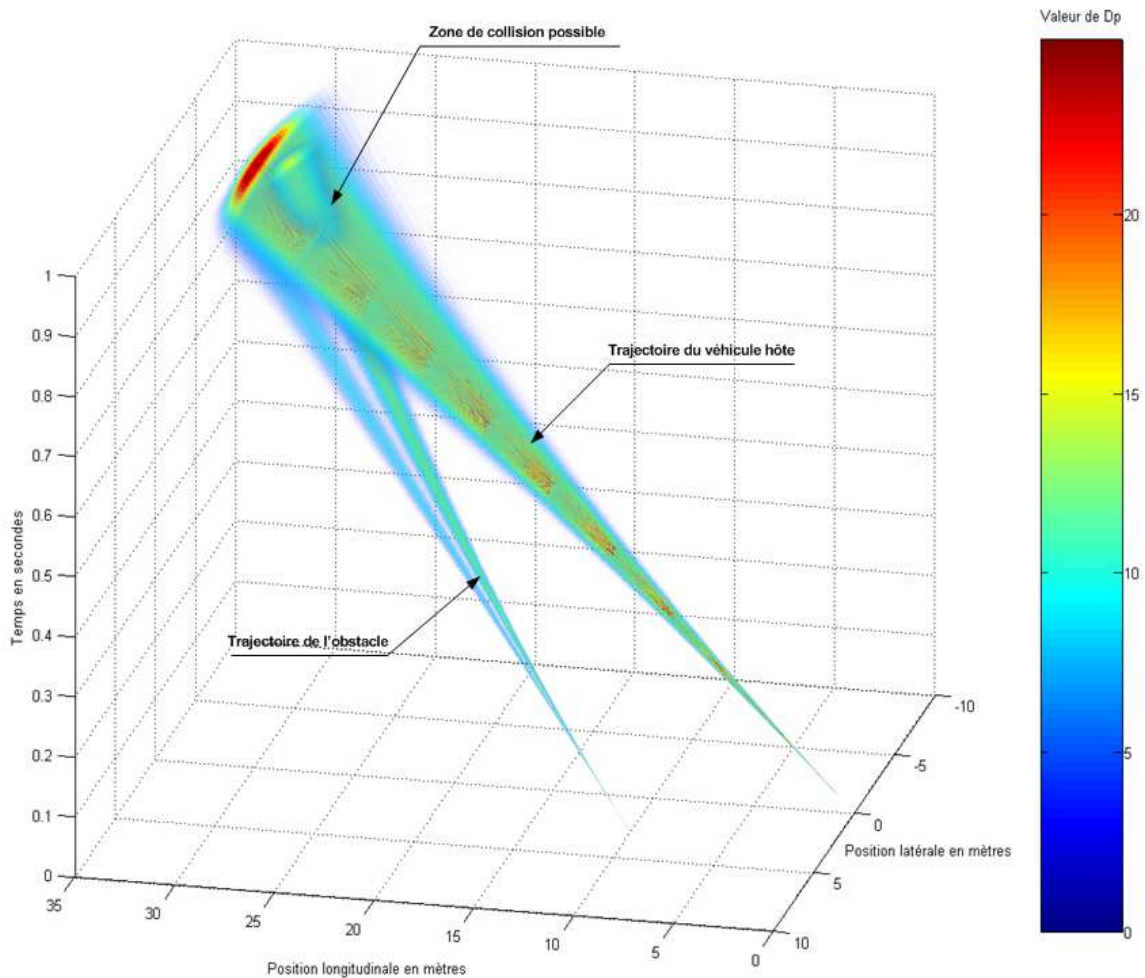


Figure 153 : Exemple de trajectoires présentant un risque de collision

VI - 3. 1. Principe du calcul du risque de collision :

On définit le risque de collision entre deux véhicules à un instant donné, comme la probabilité que ces deux véhicules aient, à l'instant considéré, au moins une partie de leurs surfaces au sol en commun. Cette définition correspond bien à la notion de collision puisque lorsque deux véhicules ont une partie de leur surface au sol en commun ils sont généralement en collision (on ne traite ici que des véhicules terrestres, cette définition n'étant plus valable pour des véhicules se déplaçant librement dans les trois dimensions de l'espace – cas dans lequel il faut considérer le volume occupé et non plus la surface).

A partir de cette définition on voit qu'il est nécessaire de connaître les positions futures des différents véhicules. Il faut de plus connaître la probabilité que ces véhicules se trouvent dans une zone accidentogène à l'instant considéré. Tous ces besoins justifient donc pleinement, a posteriori, la méthode que nous avons utilisée pour prédire la position des obstacles et qui nous permet de calculer la probabilité de présence d'un objet en n'importe quel point de l'espace qu'il peut atteindre.

La détection du risque de collision et le calcul de celui-ci se feront donc en appliquant de simples règles probabilistes sur des zones de l'espace. La probabilité de collision $P_{A \times B}(S)$ entre deux véhicules A et B dans la zone de collision S sera donc égale à la probabilité que A soit dans S, $P_A(S)$, ET que B soit aussi dans S, $P_B(S)$. On aura donc $P_{A \times B}(S) = P_A(S) * P_B(S)$. Il ne restera plus alors qu'à calculer $P_A(S)$ et $P_B(S)$ pour obtenir la probabilité de collision dans cette zone S entre les véhicules A et B.

VI - 3. 1. 1. Calcul de la probabilité de présence dans une zone donnée

Les modules de prédiction de trajectoires du véhicule hôte ou des obstacles ont les mêmes sorties : une carte de densité de probabilité spatiale de présence. Le calcul de la probabilité de présence peut donc se faire de façon relativement simple. Il suffit pour cela d'exprimer la zone concernée dans le repère de la prédiction ou la prédiction dans le repère de la zone. En effet, les coordonnées de la zone de calcul peuvent être données dans un repère quelconque, alors que la prédiction est exprimée dans le repère lié à la dernière position mesurée du véhicule traité.

Une fois ce changement de coordonnées effectué, il est très simple de calculer la probabilité de présence dans la zone. Les cartes de sorties des modules de prédiction ont, en effet, été conçues pour donner directement la probabilité de présence sur une zone donnée. Il suffit pour cela de réaliser une intégration spatiale, sur la zone concernée, de la densité de probabilité de présence. On obtient alors la probabilité de présence dans cette zone. On a donc pour n'importe quel véhicule A, la probabilité de présence de A dans S donnée par (E13) :

$$P_A(S) = \iint_S Dp(x, y) dS$$

Les modules de prédiction de trajectoires ne fournissent pas en sortie une densité de probabilité de présence continue mais discrétisée. Il est en effet beaucoup plus facile de traiter des données discrètes avec un ordinateur que des données continues. La relation (E13) sera donc remplacée dans nos algorithmes par la relation (E14) qui est bien mieux adaptée à une exécution informatique :

$$P_A(S) = \sum_x \sum_y Dp(x, y).dx.dy$$

On peut donc disposer facilement de la probabilité de présence d'un véhicule dans une zone S. Il ne reste plus alors qu'à déterminer la zone S où ce calcul doit être fait.

VI - 3. 1. 2. Détermination de la zone de collision S :

La détermination de la zone de collision S ne peut pas être faite a priori, c'est-à-dire que l'on ne peut pas décréter qu'une zone fixe de l'espace sera zone de collision. On ne peut en effet pas savoir si deux véhicules peuvent se percuter avant d'avoir prédit leurs trajectoires possibles. On doit donc calculer et déterminer la zone de collision S à partir de la prédiction des trajectoires des véhicules impliqués (ici A et B). Pour ce faire, on va simplement déterminer la ou les zones d'intersection des trajectoires des véhicules.

Ici encore se pose la question du repère à utiliser pour calculer les intersections. Le calcul du risque de collision se faisant pour le véhicule hôte on a choisi d'exprimer toutes les cartes de densités de probabilité dans le repère lié au véhicule hôte au moment de la prédiction. Ce choix nous permettra de plus d'exprimer rapidement, si besoin est, ces cartes dans le repère absolu car la position dans ce repère du véhicule hôte est très bien connue au moment de la prédiction grâce au module de calcul de la position absolue du véhicule.

Une fois les cartes de densités de probabilité de présence exprimées dans le même repère, la détermination des zones de collision est immédiate puisqu'il s'agit, comme nous l'avons dit précédemment, de l'intersection des espaces de positions possibles pour chaque véhicule. On note E_A l'espace des positions possibles pour le véhicule A et E_B son équivalent pour le véhicule B. La zone S est donc donnée par la relation suivante (E15) :

$$S = E_A \cap E_B$$

VI - 3. 1. 3. Calcul du risque instantané de collision :

On dispose maintenant d'un ensemble de points de l'espace où les deux véhicules ont une chance de se percuter. Cette ou ces zones vont donc maintenant permettre de calculer très facilement le risque de collision. En appliquant le raisonnement présenté en introduction on obtient la relation (E16) qui permet de calculer le risque de collision :

$$P_{AxB} = \left(\sum_{E_A \cap E_B} \sum Dp_A(x, y).dx.dy \right) \left(\sum_{E_A \cap E_B} \sum Dp_B(x, y).dx.dy \right)$$

On pourrait aussi vouloir localiser les différentes zones de collision probable afin de les indiquer au conducteur. Lorsque les points où le risque de collision existe sont contigus, c'est-à-dire que la zone de collision n'est pas morcelée, ce travail de localisation est simple et on peut immédiatement attribuer la valeur du risque à cette zone. Dans le cas contraire le calcul précédent ne permet d'avoir que le risque global de collision entre les deux véhicules sans pouvoir localiser les zones de fortes probabilités.

Pour remédier à ce problème qui pourrait se poser, on effectue un partitionnement de l'ensemble des points de l'espace où la collision est possible en des sous ensembles de points contigus. Ce partitionnement est fait par de simples algorithmes de croissance de région qui offrent une très grande efficacité pour un coût de calcul relativement faible. On obtiendra ainsi non plus une unique zone S mais plusieurs zones S₁ à S_n d'intersections vides. On calculera alors les risques associés P_{AxB}(S₁) à P_{AxB}(S_n) à partir de la relation (E16) en réalisant les intégrations sur les zones considérées.

VI - 3. 1. 4. Evolution du risque de collision au cours du temps :

Le risque de collision calculé précédemment n'est valable que pour un instant donné. Les prédictions de trajectoires s'effectuent sur un intervalle de temps relativement long et il est donc nécessaire de disposer de l'évolution temporelle du risque pour pouvoir détecter tous les risques. On réalise donc une extension de la méthode précédente pour intégrer le facteur temps.

Cette extension se traduit en pratique par la prise en compte de la troisième dimension qui représente le temps t. On rappelle néanmoins que les distributions de probabilité spatiales de présence sont calculées à des instants donnés. La définition des probabilités de présence (E13) n'est donc presque pas modifiée et peut s'écrire sous la forme (E18) :

$$P_A(S, t) = \iint_S Dp(x, y, t) dS$$

On a alors dans le domaine discret la relation (E19) équivalente à (E14) :

$$P_A(S, t) = \sum_x \sum_y Dp(x, y, t).dx.dy$$

Les véhicules se déplaçant au cours du temps, la zone de collision dépend elle aussi du temps, ce que traduit (E20) :

$$S(t) = E_A(t) \cap E_B(t)$$

La fonction d'évolution du risque de collision entre deux véhicules au cours du temps sera donc donnée par (E21) :

$$P_{AxB}(t) = \left(\sum_{E_A(t) \cap E_B(t)} \sum Dp_A(x, y, t).dx.dy \right) \left(\sum_{E_A(t) \cap E_B(t)} \sum Dp_B(x, y, t).dx.dy \right)$$

VI - 3. 2. Prise en compte de la taille des véhicules :

Les cartes de densités de probabilité spatiale de présence, obtenues en sortie des modules de prédiction de trajectoire, ne prennent pas en compte la taille des véhicules. Ainsi les cartes obtenues ne fournissent que la densité de probabilité spatiale de présence d'un point particulier du véhicule ou de l'obstacle (le centre de gravité pour le véhicule hôte, le point le plus proche du véhicule hôte, lors de la prédiction, pour les autres obstacles). Pour calculer le risque de collision il faut donc prendre en compte la taille et l'orientation de l'obstacle et du véhicule à tout instant.

VI - 3. 2. 1. Principe :

Pour prendre en compte la surface occupée par le véhicule, on modifie les cartes de densités de probabilité spatiale de présence reçues pour qu'elles reflètent la taille de l'obstacle ou du véhicule. Cette modification se fait par l'application d'une opération relativement simple qui va 'étendre' la valeur d'un point de la densité de probabilité à la surface du véhicule ou de l'obstacle. La Figure 154 explique cette opération appliquée à un point de la densité de probabilité. On se place volontairement dans le cas discret, qui permet une mise en œuvre plus simple de cette opération. On parlera donc de pixel pour chaque élément discret de la densité de probabilité spatiale.

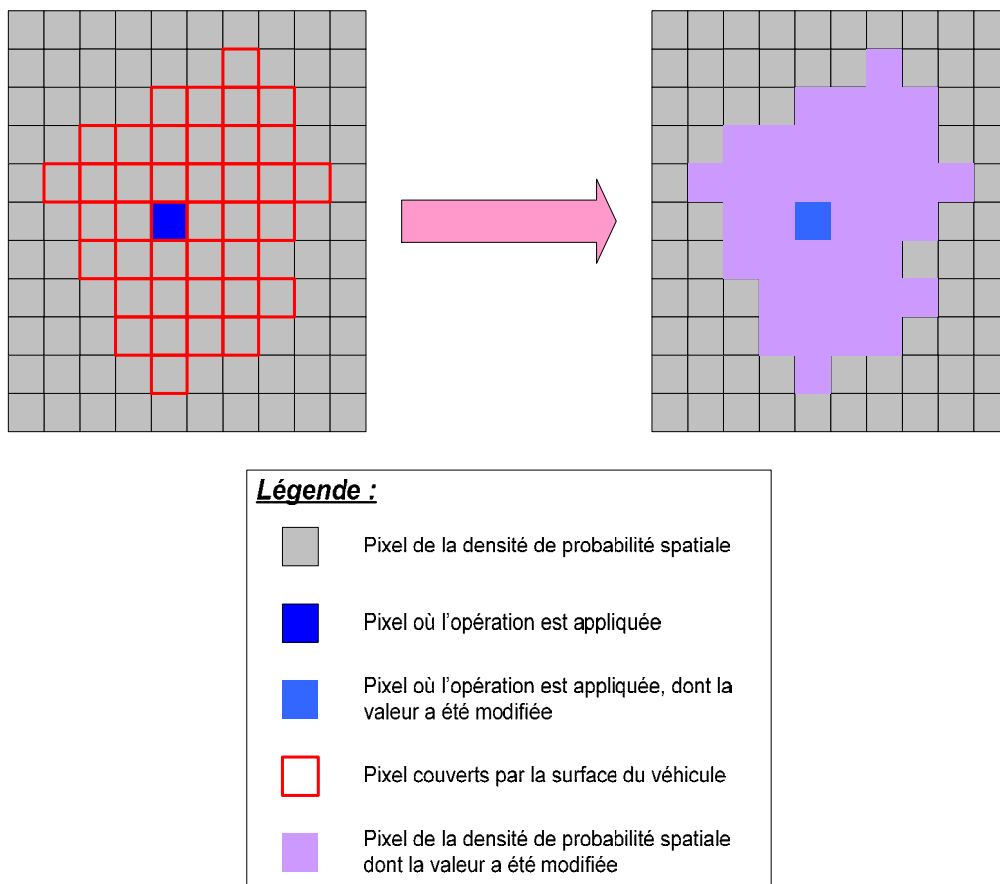


Figure 154 : Principe de la prise en compte de la taille de l'obstacle

La Figure 154 fait apparaître que la valeur de nombreux pixels autour du pixel d'application est modifiée. Cette modification provient de la répartition de la densité de probabilité à toute la zone couverte. Cette répartition apporte une contribution égale à v/N à tous les pixels de la zone (avec v la valeur du pixel traité et N le nombre de pixels de la zone). La valeur du pixel traité est quant à elle ramenée à v/N . Cette procédure permet ainsi de ne pas modifier la somme totale de la densité de probabilité et donc de lui conserver sa nature de densité de probabilité.

On remarque néanmoins qu'une application de cette opération va modifier la densité de probabilité originelle mais aussi qu'elle introduit une erreur lorsqu'un pixel, dont la valeur a déjà été modifiée, est traité. Pour éviter de commettre de telles erreurs on utilise l'opération précédente pour générer une nouvelle distribution de probabilité. Celle-ci a tous ses pixels de valeur nulle lors de l'initialisation de l'opération et à chaque pixel traité, on augmente la valeur des pixels de la zone couverte de v/N . On obtient ainsi une densité de probabilité spatiale qui prend en compte la surface occupée par le véhicule.

VI - 3. 2. 2. Détermination de la surface au sol du véhicule :

On a vu que l'on peut obtenir une carte de densité de probabilité qui prenne en compte la surface occupée par le véhicule. Il reste maintenant à déterminer cette surface et son orientation pour pouvoir appliquer convenablement l'opération proposée précédemment. La détermination de la surface du véhicule se fait en deux phases. On cherche tout d'abord sa forme et sa surface au sol puis on utilise la prédiction de trajectoire pour déterminer sa direction.

L'étape de détermination de la surface au sol du véhicule dépend fortement du véhicule ou de l'obstacle traité. S'il s'agit du véhicule hôte, la détermination est immédiate puisqu'on dispose de sa forme et de sa surface au sol grâce aux données du constructeur. Dans les autres cas on fera confiance aux modules de détection d'obstacles qui déterminent le type des obstacles détectés. On appliquera alors un modèle générique pour chaque type d'obstacle rencontré. On pourra ainsi considérer qu'une voiture occupe une surface au sol délimitée par un rectangle de 4 mètres de long par 1,7 mètre de large. Cet usage de modèles prédéfinis nous permettra aussi de prendre en compte les marges obligatoires à laisser entre le véhicule hôte et certains obstacles (1 mètre pour un vélo en ville par exemple).

La détermination de la direction du véhicule est faite lors de la prédiction de trajectoire. En effet, cette direction est donnée par la tangente à la trajectoire au point considéré. On devra donc effectuer cette détermination lors de la prédiction de trajectoire. On rappelle le calcul effectué précédemment pour déterminer la position atteinte au bout d'un temps t par un point en fonction du rayon de courbure de sa trajectoire et de son accélération :

$$\text{On a alors : } \begin{cases} x_M = R(\sin(\theta + \alpha) - \sin \alpha) \\ y_M = R(\cos \alpha - \cos(\theta + \alpha)) \end{cases}$$

$$\text{avec } R\theta = v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

On rappelle que l'on utilise les notations suivantes :

- O, de coordonnées (x_0, y_0) , le point initial lors de la prédiction.
- C, de coordonnées (x_c, y_c) , le centre de courbure instantanée à l'instant initial.
- R, le rayon de cette courbure, égal à $1/\rho$.
- M, le point atteint après Δt , fin de l'intervalle de prédiction.
- Θ , l'angle orienté (CO, CM)
- V_0 , le vecteur vitesse initial
- α , l'angle orienté (x, V_0)

L'obstacle, lorsqu'il est situé au point M a donc pour direction la droite orientée, orthogonale à (CM), notée (D_M) , de vecteur directeur de coordonnées $(\cos(\Theta + \alpha), \sin(\Theta + \alpha))$.

Pour limiter les calculs on attribuera des directions à chaque possibilité d'action, au travers du couple (ρ, a) , plutôt qu'à chaque pixel. On pourra aussi attribuer ces directions à des blocs de pixels des cartes de densité partielle de probabilité spatiale de façon à augmenter la précision, mais cette opération se fera au prix de calculs plus nombreux. On crée donc à chaque pas de prédiction une carte annexe qui contient la direction de l'obstacle selon la position prédite (voir Figure 155).

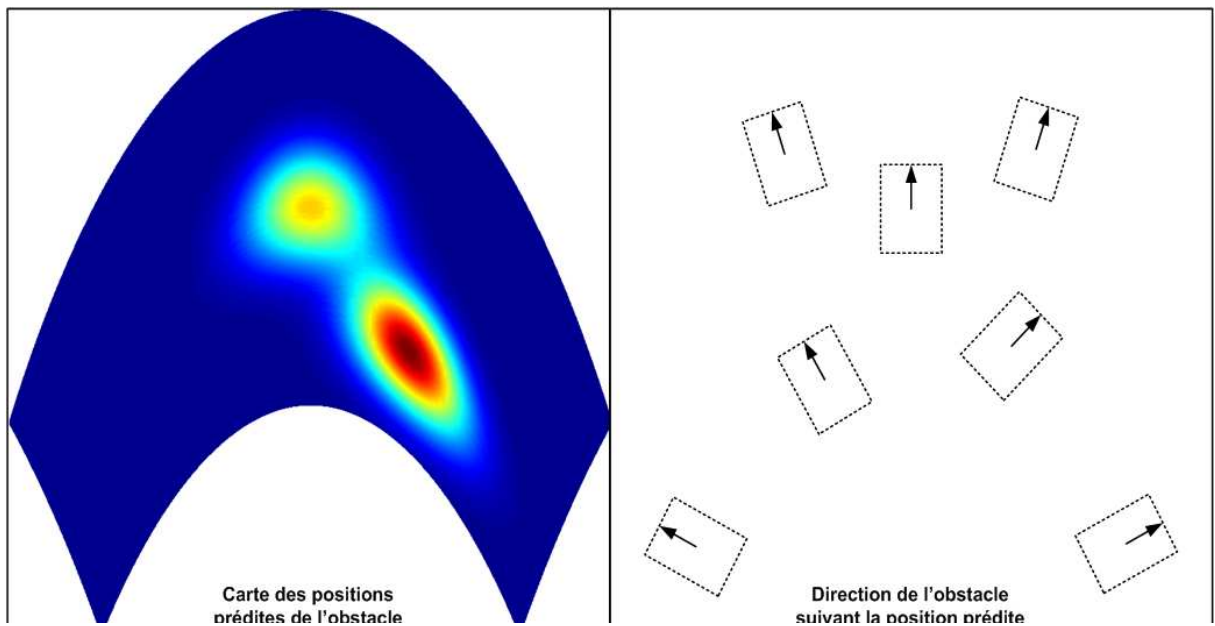


Figure 155 : Schéma du principe de création des cartes annexes de direction

VI - 3. 3. Calcul final du risque de collision :

Une fois que l'on dispose de la carte d'orientation des obstacles et du véhicule hôte et de leurs cartes de densité de probabilité spatiales de présence, on peut calculer le risque global de collision de chaque situation. Ce calcul nous permet dans le même temps de localiser les zones de collisions potentielles ainsi que l'évolution de ces zones dans le temps. Enfin, le calcul du risque de collision nous permet d'obtenir l'évolution temporelle du risque au cours du temps (voir Figure 156), ce qui nous permettra de le pondérer en fonction de sa proximité. En effet, on peut considérer qu'un risque moyen à très court terme pourra être plus important qu'un risque fort à très long terme car ce dernier laisse plus de temps pour réagir et est déterminé de façon moins précise par l'algorithme de calcul.

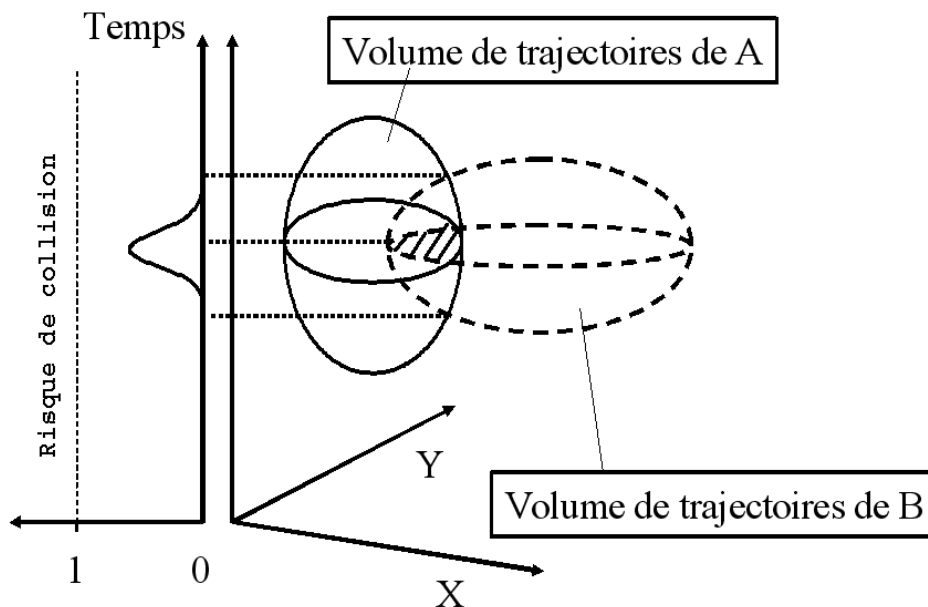


Figure 156 : Schéma de principe du calcul du risque de collision au cours du temps

Le calcul final du risque de collision se fait en prenant en compte les cartes de densités de probabilité étendues obtenues après prise en compte de la taille du véhicule et des obstacles. On calcule le risque en explicitant l'intersection des cartes de densité de probabilité de présence de chaque obstacle avec celle du véhicule hôte. On calcule alors de la même façon que précédemment, les probabilités de présence à l'intersection du véhicule hôte et de l'obstacle, puis on les multiplie pour obtenir le risque de collision avec l'obstacle considéré. On utilise donc la relation (E23) équivalente à (E22) en prenant en compte les ensembles de positions étendues E'_A et E'_B issus de E_A et E_B .

$$R_{AxB}(t) = \left(\sum_{E'_A(t) \cap E'_B(t)} \sum Dp_A(x, y, t).dx.dy \right) \left(\sum_{E'_A(t) \cap E'_B(t)} \sum Dp_B(x, y, t).dx.dy \right)$$

On voit alors que l'on dispose à tout instant de la valeur de la probabilité de collision du véhicule hôte avec chacun des obstacles. Cette valeur nous permet donc d'obtenir l'indice de dangerosité de chaque obstacle, que l'on définit comme l'intégrale temporelle de la fonction risque pondérée par une fonction décroissante du temps (qui permet de prendre en compte la proximité du risque). L'équation (E24) présente le calcul de l'indice de dangerosité associé à un obstacle B en utilisant la fonction exponentielle inverse comme fonction de pondération.

$$D_B = \int_0^{t_{max}} R_{AxB}(u).e^{-u}.du$$

On réalise ainsi l'un des trois modules de calcul de risque du cindynamètre comme présenté dans la Figure 157. L'intégralité des traitements présentés aux chapitres précédents est donc reprise afin d'effectuer le calcul du risque de collision comme on a pu le voir précédemment.

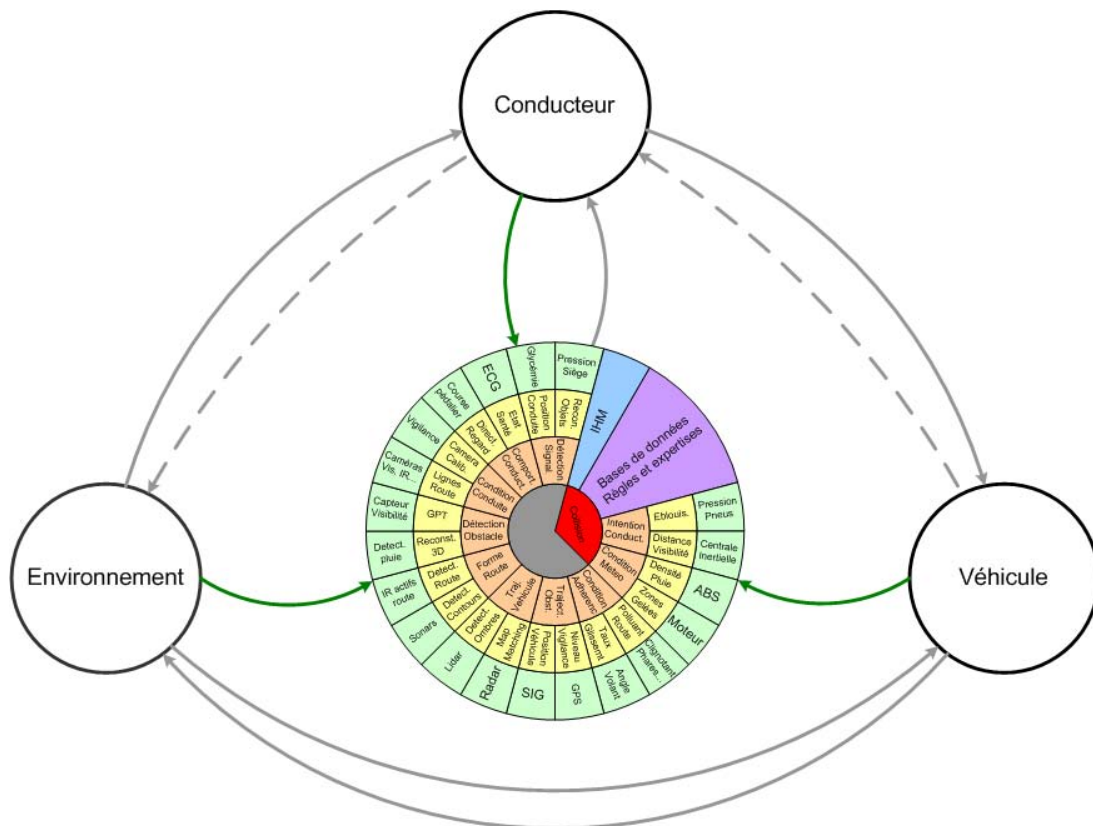


Figure 157 : Module de calcul du risque dans le cindynamètre

VI - 3. 4. Exemple d'application

Van Eslande présente dans [Van Elslande 92] l'exemple d'une situation ayant mené à une collision fronto-arrière dont on reproduit le contexte et le déroulement dans la Figure 158. Nous reprenons cet exemple pour illustrer le fonctionnement du module de calcul du risque de collision du cindynomètre.

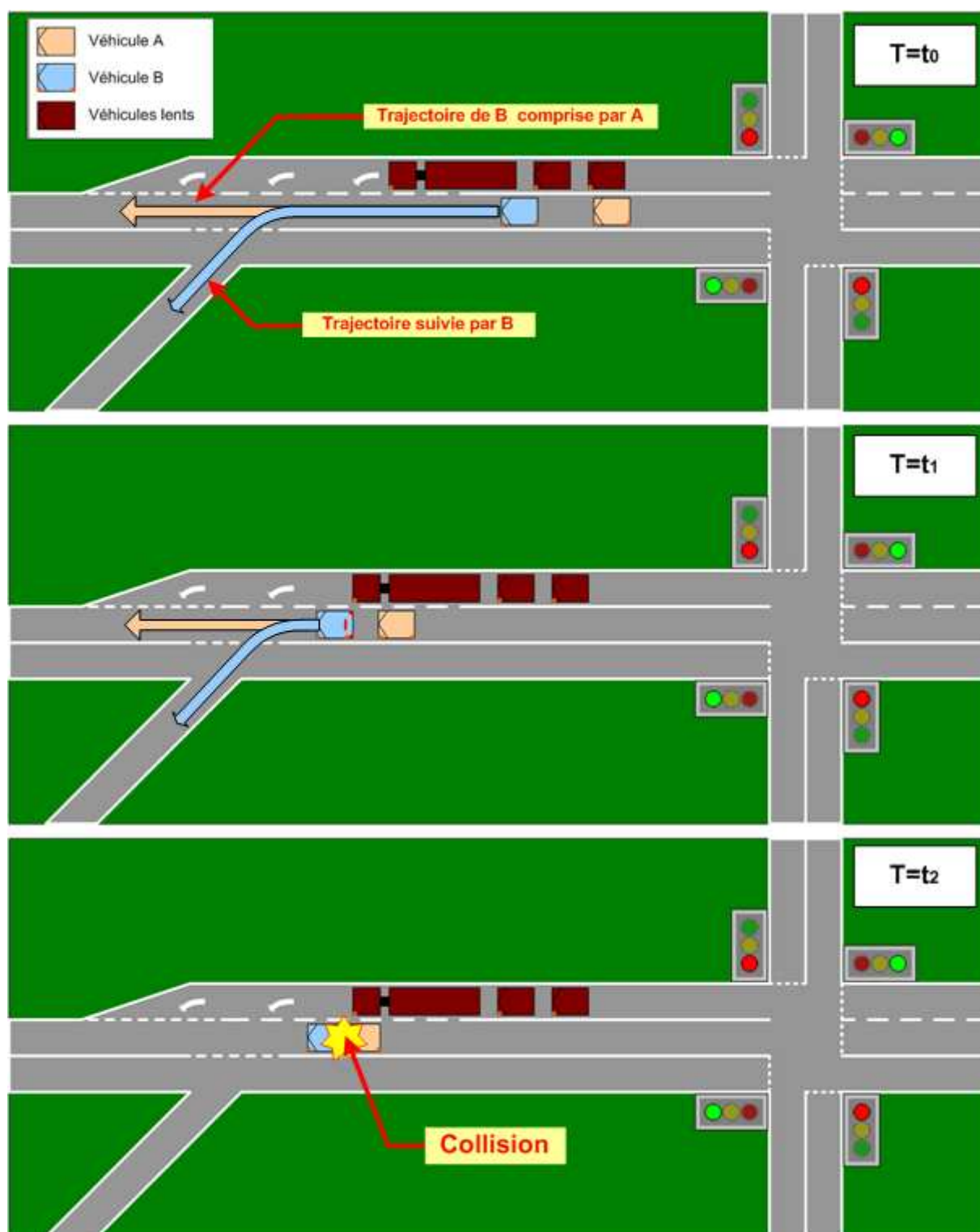


Figure 158 : Plan et évolution de la situation d'accident (d'après [Van Elslande 92])

Van Eslande décrit ainsi cet accident de la façon suivante : "Après un démarrage au feu, le conducteur A se rapproche de la voiture B située sur la voie de gauche et dont le clignotant gauche est activé. Alors que les 2 véhicules dépassent une file plus lente située à droite, le conducteur B, arrivé à hauteur d'une route sécante, se met à freiner. Surpris le conducteur A le percute à l'arrière. A l'issue de l'accident le conducteur A déclarera « **il avait le cligno comme moi pour doubler la file de voitures... jamais j'aurais pensé que le gars allait tourner ici** »."

Cet exemple illustre ainsi les problèmes de compréhension de l'environnement pour un conducteur. En effet dans cet exemple, le conducteur du véhicule A fréquentait régulièrement cette infrastructure mais n'avait jamais rencontré un usager tournant à gauche. Il considérait ainsi la voie empruntée comme une voie de dépassement des véhicules lents sur la droite. Le clignotant activé comme le sien l'a ainsi confirmé dans sa représentation mentale de la situation et il ne l'a donc pas mise en doute. Il est ainsi probable qu'il ait mis un certain temps à réagir au ralentissement puis au freinage du véhicule B, réduisant ainsi ses chances d'éviter l'accident.

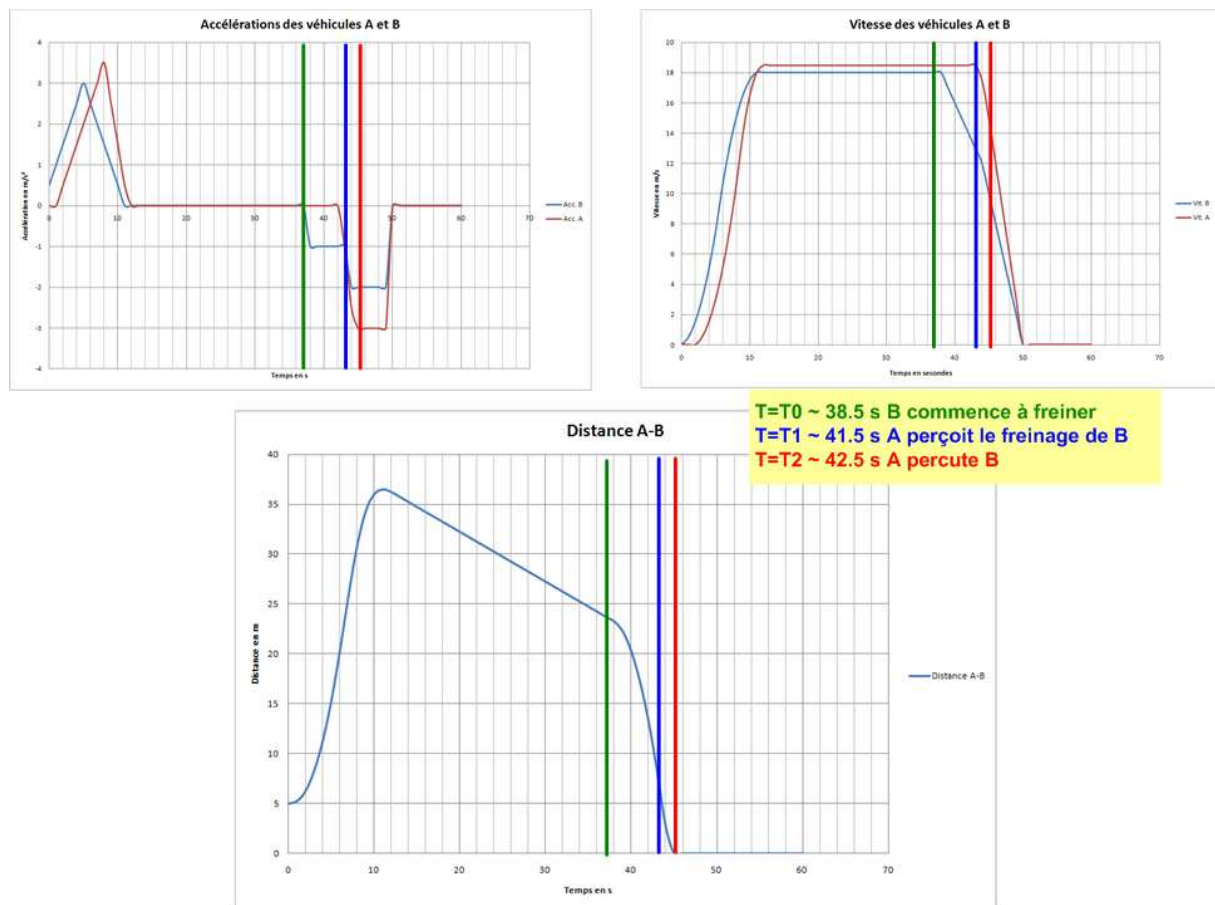


Figure 159 : Simulation de la situation d'accident

La Figure 159 propose ainsi les résultats d'une simulation de cet accident en considérant un temps de réaction du conducteur de A de l'ordre de 3 secondes correspondant au temps de perception de l'invalidité de son modèle. Le cindynamètre appliqué à cet exemple aurait dès le temps t_0 considéré l'hypothèse que B tourne à gauche (le clignotant pouvant aussi bien signifier une intention de doubler qu'une intention de tourner à gauche). L'arrêt de l'accélération puis le ralentissement du véhicule entre t_0 et t_1 auraient alors considérablement renforcé la probabilité de l'hypothèse TOURNE A GAUCHE et réduit d'autant la probabilité que le véhicule B continue sur sa voie. En prenant en compte la réduction de la distance de sécurité entre A et B durant cet intervalle, le cindynamètre aurait alors détecté un fort risque de collision et aurait donc pu alerter à temps le conducteur de A.

VI - 4. Calcul du risque de perte de contrôle du véhicule

La collision avec un obstacle n'est pas le seul risque encouru par le conducteur. En effet, comme le montrent les statistiques (Figure 21), une grande partie des accidents de la route n'impliquent qu'un seul véhicule. La perte de contrôle du véhicule se traduit par l'impossibilité pour le conducteur de maintenir la trajectoire de son véhicule. Cette perte de contrôle peut être induite par de nombreux facteurs, qu'il s'agisse du phénomène d'aquaplaning sur route mouillée ou de l'endormissement du conducteur par exemple. La généralisation de l'ESP devrait permettre de réduire fortement la proportion d'accidents n'impliquant qu'un véhicule mais ne devrait cependant pas supprimer ce problème tant les cas d'endormissements au volant ou de vitesses trop élevées (même pour l'ESP) en virage sont nombreux.

Afin d'évaluer ce risque de perte de contrôle il est donc nécessaire d'évaluer la trajectoire du véhicule et de vérifier que celle-ci correspond à la forme de la route mais aussi à l'adhérence disponible. Le calcul du risque de perte de contrôle du véhicule consiste donc à calculer à la fois le risque de sortie de route pour la trajectoire planifiée mais aussi le risque que celle-ci ne permette pas de garder une adhérence suffisante compte tenu de la carte d'adhérence calculée par le module d'évaluation des conditions météorologiques. Pour ce faire, on va donc utiliser le résultat de la prédiction de la trajectoire du véhicule hôte ainsi que les résultats de l'analyse des conditions météorologiques et la forme de l'infrastructure routière.

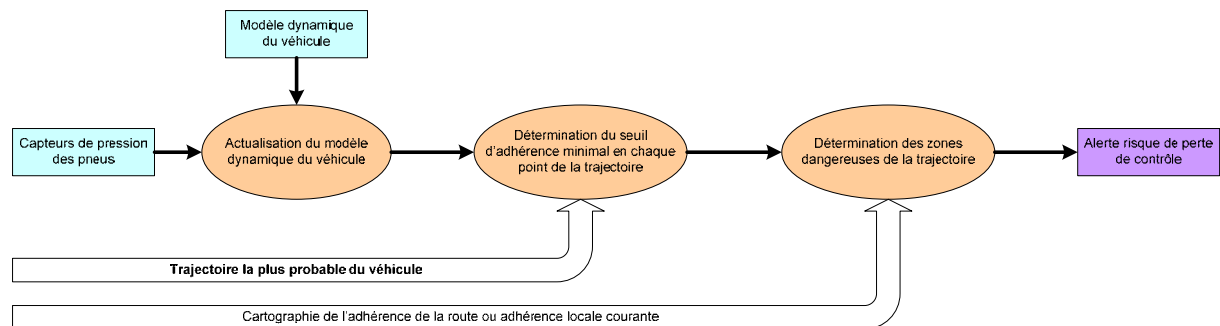


Figure 160 : Calcul du risque de perte de contrôle par perte d'adhérence

La Figure 160 représente l'architecture utilisée pour le calcul du risque de perte de contrôle par perte d'adhérence. Ce module est utilisé pour évaluer la conformité de la ou les trajectoires les plus probables avec l'adhérence de la route et le modèle dynamique du véhicule. On cherche ainsi à vérifier que la trajectoire désirée est atteignable sans perte de contrôle.

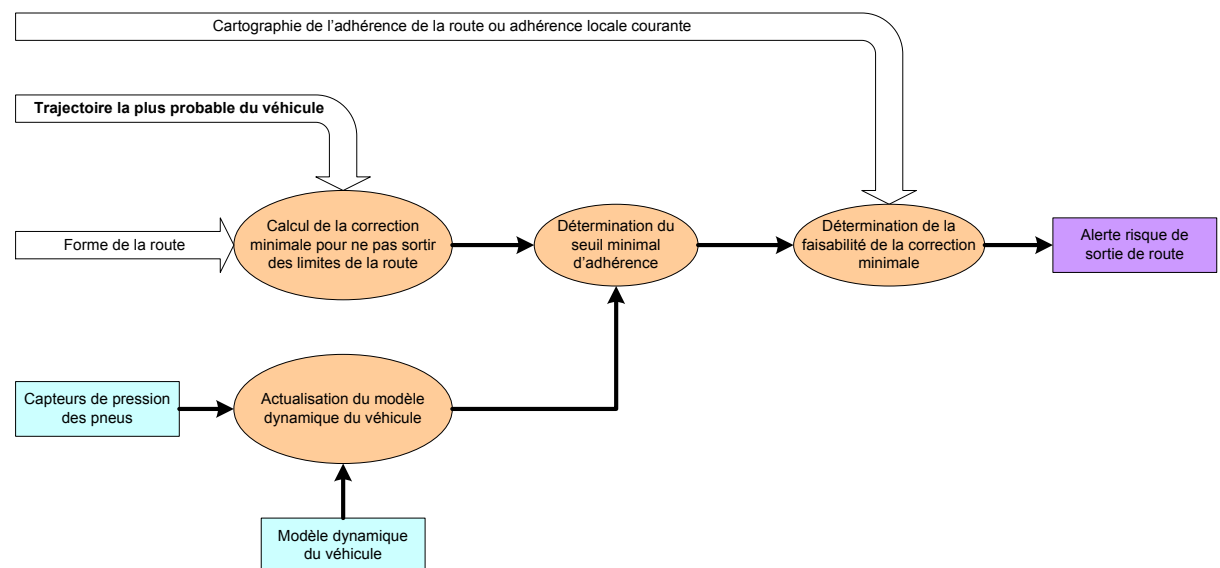


Figure 161 : Calcul du risque de sortie de route

VI - 5. Evaluation du respect de la réglementation

Alors que les risques de collision et de sortie de route constituent des risques physiques, le non-respect de la réglementation constitue un risque moral pour le conducteur qui souhaite respecter le code de la route, conserver les points de son permis et éviter les amendes. Le non respect de la réglementation peut en effet être du à un choix volontaire du conducteur (qui veut arriver plus vite à destination ou prendre plus de risques par exemple) ou par inattention (panneau de signalisation non perçu, prise de conscience défaillante de la vitesse...). Dans le premier cas, avertir le conducteur en cas de non respect de la réglementation est inutile. Dans le deuxième cas par contre l'avertissement prend tout son sens puisqu'il donne au conducteur les informations manquées par inattention et l'incitent ainsi à revenir dans la norme.

Afin d'effectuer cette évaluation le cindynamètre utilise à la fois l'évaluation du comportement du conducteur ainsi que le calcul de la trajectoire la plus probable calculée précédemment. Il nécessite en plus la connaissance de la réglementation locale (signalisation verticale et horizontale) par le biais des informations cartographiques si elles sont disponibles ou par le biais d'informations extraites par le module de traitement de la signalisation. Ces informations, couplées à une base de règles, correspondant au code de la route, sont fusionnées afin de déterminer si la trajectoire actuellement suivie ne va pas violer la réglementation. En cas de violation en cours ou proche, le cindynamètre fournira une "alerte" au conducteur pour l'inciter à corriger sa conduite.

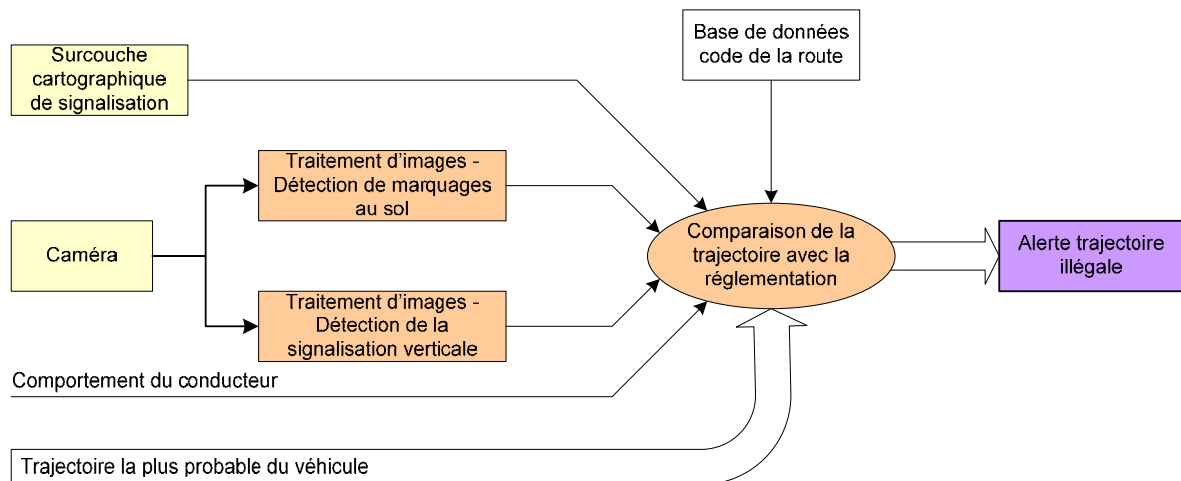


Figure 163 : Schéma de principe du fonctionnement du module d'alerte de trajectoire illégale

La Figure 163 fournit une vue d'ensemble de l'architecture de ce module du cindynamètre alors que la Figure 163 présente le positionnement de ce module de calcul du risque dans l'architecture globale du cindynamètre. Ici encore, le module de calcul du risque de non-respect de la réglementation repose sur l'intégralité des données recueillies par le cindynamètre puisque le comportement du conducteur doit être pris en compte au même titre que les conditions météorologiques (qui influent sur les limitations de vitesse) ou la présence éventuelle d'autres véhicules qui conditionne l'application des règles de priorité.

On remarquera enfin que le module de calcul du risque de non-respect de la réglementation n'utilise que la trajectoire prédite la plus probable pour évaluer le risque. En effet, le cindynamètre doit chercher à limiter au maximum son taux de fausses alarmes pour conserver la confiance du conducteur. Il convient dès lors de ne pas alerter le conducteur du fait qu'il risque de couper une ligne blanche en changeant de fil si l'on n'est pas quasiment sûr qu'il va effectivement réaliser cette action. On préfère ainsi réduire la sensibilité de l'algorithme quitte à alerter le conducteur plus tard afin de conserver sa confiance. On abordera plus en détail ces problèmes d'alerte au Chapitre VII.

De plus, le choix que nous avons fait d'utiliser des fonctions de densité de probabilité denses au lieu d'utiliser une approche Monte Carlo comme [Broadhurst 04] et [Eidehall 07] impose au système une très grande charge de calcul qui est difficilement supportable par les systèmes actuels sans nécessiter de nombreuses heures de calcul (l'utilisation du processeur graphique devrait néanmoins permettre de grandement accélérer les calculs). Ce choix se justifie cependant par le besoin pour le cindynamètre de connaître avec précision les zones dangereuses de la scène afin de permettre une analyse fine du risque. En effet, il est courant en situation de conduite de passer à quelques dizaines de centimètres d'un obstacle. Il est donc nécessaire de pouvoir distinguer une situation de collision d'une telle situation courante.

- Ne pas oublier d'alertes pour éviter là encore une perte de confiance si le conducteur ressent une situation comme dangereuse alors que le système ne l'indique pas
- Ne pas nécessiter d'apprentissage lourd pour faciliter l'adoption du système en donnant au conducteur la possibilité de réagir vite à une alerte sans devoir requérir à un raisonnement cognitif intense. De plus, dans le cas du cindynamètre, un apprentissage important n'aurait pas d'utilité puisque, a priori, les alertes du cindynamètre ne seront pas exécutées souvent et ne laisseront donc pas au conducteur l'opportunité de les réviser régulièrement.
- Ne pas surprendre le conducteur par un message ou une alerte pour éviter les mouvements de surprise dangereux (mouvements du volant ou freinage brusques ...)
- Proposer une interface claire et intuitive pour permettre là encore une réaction rapide
- Ne pas donner trop d'informations pour éviter au conducteur d'avoir à réfléchir pour les interpréter
- Ne pas détourner l'attention du conducteur de sa tâche de conduite trop longtemps pour éviter des accidents supplémentaires dus à l'inattention du conducteur vis-à-vis de sa tâche principale de conduite.
- Ne pas agir sur le contrôle du véhicule puisque le cindynamètre est un système informatif mais aussi pour éviter des accidents dus à la défaillance éventuelle du système.

On peut ainsi traduire ces contraintes par la nécessité pour l'interface du cindynamètre d'être à la fois informative, non agressive, légère (elle ne doit pas surcharger d'informations le conducteur) et rapide (le conducteur doit la comprendre très rapidement pour réagir en conséquence).

Ces contraintes proviennent de l'étude bibliographique de différentes interfaces homme – machine actuellement présentes dans les véhicules telles que les systèmes d'aides à la navigation, l'autoradio, les régulateurs de vitesse (qui défraient d'ailleurs régulièrement la chronique) ou les kits mains-libres pour téléphone portable par exemple.

VII - 2. Prise en compte de l'attention du conducteur :

Le cindynamètre, tel que nous l'avons présenté dans les chapitres précédents prend déjà en compte les aspects humains de la conduite au travers de l'évaluation du comportement du conducteur afin de déterminer le type d'actions qu'il est le plus à même d'effectuer. La prise en compte de la vigilance globale du conducteur, à travers l'évaluation de sa fatigue, permet de plus au cindynamètre de prévenir l'assoupissement du conducteur par le biais d'alarmes adaptées que nous décrirons par la suite.

La prise en compte du conducteur ne s'arrête cependant pas à ces étapes. En effet, le cindynamètre a été conçu comme un système capable d'évaluer les risques extérieurs et qui doit en avertir le conducteur. Afin d'effectuer une alerte efficace, le cindynamètre doit donc être capable d'évaluer la gravité des risques (par la prédiction de la trajectoire du véhicule et de celles des obstacles, la prise en compte de l'infrastructure, ...) mais aussi d'évaluer la criticité de ces risques en fonction de l'attention portée à chacun par le conducteur. En effet, un véhicule ayant une trajectoire accidentogène mais perçu par le conducteur représentera un risque moins critique que le véhicule arrivant au même moment dans l'angle mort alors que le conducteur se prépare à déboîter pour éviter le premier véhicule.

Il apparaît donc essentiel d'utiliser la direction d'attention du conducteur afin de mieux prioriser les différents risques en fonction du danger qu'ils représentent mais aussi de leur prise en compte éventuelle par le conducteur. Dans cette optique nous pondérerons les dangers représentés par les différents obstacles par la prise en compte de ceux-ci.

Cette pondération se fait par le biais d'une fonction croissante du temps qui diminuera le danger représenté par un obstacle observé récemment (à temps faible donc) par rapport au danger que représente un obstacle observé plus longtemps auparavant (à temps plus fort). Evidemment, tout obstacle représentant un danger et qui n'aurait jamais été observé par le conducteur (temps infini donc) sera ainsi beaucoup plus prioritaire (à danger similaire avant pondération). On note néanmoins que l'observation d'un obstacle par le conducteur ne signifie pas forcément la compréhension de sa trajectoire et encore moins la compréhension du danger représenté. Il est donc essentiel que la pondération effectuée soit bornée afin de ne pas privilégier trop des dangers moyens et lointains dans le temps représentés par des obstacles non détectés par rapport à des dangers proches et intenses observés récemment (mais pas forcément correctement interprété comme nous l'avons vu précédemment).

Cette approche s'applique de la même façon aux risques de sorties de route (en analysant l'attention portée par le conducteur aux surfaces glissantes et autres flaques détectées par le cindynamètre par exemple) et au respect de la réglementation (en analysant l'attention portée par le conducteur aux panneaux de signalisation ainsi qu'à la signalisation horizontale).

Le danger représenté par un obstacle (mais aussi par un risque de sortie de route par exemple) est ainsi calculé en fonction de sa probabilité d'occurrence, du délai restant avant cette occurrence mais aussi de l'attention que lui fournit le conducteur. Cette prise en compte de l'attention du conducteur s'avère essentielle pour l'efficacité de l'interface homme-machine du cindynamètre car elle permet de vérifier la bonne compréhension des informations transmises par le cindynamètre (le danger associé à une alarme émise doit logiquement baisser si le conducteur la prend en compte) mais aussi d'éviter de lasser le conducteur en l'alarmant sur des dangers déjà pris en compte. On aide ainsi à respecter une partie des contraintes déterminant l'interface homme-machine utilisée en évaluant l'attention du conducteur.

VII - 3. Choix technologiques :

Comme nous l'avons expliqué précédemment l'interface homme – machine du cindynamètre doit permettre d'avertir le conducteur d'un danger et lui donner des conseils pour éviter ce danger potentiel. Pour ce faire, l'interface doit être à la fois très rapidement informative mais ne doit pas surcharger d'informations le conducteur. De plus, elle ne doit pas monopoliser l'attention de ce dernier en fournissant incessamment des conseils, mais elle doit être capable de capturer son attention très rapidement. Ces différentes contraintes, très fortes mais nécessaires pour garantir l'efficacité du système sans risquer d'augmenter le danger, nous fournissent des indications claires sur les différents types d'IHM à utiliser ou à ne pas utiliser. Nous basons cette étude des différentes interfaces sur une étude américaine menée sur le thème de l'évitement des collisions sur intersection [DOT 00].

VII - 3. 1. Interfaces haptiques

L'utilisation d'interfaces haptiques³¹ offre l'avantage de la rapidité de perception par l'être humain des avertissements ainsi effectués. En effet, l'information de toucher est l'une des plus rapidement traitée par le cerveau humain. Néanmoins, comme on peut s'en douter, l'utilisation d'une interface haptique ne permet pas la transmission d'une information riche sans un apprentissage lourd.

Cette interface serait donc limitée à l'avertissement en cas de franchissement involontaire d'une bande latérale sur la route (ce type d'alerte est actuellement utilisé par Citroën sur son système [AFIL] par exemple) ou en cas de vitesse excessive par un durcissement de la pédale (système déjà proposé pour certains limiteurs de vitesse par exemple).

R. Amalberti a proposé l'utilisation d'une interface haptique placée dans le siège du conducteur afin de lui donner une sensation de danger lorsque le conducteur passe trop vite dans un virage. En augmentant, l'inclinaison du conducteur (c'est-à-dire le roulis ressenti) on accentue l'effet de l'accélération latérale lui donnant ainsi une impression de plus grande prise de risques et l'incitant donc à réduire sa vitesse en virage. Cette utilisation de l'interface haptique permet ainsi de réaliser une fonction du cindynamètre. On peut néanmoins se poser la question de l'acceptabilité du système par un conducteur dans son véhicule.

³¹ Interfaces utilisant le sens du toucher pour transmettre l'information

Nous ne connaissons pas assez l'influence qu'aurait ce type d'interface pour recommander son utilisation. De plus, nous avons volontairement limité la portée du cindynamètre en lui interdisant la prise de contrôle d'un ou plusieurs des actionneurs du système afin d'éviter tout risque d'accident du à une défaillance du système et les problèmes de responsabilité qui en découlent.

L'utilisation d'une interface haptique (hormis les interfaces existantes que nous avons citées évidemment) ne nous apparaît donc pas des plus utiles dans un premier temps compte tenu des limitations inhérentes à cette interface, du manque d'expérience sur le vécu des usagers de telles interfaces et de la complexité de réalisation de celles-ci.

VII - 3. 2. Interfaces auditives :

Les interfaces auditives offrent un bon compromis entre rapidité de traitement et richesse de l'information transportée. En effet, ces interfaces permettent l'émission de signaux peu informatifs (un simple son par exemple) qui seront traités très rapidement par un humain mais elles permettent aussi, par le biais de système de synthèse de la parole de fournir des informations beaucoup plus détaillées (par exemple une phrase ou une indication de direction si l'on prend l'exemple des systèmes de navigation embarqués) qui seront traitées un peu moins rapidement.

Un second avantage de ce type d'interfaces provient de la possibilité pour l'être humain de localiser une source sonore grâce à l'architecture particulière de l'oreille. Il est ainsi possible en émettant un bruit depuis une source sonore d'attirer l'attention de la personne vers cette source. Cette possibilité est d'autant plus intéressante qu'avec le développement des jeux vidéo en 3D et des systèmes "home cinéma" d'énormes progrès ont été fait en matière de création de sources sonores virtuelles à partir de quelques hauts parleurs. Il sera donc possible, à partir du système audio du véhicule, de générer des alertes localisées pour attirer l'attention du conducteur dans une direction donnée correspondant à une source de danger par exemple.

On nuancera cependant légèrement ce propos car les signaux sonores ne sont pas adaptés aux personnes malentendantes et risquent d'être mal perçus dans une ambiance sonore très chargée. De plus certaines personnes ne parviennent pas à localiser correctement les sources sonores. Ils peuvent aussi s'avérer très ennuyeux pour le conducteur et ses passagers si les messages sont trop nombreux (comme ce pouvait être le cas sur les premiers ordinateurs de bord d'automobile par exemple). Enfin, le déclenchement d'un signal sonore ou d'un message préenregistré peut entraîner une réaction de surprise du conducteur risquant ainsi de lui faire perdre le contrôle du véhicule.

Néanmoins, malgré ces nombreux problèmes, l'interface sonore présente certains points qui la rendent intéressante dans le cas du cindynamètre. Nous utiliserons donc cette interface pour le cindynamètre tout en gardant à l'esprit les différentes limitations que nous venons de citer.

VII - 3. 3. Interfaces visuelles :

Les interfaces visuelles offrent une palette immense d'informations transmissibles mais nécessitent pour cela une plus forte charge cognitive que les autres interfaces. En effet, la compréhension d'une image ou d'un texte requiert une attention beaucoup plus élevée que la compréhension d'un message sonore. Bien sur, l'utilisation de simples voyants requiert une charge moindre pour la compréhension, néanmoins la détection de ces signaux (de même que l'apparition d'un texte sur un écran que l'on ne regarde pas) peut nécessiter quelques secondes, voire ne pas être perçue, si l'attention du conducteur n'est pas fixée sur cette zone.

En plus de cette lenteur à la détection et à la compréhension, les interfaces visuelles requièrent que le conducteur détourne son regard vers l'interface afin de la comprendre (contrairement aux interfaces haptiques et auditives). Compte tenu de l'importance de la prise d'informations visuelles dans la relation conducteur – environnement de la relation tripartite de conduite, un tel détournement de l'attention apparaît dangereux.

L'utilisation d'une interface visuelle pour le cindynamètre apparaît ainsi comme la plus fortement contrainte puisqu'elle devrait informer tout en ne prenant pas l'attention du conducteur. Pour résoudre cette équation a priori insoluble nous proposons un compromis basé sur l'utilisation de l'interface visuelle pour fournir des informations plus détaillées lorsqu'une alarme sonore est émise. L'interface visuelle sera ainsi utilisée comme une annexe de l'interface auditive. L'interface auditive sera chargée des alertes en cas de situation très dangereuse alors que l'interface visuelle donnera une vue d'ensemble de la situation en y localisant les dangers et en fournissant dans le même temps une vue de l'environnement pour permettre au conducteur de garder ses capacités de réaction.

Nous avons retenu pour la réalisation de cette interface deux solutions classiques :

- Un écran de visualisation placé dans le tableau de bord à la façon des systèmes d'aide à la navigation. On préférera alors avoir cet écran placé le moins loin possible de l'axe de conduite du conducteur afin de lui minimiser les déplacements de son regard.
- Un système de visualisation tête haute (HUD pour Head Up Display) qui à l'avantage de ne nécessiter qu'une adaptation de la focalisation du regard sur le pare-brise, permettant ainsi de minimiser le déplacement d'attention.

Le premier système offre l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre (la plupart des véhicules de nouvelle génération sont équipés de tels écrans) et peu coûteux. Néanmoins, cette solution force le conducteur à quitter la route des yeux lorsqu'il veut prendre des informations or la compréhension des conseils prodigués par le cindynamètre demande une concentration de l'attention qui, comme il a été montré dans la littérature ([Ayama 00], [Summala 98]), entraîne une diminution du champ effectif de perception et une augmentation du temps de réaction pouvant parfois atteindre plusieurs secondes. On notera cependant que dans le cas du cindynamètre le conducteur perçoit malgré tout des informations sur la situation de conduite par le biais de cette interface visuelle (là où les systèmes étudiés par Ayama et Summala n'en fournissaient aucune).

Au contraire, un système de visualisation tête haute permet de garder les yeux en direction de la route. Ainsi, même si l'attention doit être focalisée, la réduction du champ de vision n'aura que peu de conséquences. Cet avantage se paie néanmoins, tant au niveau du prix du système que de la complexité de sa mise en place. En effet, les dispositifs de visée tête haute sont principalement destinés aux systèmes militaires. Quelques adaptations ont été réalisées pour des véhicules récents (tel le Peugeot 3008), mais l'utilisation d'un tel système reste très coûteuse et présente un encombrement relativement important. Enfin, il est nécessaire d'adapter le système de visualisation à la vue du conducteur pour obtenir la meilleure efficacité possible.

Il faut finalement noter que l'utilisation d'un écran ou d'une visualisation tête haute ne sera utile que si ces systèmes permettent d'afficher les informations requises même avec une forte illumination parasite extérieure (soleil de face par exemple).

VII - 3. 4. Synthèse :

Nous avons rapidement vu les avantages et les inconvénients des différents systèmes d'interfaces qui ont été envisagés. Compte tenu des limitations imposées au système, nous avons immédiatement mis de côté les systèmes haptiques qui présentent un trop gros danger d'interférence avec une manœuvre du conducteur. De plus, on peut s'attendre à ce que les interfaces auditives et visuelles se complètent relativement bien, les interfaces sonores étant beaucoup plus rapides à comprendre alors que les interfaces visuelles peuvent fournir beaucoup plus d'informations en moins de temps.

Nous sommes donc amenés à privilégier une interface qui regrouperait les avantages des interfaces visuelles et auditives. Ceci pourra être fait en utilisant ces deux interfaces de manières différentes. Les alertes d'hypovigilance et de danger imminent pourront être faites de façon sonore de manière à capturer très rapidement l'attention du conducteur et à lui faire localiser immédiatement le danger.

Les informations secondaires non urgentes (trajectoire illégale, affichage de la signalisation courante, représentation de l'environnement proche, ...) seront affichées par l'interface visuelle de même que les informations complémentaires (position des dangers dans l'environnement, manœuvre d'évitement éventuellement conseillée, ...) aux alertes données par l'interface sonore.

La limitation de l'interface sonore aux seules alertes de dangers imminents permettra de limiter au maximum l'utilisation de cette interface qui présente a priori le plus fort risque de lassitude ou de rejet de la part du conducteur.

Au niveau de la réalisation technique, l'interface homme – machine du cindynamètre sera donc composée de deux types d'interfaces :

- un système sonore tridimensionnel capable de créer une source spatiale virtuelle et de réaliser la synthèse vocale permettant de donner des informations supplémentaires
- un système visuel, préférablement de type HUD capable de représenter l'information disponible sur l'environnement proche du véhicule mais aussi de reproduire "ce que voit" le conducteur (c'est-à-dire d'afficher l'image vidéo de ce qui se passe à l'avant du véhicule par exemple) de façon à conserver la vigilance du conducteur même lorsqu'il observe les informations du cindynamètre.

VII - 4. Réalisation technique proposée

La réalisation de l'IHM du cindynamètre passe comme nous l'avons vu par la mise en place d'une interface mixte sonore et visuelle dont la partie sonore est utilisée pour un avertissement efficace car rapidement traité par le conducteur et la partie visuelle pour une information beaucoup plus riche.

Compte tenu des risques encourus pendant la phase de conduite, l'IHM du cindynamètre doit au moins permettre la compréhension des éléments suivants :

- Position du véhicule sur la route
- Position des différents obstacles par rapport au véhicule
- Indication des trajectoires futures des différents obstacles
- Indice de dangerosité des différents obstacles
- Alerte en cas de risque de sortie de la route
- Alerte pour les obstacles très dangereux et localisation des sources de danger
- Alerte en cas de somnolence

D'autres informations (le respect de la signalisation par exemple) pourront aussi être fournies mais constituent un objectif secondaire du cindynamètre, le but premier étant avant tout de limiter le risque d'accident.

Les objectifs de représentation des informations fixés précédemment permettent de déduire les fonctions devant être réalisées par chacun des modules de l'IHM.

VII - 4. 1. Interface sonore :

L'interface auditive doit permettre au conducteur, comme nous l'avons expliqué précédemment, de comprendre rapidement les alertes. Son rôle est donc réduit à l'alerte du conducteur en vue d'attirer son attention sur un risque particulier. Ceci nous permet de fixer le "cahier des charges" suivant pour sa réalisation :

- Possibilité de localiser la source virtuelle sonore autour du conducteur
- Alerte vocale ou sonore en fonction de la nature du danger
- Son différent en fonction du type d'alerte afin d'aider à sa compréhension
- Intensité sonore de l'alerte dépendante du niveau de danger mais aussi du niveau sonore ambiant

La création d'une source virtuelle sonore autour du conducteur permettra comme expliqué précédemment d'attirer son attention intuitivement dans la direction de la source. Par exemple dans le cas où le conducteur souhaiterait changer de file alors qu'un autre véhicule est dans son angle mort, le système générera une alerte permettant au conducteur de comprendre le danger courant.

Cette alerte sonore pourrait typiquement être le bruit du moteur d'un véhicule émis depuis une source virtuelle dans l'angle mort. Une telle alerte permet ainsi de ne pas avoir à attirer le regard du conducteur dans cette direction puisque la compréhension de la relation (bruit de moteur = présence d'un véhicule) est intuitive. Elle apparaît ainsi comme naturelle et non comme provenant du système.

L'utilisation d'une alerte vocale semble intéressante dans les cas où une simple alerte sonore ne suffirait pas. Ainsi, en cas d'assoupissement du conducteur, émettre un son n'est d'aucun intérêt et au contraire risquerait de provoquer une réaction de surprise de la part du conducteur. L'augmentation du volume sonore de l'autoradio offre une bonne alternative mais elle nécessite que celui-ci soit déjà en marche (au risque sinon de provoquer le même type de réaction que face à un son). L'utilisation d'une interface vocale invitant le conducteur à se reposer offre la possibilité d'expliquer la source de l'alerte ce qui peut permettre de réduire la surprise du conducteur. L'utilisation combinée de la bande de roulement virtuelle et de l'alerte vocale apparaît dans cet exemple comme la plus efficace.

La différenciation de l'alerte émise en fonction du danger apparaît, à la vue des exemples précédents, comme évidente puisqu'il est nécessaire de donner une information compréhensible au conducteur et non un unique "bip" l'avertissant d'un danger sans plus de précision. De même la modulation de l'intensité de l'alerte est nécessaire pour bien faire comprendre au conducteur l'intensité du ou des dangers le menaçant.

Un très grand nombre de logiciels permettent actuellement, à partir d'au moins deux haut-parleurs de générer une localisation virtuelle des sons. Ces techniques très utilisées au cinéma et dans les jeux vidéo permettent, relativement facilement, de donner à l'auditeur une impression d'immersion dans l'action. Nous utiliserons ainsi de tels logiciels (l'utilisation des fonctions sonores de DirectX permet la réalisation rapide de telles interfaces sonores tridimensionnelles) afin de réaliser l'interface sonore du cindynamètre.

VII - 4. 2. Interface graphique

L'interface graphique du cindynamètre doit donner au conducteur davantage d'informations sur la situation en cours que ce qu'autorise l'interface sonore. La quantité d'informations ainsi présentée doit cependant être suffisamment limitée pour permettre au conducteur de la traiter rapidement. Nous avons ainsi fixé le "cahier des charges" de cette interface à partir de cette contrainte principale :

- Vue de l'environnement sous forme d'une vue de haut centrée sur le véhicule et orientée dans la direction de celui-ci. L'identification du véhicule hôte s'en trouve ainsi extrêmement simplifiée de même que la perception de la position des différents obstacles et sources de danger autour du véhicule.
- Représentation des obstacles par des formes géométriques facilement reconnaissables (des rectangles pour les véhicules, des cercles pour les piétons par exemple) afin de faciliter la compréhension.
- Coloration des obstacles conforme à leur coloration réelle si disponible (c'est-à-dire si les obstacles ont été vus par une caméra) afin de faciliter l'identification des sources de danger.
- Encadrement des obstacles dangereux par un cadre clignotant en cas de grave danger de collision afin d'attirer l'attention sur l'obstacle détecté.
- Si disponible, affichage de l'image vidéo de l'obstacle dangereux encadré en rouge (il faut pour cela disposer d'une caméra voyant l'obstacle) afin d'aider encore l'identification du danger.
- Affichage de la vue avant pour permettre au conducteur de contrôler ce qui se passe devant lui tout en regardant l'interface graphique.
- Affichage du conseil à suivre par le biais de sigles facilement compréhensibles (panneau stop pour inciter à s'arrêter par exemple).
- Affichage de la marge de sécurité (en distance) en cas de suivi d'un véhicule.

On n'a détaillé ici que les principales méthodes de représentation des dangers par cette interface graphique. En effet, selon le type de danger d'autres affichages pourraient être utiles. On pourrait ainsi faire clignoter en rouge le bas côté de la route pour indiquer un risque de sortie de route ou afficher un panneau route glissante en cas de risque de perte d'adhérence.

La Figure 166 donne un exemple de l'interface du cindynamètre dans le cas d'un véhicule venant de sortir de la route et s'appêtant à repartir alors qu'un véhicule arrive dans son angle mort. Le cindynamètre indique donc le danger représenté par le véhicule venant de l'arrière et conseille de s'arrêter. Dans cet exemple nous ne disposons pas de caméra voyant à ce moment-là le véhicule.

VII - 5. Contrôle par le conducteur :

Le cindynamètre doit être capable de s'adapter au conducteur afin que celui-ci accepte au mieux ces conseils et alertes. Nous avons proposé précédemment des modes d'information qui essaient d'éviter l'aliénation du conducteur. Cependant, le conducteur face à un système qu'il ne peut contrôler risque de ne pas accepter pleinement ses informations.

Pour pallier ce problème nous proposons de permettre au conducteur d'adapter le niveau d'alerte du cindynamètre par le biais d'une interface simple de rétroaction (telle qu'un curseur à déplacer dans l'interface graphique par exemple). Le conducteur pourrait alors indiquer au système, s'il le souhaite, qu'une alerte fût utile, inutile ou manquante. De cette façon le cindynamètre pourra évaluer le niveau de danger ressenti par le conducteur a posteriori et ainsi mieux adapter ses seuils d'alerte. Une telle interface permettra de plus d'adapter le cindynamètre au type de conduite souhaitée par le conducteur. Enfin, cette interface permet probablement une meilleure acceptation a priori du système par le conducteur, celui-ci sachant qu'il pourra régler le système à sa guise.

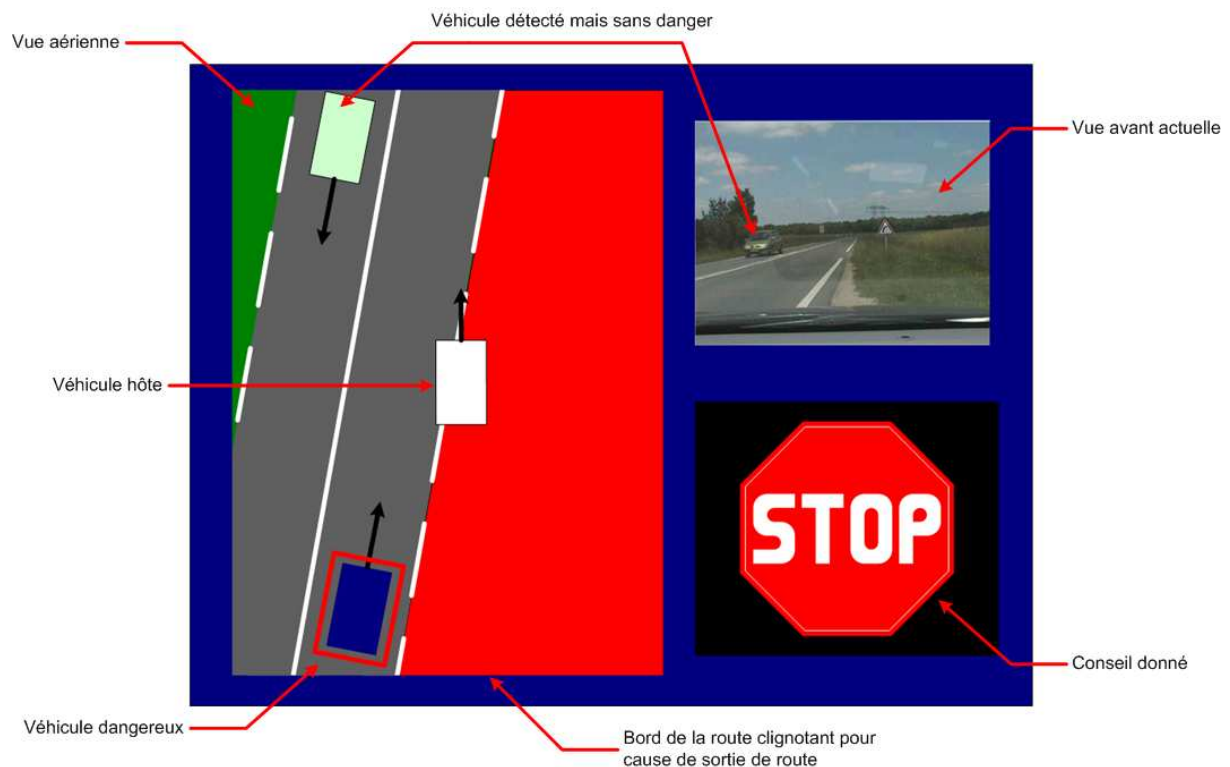


Figure 166 : Exemple d'affichage de l'IHM du cindynamètre

VII - 6. Synthèse :

Les choix que nous avons effectués pour la définition de l'IHM du cindynamètre sont basés sur le respect des contraintes que nous avons évoquées précédemment à savoir interface informative, non agressive, légère et rapide donc aisément compréhensible. Ils visent ainsi à permettre une alerte efficace du conducteur en cas de risque avéré de collision, de perte de contrôle du véhicule, de sortie de route ou de non-respect de la réglementation.

La prise en compte de l'attention du conducteur aux différentes zones de l'espace (qu'elles soient visibles ou masquées pour lui) permet au cindynamètre d'évaluer la criticité de ces risques. C'est en fonction de cette criticité que le cindynamètre prend la décision d'avertir ou non le conducteur. Ce mode d'avertissement permet au cindynamètre de ne pas avertir le conducteur d'un risque qu'il a déjà vu et pris en compte mais plutôt des risques qu'il n'a pas perçus. Bien évidemment, le cindynamètre avertira le conducteur des dangers trop importants de façon à s'assurer qu'il les a bien pris en compte et pas seulement perçus. On réduit ainsi le risque pour le cindynamètre de ne pas alerter le conducteur en cas de danger avéré mais aussi le risque d'alerter le conducteur trop souvent.

Les choix technologiques effectués devraient nous permettre de respecter les contraintes liées à l'IHM mais cette supposition n'est basée que sur notre ressenti. Une campagne de tests de l'IHM du cindynamètre serait nécessaire pour valider ces choix, déceler les problèmes éventuels et proposer des contre-mesures adaptées. Néanmoins une telle campagne ne sera possible qu'avec l'implémentation du cindynamètre dans un véhicule ou dans un simulateur de conduite automobile.

L'utilisation d'un simulateur de conduite pour les premiers essais du système nous apparaît d'ailleurs comme la meilleure solution, et ce malgré son coût, du fait de la possibilité de confronter le système et le conducteur dans des situations dangereuses, sans risques pour le conducteur. Cette solution ne sera cependant viable que dans une phase préliminaire de mise au point de l'interface homme – machine. En effet, seule une utilisation journalière du système permettra de tirer des conclusions quant à l'ergonomie du système pour le conducteur.

Enfin, les mécanismes de rétroaction nécessaires pour rendre possible un contrôle du système par le conducteur devront être définis plus clairement. La solution actuellement envisagée consistant à contrôler la valeur des seuils d'alerte pour chaque danger évalué pourrait en effet s'avérer trop restrictive. Seule une étude comparative de différents mécanismes d'interaction et de contrôle sur plusieurs conducteurs permettra de clairement définir ces mécanismes de rétroaction.

CHAPITRE VIII – CONCLUSIONS, CRITIQUES ET PERSPECTIVES

Au travers de ce document, nous avons présenté notre vision d'un système d'aide à la conduite des systèmes à risques qui permettrait de réduire encore le nombre d'accidents de ces systèmes en offrant aux opérateurs une vision d'ensemble de l'état de la situation. Nous avons ensuite présenté notre idée de l'application à la conduite automobile d'un tel système d'aide ainsi que les développements nécessaires à sa réalisation. Nous avons alors présenté les développements correspondant que nous avons effectués ainsi que ceux restant à faire pour l'obtention d'un système fonctionnel global. Nous proposons maintenant une brève synthèse de ce travail afin de rappeler au lecteur les différents points présentés, une analyse des avantages d'un tel système mais aussi de ses limitations. Nous présenterons finalement les actions à mener à plus ou moins court terme pour obtenir le résultat visé.

VIII - 1. Synthèse :

L'utilisation de systèmes d'aides à la conduite destinés à faciliter le travail des opérateurs de systèmes à risques a offert à beaucoup de domaines industriels de grandes avancées en termes de sécurité. Cependant, la plupart de ces gains de sécurité ont été utilisés pour augmenter la rentabilité des systèmes en les faisant travailler plus près de leurs limites de sécurité et de fiabilité. Ceci explique d'ailleurs la stagnation actuelle du niveau de risque des systèmes industriels les plus sûrs (aviation civile, nucléaire) à un niveau d'accident de l'ordre de 10^{-6} mais aussi l'augmentation de l'importance relative de ces accidents³².

En effet, l'utilisation d'aides à la conduite et de procédures plus strictes a entraîné un sentiment de sécurité trompeur chez les opérateurs ainsi qu'une confiance excessive dans leur capacité à rattraper le système (de leur propre chef ou grâce aux aides existantes) qui les ont incité à augmenter encore leur prise de risques (quitte à enfreindre certaines règles pour faciliter leur tâche ou respecter les objectifs) afin d'obtenir la performance optimale. Paradoxalement, c'est donc l'amélioration des aides à la conduite et des procédures qui, en créant cette confiance excessive dans la sécurité du système, a créé les conditions nécessaires au développement des catastrophes.

Partant de cette constatation nous avons donc proposé, pour pallier ce problème, un nouveau type d'aide à la conduite, basée sur la transmission d'informations sur le niveau de risques et sur les sources de danger au conducteur, que nous avons baptisée **cindynamètre**. Cette aide a pour but d'inciter le ou les opérateurs du système à risques à réduire leur prise de risques, afin de garder une marge de sécurité convenable pour la conduite du système.

L'étude du fonctionnement du raisonnement humain montre que l'opérateur raisonne sur la base d'une prise de risque pour réduire la charge cognitive qu'il doit utiliser pour mener à bien une tâche. Cette prise de risques se fait sur la base de ce que le conducteur a perçu et compris de la situation courante du système. Or cette perception et cette compréhension du système sont, comme nous l'avons vu, sujettes à de nombreuses erreurs potentielles (erreurs d'inattention, faiblesse des contrôles, règles inadaptées à la situation, ...). Le rôle du cindynamètre est donc de donner des informations complémentaires à l'opérateur sur l'état du système, informations qu'il n'aurait pas captées ou mal comprises autrement. De ce fait l'opérateur dispose d'informations redondantes lui permettant de prendre des décisions plus adaptées à l'état du système.

Nous avons alors proposé, afin de réaliser cette aide, une architecture globale de cindynamètre permettant de prendre en compte les trois acteurs principaux de la conduite d'un système à risques, à savoir le conducteur, le système et leur environnement. Cette architecture, que l'on rappelle dans la Figure 167, est basée sur la perception de l'état de ces trois acteurs et de leurs interactions et la fusion des données ainsi recueillies afin d'informer au mieux le ou les opérateurs.

³² Néanmoins, le cindynamètre est plutôt destiné selon nous à des systèmes industriels qui ne sont pas encore à ce niveau de sécurité, comme l'industrie chimique (10^{-3} à 10^{-4})

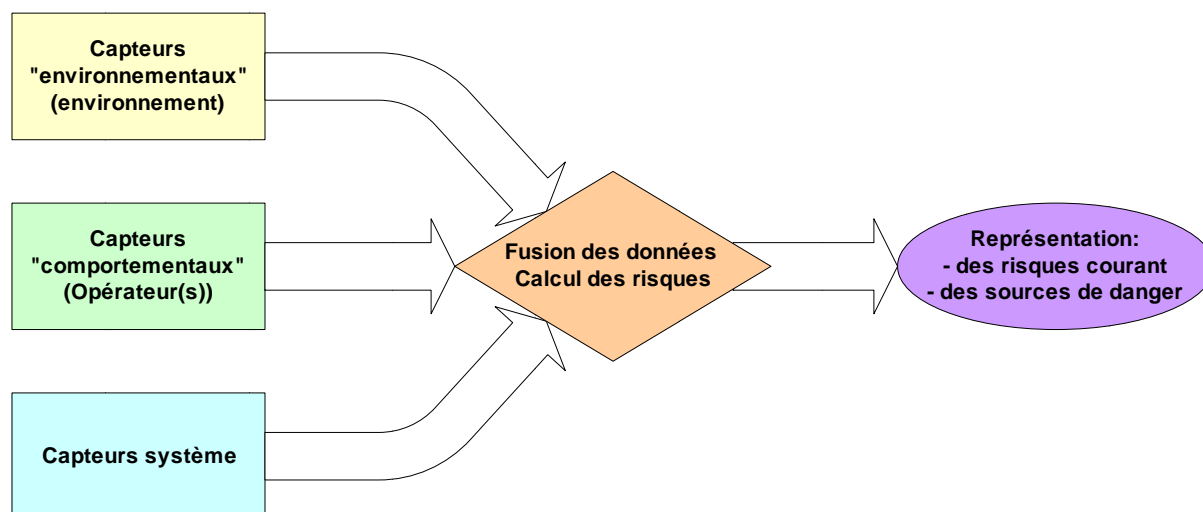


Figure 167 : Rappel de l'architecture générique d'un cindynamètre

La conception de cette aide à la conduite a ensuite été transposée au cas de la conduite automobile qui constitue une singularité au sein des systèmes à risques. En effet, alors que la majorité des autres types de systèmes à risques sont gérés par des opérateurs compétent respectant au mieux les procédures établies, la conduite automobile est le fait de conducteurs souvent mal formés, n'ayant pas toujours une pratique régulière et plus ou moins respectueux des règles existantes. Cet état de fait, conjugué à la multitude de véhicules se partageant les routes, fait de la conduite automobile une des activités les plus dangereuses et coûte chaque année en France des milliers de vies et de blessés ainsi qu'un coût matériel très élevé (rappel des statistiques d'accidents en France depuis 1987 donné en Figure 168).

	Accidents corporels		dont accidents mortels	Tués à 6 jours		Blessés graves	Blessés légers	Total blessés		Gravité (tués/100 accidents corporels)
	Nombre	Évolution en %		Nombre	Évolution en %			Nombre	Évolution en %	
1987	170 994	-7,4	8 686	9 855	-10,1	57 902	179 734	237 636	-8,2	5,76
1988	175 887	+2,9	9 341	10 548	+7,0	58 172	185 870	244 042	+2,7	6,00
1989	170 590	-3,0	9 302	10 528	-0,2	55 086	180 913	235 999	-3,3	6,17
1990	162 573	-4,7	9 128	10 289	-2,3	52 578	173 282	225 860	-4,3	6,33
1991	148 890	-8,4	8 509	9 617	-6,5	47 119	158 849	205 968	-8,8	6,46
1992	143 362	-3,7	8 114	9 083	-5,6	44 965	153 139	198 104	-3,8	6,34
1993	137 500	-4,1	8 005	9 052	-0,3	43 535	145 485	189 020	-4,6	6,58
1994	132 726	-3,5	7 609	8 533	-5,7	40 521	140 311	180 832	-4,3	6,43
1995	132 949	+0,2	7 453	8 412	-1,4	39 257	142 146	181 403	+0,3	6,33
1996	125 406	-5,7	7 178	8 080	-3,9	36 204	133 913	170 117	-6,2	6,44
1997	125 202	-0,2	7 130	7 989	-1,1	35 716	133 862	169 578	-0,3	6,38
1998	124 387	-0,7	7 514	8 437	+5,6	33 977	134 558	168 535	-0,6	6,78
1999	124 524	+0,1	7 185	8 029	-4,8	31 851	135 721	167 572	-0,6	6,45
2000	121 223	-2,7	6 811	7 643	-4,8	27 407	134 710	162 117	-3,3	6,30
2001	116 745	-3,7	6 920	7 720	+1,0	26 192	127 753	153 945	-5,0	6,61
2002	105 470	-9,7	6 549	7 242	-6,2	24 091	113 748	137 839	-10,5	6,87
2003	90 220	-14,5	5 168	5 731	-20,9	19 207	96 722	115 929	-15,9	6,35
	Accidents corporels		dont accidents mortels	Tués à 30 jours		Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total blessés		Gravité (tués/100 accidents corporels)
	Nombre	Évolution en %		Nombre	Évolution en %			Nombre	Évolution en %	
2004 Cal.	85 390	-5,4		5 593				108 366		6,55
2005	84 525	-1,0	4 857	5 318	-4,9	39 811	68 265	108 076	-0,3	6,29
2006	80 309	-5,0	4 326	4 709	-11,5	40 662	61 463	102 125	-5,5	5,86
2007	81 272	+1,2	4 265	4 620	-1,9	38 615	64 586	103 201	+1,1	5,68

Cal. : calculé en convertissant les tués à six jours en tués à trente jours, soit en appliquant le coefficient de 1,069
 Source : ONISR, fichier des accidents

Figure 168 : Rappel des statistiques d'accidents de la route de 1987 à 2007

Nous avons donc étudié l'application d'un cindynamètre à la conduite automobile en utilisant comme contrainte principale l'autonomie du système afin que celui-ci puisse être inséré dans un véhicule sans requérir l'équipement de la totalité des autres usagers de la route pour fonctionner. Ceci nous a conduit à exclure pour le moment l'utilisation de systèmes de communications véhicules-environnement et véhicules-véhicules. Ces systèmes pourront cependant être ajoutés très facilement étant donnée l'architecture modulaire que nous avons choisie.

Nous avons alors conçu une version détaillée de l'architecture générique du cindynamètre dédiée à la conduite automobile (que l'on rappelle Figure 169) présentant les capteurs nécessaires, les algorithmes de traitement et de fusion de données nécessaires ainsi que les modules de calcul et de représentation des risques encourus. Les différents capteurs nécessaires à la bonne marche du système existent et sont pour la plupart déjà utilisés par certains constructeurs. Nous avons détaillé le principe de fonctionnement de certains d'entre eux ainsi que certains des prétraitements qui leur sont associés.

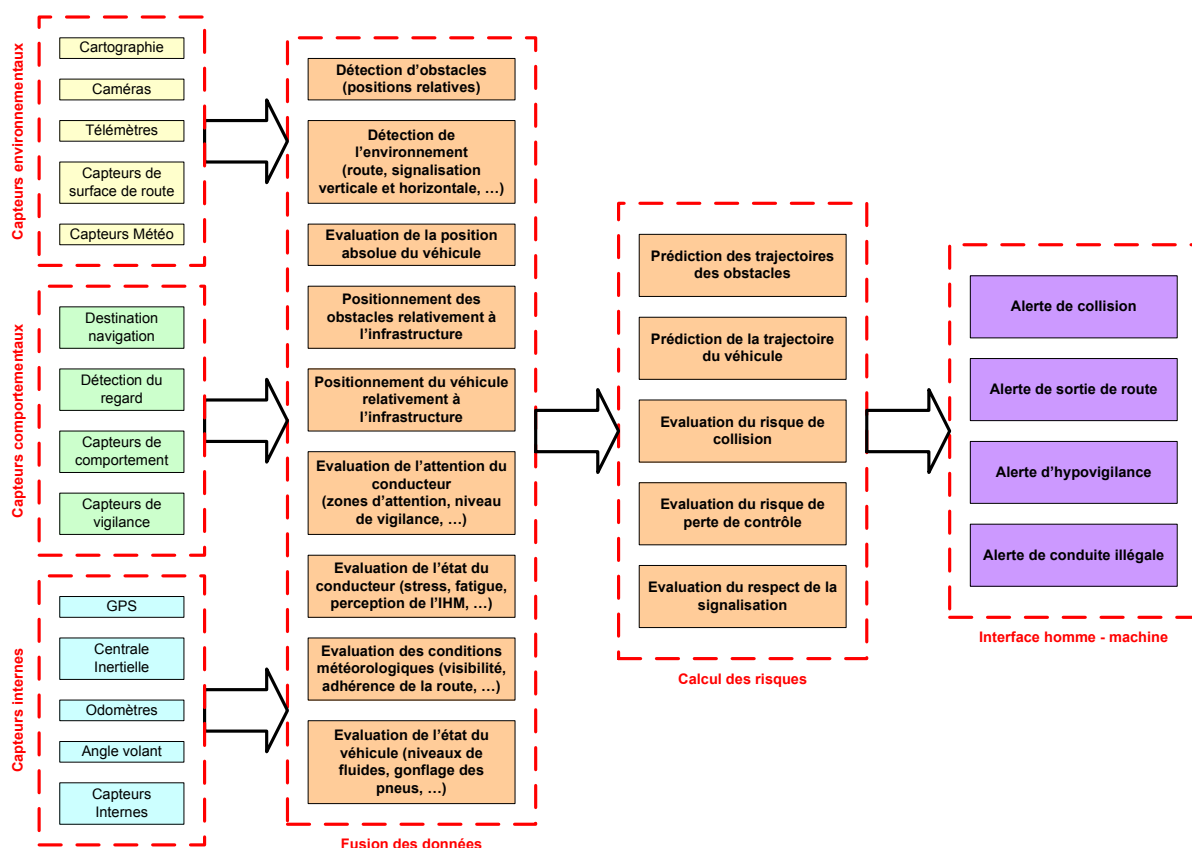


Figure 169 : Rappel de l'architecture détaillée du cindynamètre appliqué à l'automobile

La simple utilisation de ces capteurs ne permet cependant pas de réaliser la totalité des fonctions du cindynamètre car l'information recueillie est alors trop brute pour être aisément interprétable par le conducteur (on imagine aisément que l'information issue d'un radar n'est pas utilisable telle qu'elle par un conducteur par exemple). Nous avons donc proposé l'utilisation de modules de fusion de données déjà existants (amélioration du positionnement absolu du véhicule par hybridation des données DGPS, inertiels et odométriques et map-matching pour évaluer la position absolue du véhicule et sa position dans l'infrastructure routière par exemple) ou de modules que nous avons développés spécifiquement (détection d'obstacles par la vision seule ou par fusion de données vision et télémétriques, détection de la forme de la route par traitement d'images, par exemple). Au total, nous avons proposé cinq modules principaux de fusion de données permettant d'extraire le maximum d'informations sur l'état de l'environnement, du véhicule et du conducteur.

De ces informations, nous avons décidé d'extraire les indices de risques que le conducteur aurait pu rater. Il était donc nécessaire pour ce faire d'être capable de prédire l'évolution de la situation courante de conduite.

L'analyse de la situation de conduite nous a ainsi amené à définir trois types de risques principaux pour le conducteur :

- Risque de collision
- Risque de perte de contrôle
- Risque d'infraction au code de la route

Les deux premiers de ces risques constituent en effet la quasi-totalité des accidents de la route et sont donc prioritaires dans l'optique de limiter le nombre de morts et de blessés sur la route. Le risque d'infraction au code de la route constitue quant à lui un risque psychologique pour le conducteur (en tout cas pour celui qui respecte le code de la route) mais aussi un indicateur des marges de sécurité existantes.

Afin d'évaluer ces trois risques, nous avons donc conçu et développé deux modules dédiés à la prédiction de la trajectoire du véhicule et à celles des différents obstacles détectés. Cette prédiction effectuée par un réseau neuro-flou permet de prendre en compte non seulement la trajectoire courante des obstacles mais aussi l'infrastructure routière ou les intentions affichées. Elle permet ainsi une prédiction des différentes trajectoires probables ainsi que les probabilités associées à chacune.

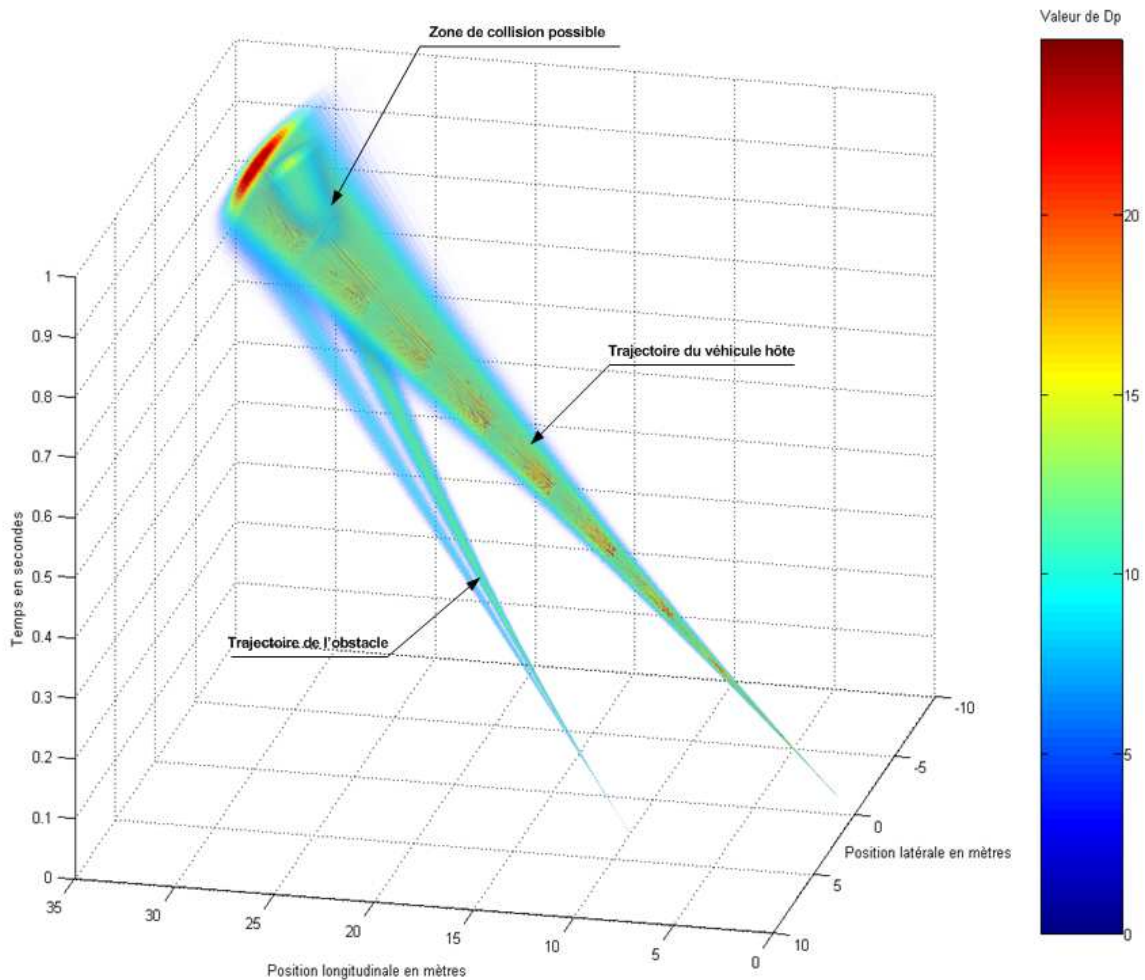


Figure 170 : Rappel du principe du calcul du risque de collision avec un obstacle

La comparaison des trajectoires potentielles du véhicule hôte avec les trajectoires probables de chaque obstacle (Figure 170) permet au cindynamètre d'évaluer le risque de collision avec chacun des obstacles. De même, la comparaison des trajectoires possibles, à la fois avec la forme de l'infrastructure et avec l'adhérence évaluée de la route, permet d'évaluer la probabilité de perte de contrôle et de sortie de la route pour le véhicule. Enfin, la disponibilité de la trajectoire courante et de son extension la plus probable dans le temps permet au cindynamètre d'évaluer le respect des règles en vigueur et d'avertir le conducteur en cas de non respect involontaire (on se heurte ici à un point délicat du sujet c'est-à-dire la détermination des intentions du conducteur).

Les calculs effectués nous permettent d'évaluer le niveau absolu de danger associé à chacun des risques précédemment mentionnés. Cependant, la dangerosité des situations ne dépend pas seulement de ce niveau absolu mais aussi de la proximité temporelle du danger ainsi que de sa prise en compte éventuelle par le conducteur. Ces deux facteurs de pondération sont donc utilisés afin de déterminer la criticité des différentes sources de danger et d'indiquer les plus importantes au conducteur.

Nous avons enfin proposé une interface homme machine pour le cindynamètre visant à offrir au conducteur les informations sur la dangerosité de la situation courante de la façon la plus efficace (en terme de rapidité de compréhension mais aussi en terme "d'informativité" de l'information). Cette interface se présente ainsi sous la forme d'une combinaison entre une interface auditive visant à effectuer les alertes en cas de danger imminent (qui nécessite donc une prise en compte rapide) et une interface visuelle présentant une information plus complète et détaillée sur la source du danger et sa nature.

On a de plus souhaité que cette interface présente une vue courante de ce qui se passe à l'avant (ou à l'arrière dans le cas de manœuvre en marche arrière) du véhicule afin de limiter au maximum l'impact négatif de l'interface visuelle sur le temps de réaction du conducteur. La Figure 171 rappelle ainsi l'apparence de cette interface visuelle dans la situation où le véhicule hôte s'apprête à reprendre la route alors qu'un véhicule approche dans son angle mort.

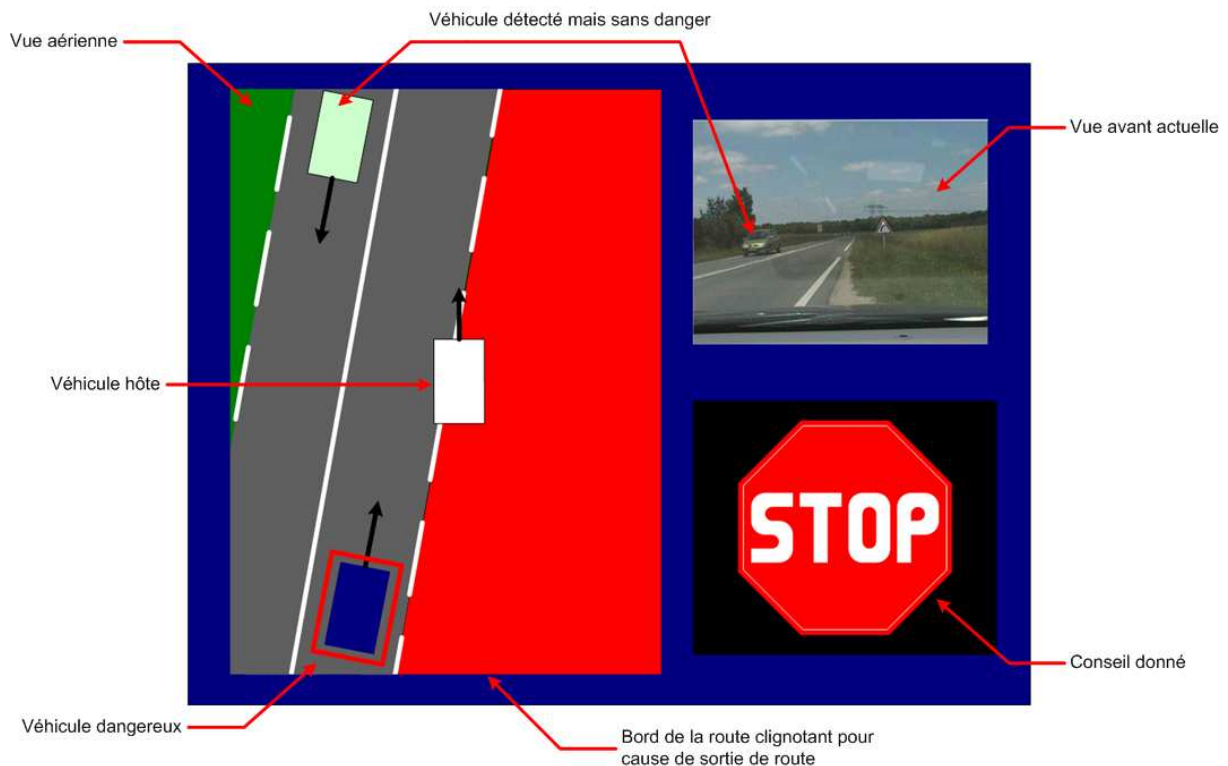


Figure 171 : Rappel de l'interface visuelle proposée pour le cindynamètre

Le cindynamètre complet n'a malheureusement pas pu être réalisé en raison de la non-disponibilité de certains des capteurs requis et de l'absence d'une base de données suffisamment large pour permettre la construction complète des réseaux neuro-flous nécessaires à la prédiction des trajectoires des obstacles et du véhicule hôte. De plus, les traitements nécessaires au calcul des risques encourus se sont avérés difficilement compatibles avec l'utilisation en temps-réel du cindynamètre étant donnée la puissance de calcul disponible alors (on rappelle que la majorité des développements liés à la prédiction des trajectoires et aux calculs des risques ont été effectués en 2003).

Nous avons cependant pu réaliser deux premières applications basées sur une partie des traitements liés au cindynamètre. Ces deux systèmes utilisables dès à présent sont ainsi conçus comme une aide à la conduite permettant d'éviter les écarts de trajectoire souvent provoqués par la fatigue, pour le premier [Wybo 03b] et d'améliorer les systèmes de régulation de la vitesse [Wybo 03a] pour le second. Nous présentons maintenant ces deux systèmes.

VIII - 2. Premières applications :

Les deux applications suivantes peuvent être perçues comme des cindynamètres incomplets mais qui offrent déjà des informations intéressantes ainsi qu'une aide non négligeable au conducteur.

VIII - 2. 1. Bande de roulement virtuelle :

L'application "bande de roulement virtuelle" a pour but de simuler l'existence d'une bande rugueuse sonore sur les bords de la voie de façon à ce que le conducteur perçoive les déviations de sa trajectoire vers le bord de la route. L'avantage de cette application est la relative familiarité de son interface auprès des conducteurs et sa transparence. Le conducteur aura ainsi l'impression d'avoir frotté une bande rugueuse alors même qu'il n'aura pas encore franchi la limite de sa voie ou que cette limite ne dispose pas de bandes rugueuses.

VIII - 2. 1. 1. Principe de fonctionnement

La bande de roulement virtuelle est une application relativement simple basée sur les possibilités de l'algorithme de détection de la route. Celui-ci permet, comme on l'a vu précédemment, de déterminer précisément la forme de la route. Il est donc possible de déterminer facilement la position du véhicule sur sa voie ainsi que son orientation par rapport à celle-ci si on dispose de la position et de l'orientation de la caméra par rapport au véhicule.

L'application garde en mémoire les évolutions de la position et de l'orientation du véhicule par rapport à la voie au cours du temps. Elle peut ainsi prédire sur un temps relativement court la trajectoire du véhicule en propageant simplement la trajectoire en cours par le biais d'un filtre de Kalman par exemple (par la suite on préférera évidemment l'utilisation du moteur de prédiction de trajectoire présenté précédemment).

On utilise ensuite cette trajectoire prédite pour calculer le TLC [Winsum 00] (Time to Line Crossing ou temps avant coupure de la ligne) qui correspond au temps restant avant que le véhicule n'empiète sur le marquage au sol (Figure 172). L'application compare alors ce temps à un seuil prédéfini³³ et déclenche une alerte si ce temps lui est inférieur. Il faut noter bien entendu que ce TLC est calculé en extrapolant la trajectoire actuelle du véhicule et non sa direction seulement. Ainsi dans un virage l'algorithme considère la rotation du véhicule ainsi que sa direction sans quoi dans tout virage une alarme serait produite. Cependant, avec une telle méthode de calcul, il est probable qu'une alarme retentisse à l'approche d'un virage serré (le véhicule roulant alors en ligne droite). Cette alarme pourrait être compensée par l'extrapolation de la trajectoire selon la forme de la route et la trajectoire précédente. Une telle solution pourra être mise en place par la suite grâce à la prédiction de la trajectoire du véhicule.

³³ On a choisi 2s dans un premier temps de façon à donner suffisamment de temps au conducteur pour réagir et corriger la trajectoire de façon non brusque, mais ce seuil pourra être modifié par la suite pour mieux s'adapter au temps de réaction du conducteur probablement beaucoup plus court compte tenu de la nature de l'avertissement sonore auquel il est habitué

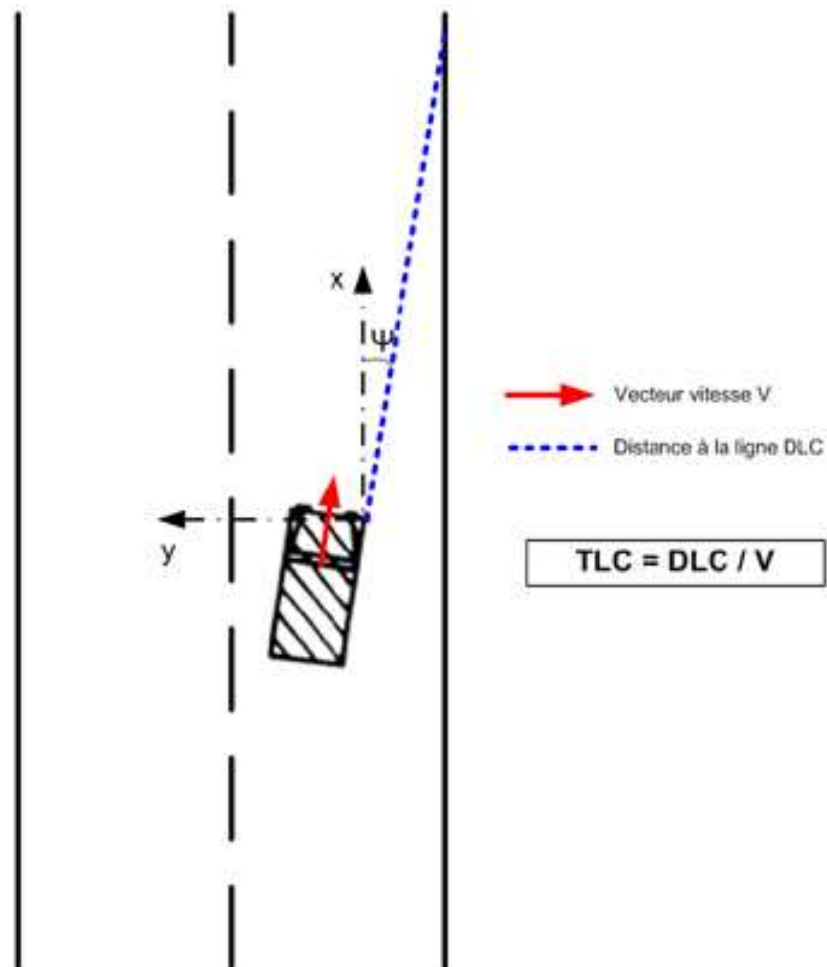


Figure 172 : Principe de calcul du TLC

VIII - 2. 1. 2. Alerte

La procédure d'alerte utilise une partie de l'interface homme – machine que nous avons présentée précédemment (voir Chapitre VII). Dans le cas de la bande de roulement virtuelle on cherche simplement à recréer l'effet produit par les bandes rugueuses qui ornent certains marquages de bord de route et produisent différents effets lorsque le véhicule roule sur elles. Ces effets sont de trois types :

- Vibrations : le contact pneu – bande rugueuse n'est pas continu et crée des vibrations de faible intensité dans tout l'habitacle qui sont néanmoins facilement perçues par le conducteur
- Bruit : le contact pneu – bande rugueuse et les vibrations qu'il entraîne dans le véhicule produisent un son grave relativement fort du côté de la bande rugueuse ce qui permet de la localiser.
- Résistance de la colonne de direction : la bande rugueuse est légèrement plus haute que le reste de la chaussée, le véhicule a donc tendance à ne pas monter dessus ce qui introduit un couple de rappel dans la colonne de direction.

La simulation des vibrations et de la résistance accrue de la colonne de direction pose quelques problèmes en termes de réalisation et de sécurité. La génération de petites vibrations dans tout l'habitacle est en effet difficilement réalisable comme nous l'avons présenté précédemment. Certains systèmes ont cependant limité ces vibrations au seul siège du conducteur [AFIL] offrant ainsi une alternative plus réaliste. Le durcissement de la colonne de direction pose quant à lui des problèmes en terme de sécurité (dus à la fiabilité de l'actionneur mais aussi de sa commande) et de légalité (la question de la responsabilité en cas d'accident du à ce durcissement). Ces deux méthodes de représentation ont donc été écartées de ce fait et on leur a préféré l'interface sonore.

Le système d'alerte de la bande de roulement virtuelle consistera donc à recréer le bruit caractéristique des bandes rugueuses du côté dangereux. Pour ce faire on utilisera une bande sonore correspondant au passage sur une bande rugueuse que l'on n'émettra que sur les haut-parleurs droit ou gauche du véhicule selon le cas. On pourra éventuellement augmenter la fréquence de cette bande pour adapter le son à la vitesse du véhicule et reproduire ainsi le son naturel. Ce dernier point n'est pas essentiel mais pourra être appliqué assez facilement grâce à l'interface homme – machine proposée.

VIII - 2. 1. 3. Avantages attendus

Le système d'alerte utilisant des bandes rugueuses a permis selon certaines estimations de réduire de 20% le nombre d'accidents dus à une sortie de route suite à un assoupissement sur les voies équipées. Les avantages de ce système au niveau de la sécurité sont donc potentiellement énormes puisque l'on réduirait ainsi le risque d'accident en cas d'assoupissement.

De plus, ce système nous permet d'évaluer le degré d'attention du conducteur en observant la fréquence de ces alarmes. On dispose ainsi d'une sorte de capteur d'attention du conducteur qui pourra donc fournir des informations complémentaires au cindynamètre sans augmentation du temps de calcul nécessaire.

Enfin, le dernier avantage de ce système repose dans le fait que les bandes rugueuses deviennent virtuelles et ne dépendent donc plus de l'équipement des voies. Ceci permet de disposer en permanence (pour peu que la route dispose de marquages) du système d'avertissement et évite aux riverains les nuisances sonores introduites par les bandes rugueuses réelles. Ces nuisances ont en effet poussé les pouvoirs publics à limiter l'usage de ces bandes pourtant fort utiles.

VIII - 2. 2. Compréhension des voies de circulation

Cette seconde application est en fait une fonction nécessaire au cindynamètre pour des fonctions de plus haut niveau. Il s'agit ici, à partir des informations obtenues par les algorithmes de détection de voies couplées aux données GPS, de percevoir les voies de circulation des différents véhicules. Cette fonction permet d'assurer une meilleure compréhension des trajectoires des obstacles mais aussi d'identifier de façon plus sûre les obstacles présents sur notre voie de circulation. Elle permet ainsi de déterminer plus efficacement les distances inter-véhiculaires et de les comparer aux distances de sécurité pour une meilleure évaluation du danger d'une situation.

VIII - 2. 2. 1. Problématique

Le problème du calcul des distances inter-véhiculaires appliqué à la détermination des distances de sécurité est particulièrement étudié pour les systèmes ACC³⁴. En effet, la plupart des systèmes actuellement commercialisés n'utilisent qu'un seul radar pour détecter et déterminer la distance des véhicules précédant le véhicule équipé [Langheim 99], or ce capteur n'offre qu'un très faible angle de vue horizontal et vertical. Cette approche est donc adaptée à des routes de type autoroute mais devient inutile et inapplicable pour des routes de campagne sinueuses et vallonnées.

Ce problème peut être résolu grâce à l'utilisation d'un télémètre à large champ de type LIDAR [Langheim 00], [Zhao 98] mais cette méthode ne résout toujours pas le problème lié à l'élévation de la route. Une méthode actuellement en cours d'évaluation consiste à adjoindre une caméra vidéo au système de façon à percevoir les véhicules hors du champ du télémètre (radar ou Lidar) [Watanabe 95], [Steux 02]. Cette méthode permet alors de percevoir tous les véhicules dans le champ de la caméra et donc de prendre en compte des véhicules qui n'auraient pas été perçus autrement. Malheureusement, cette méthode ne permet pas d'identifier le véhicule qui doit servir à calculer la distance de sécurité car elle ne donne pas d'informations sur la voie empruntée par le véhicule. Ainsi dans un cas similaire au cas de la Figure 173, un système ACC actuel ne pourrait pas déterminer quel véhicule suivre.

³⁴ ACC : Automatic Cruise Control (Régulation Automatique de la Vitesse)

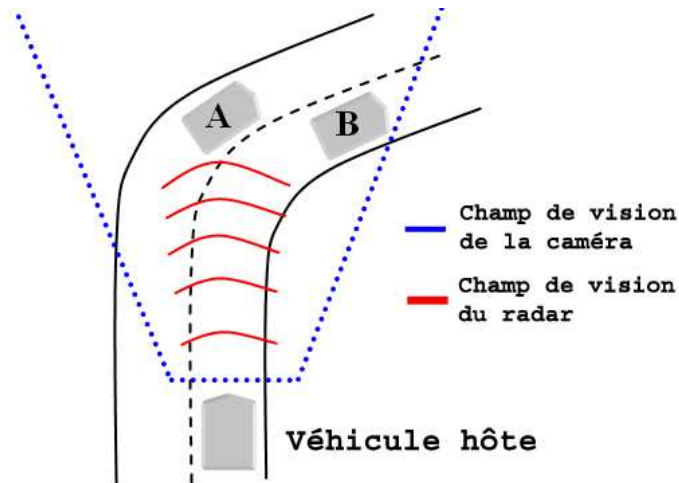


Figure 173 : Situation typique posant problème pour le calcul de distance

Imaginons que le véhicule A double le véhicule B qui est très lent, on cherche à évaluer le danger de la situation présente pour le véhicule hôte. La vitesse de ce dernier est inférieure à celle du véhicule A mais très supérieure à celle de B. Avec un système classique à base de radar et de vidéo on déciderait que le véhicule A n'est pas dangereux et on ne prendrait pas en compte le véhicule B qui semblerait sur une autre voie alors que celui-ci est particulièrement dangereux.

VIII - 2. 2. 2. Solution envisagée

Les algorithmes de détection de la route que nous avons développés permettent de déterminer précisément la position du véhicule sur la route et donc sa voie de circulation. De plus, la précision du système permet aussi de déterminer la forme de la route sans trop commettre d'erreur. Ceci nous permet, pour des véhicules proches, de déterminer la voie de circulation des véhicules détectés et ainsi de remédier au problème précédemment cité.

Néanmoins, le rôle de la détection de route ne se limite pas simplement à détecter la voie de circulation des autres véhicules. Ces algorithmes peuvent aussi être utilisés pour déterminer la position exacte du véhicule par rapport à un virage par exemple ce qui permet ainsi de rendre plus précis le GPS. Cette utilisation détournée des algorithmes permet de déterminer indirectement la voie de circulation des véhicules et de répondre ainsi à la problématique posée. En effet, si l'on dispose de la position du véhicule hôte par rapport au virage, on peut déterminer la position des autres véhicules sur la route grâce à la détection des obstacles et à la cartographie embarquée. On décrit l'architecture logique de cette application dans la Figure 174.

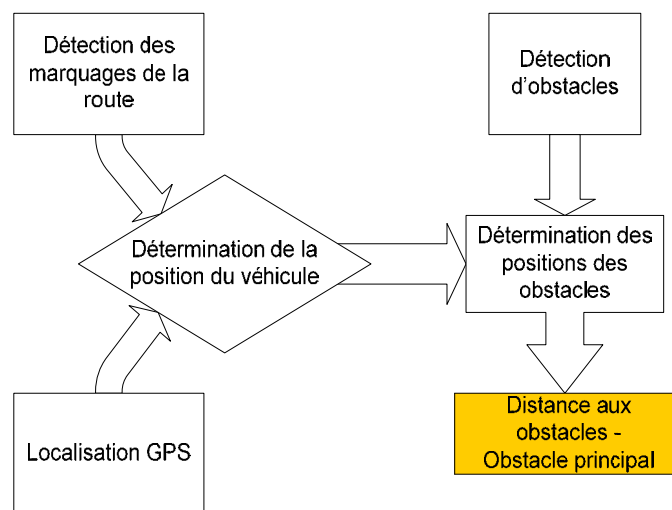


Figure 174 : Architecture logique de la détection d'obstacles avancée

VIII - 2. 2. 3. Mise en œuvre

La détection d'obstacles se fait ici selon le principe de détection monoculaire simple (sans fusion de données avec les données radar ou lidar bien qu'on aurait pu utiliser cette fusion) exposé précédemment auquel on a rajouté, comme illustré Figure 175, un filtrage des obstacles potentiels grâce à l'entropie³⁵ de leur image (on élimine ainsi les zones peu texturées) et à leur position dans l'espace (on élimine les cibles au dessus du sol par exemple). La détection de la route se fait bien évidemment par les algorithmes présentés précédemment.

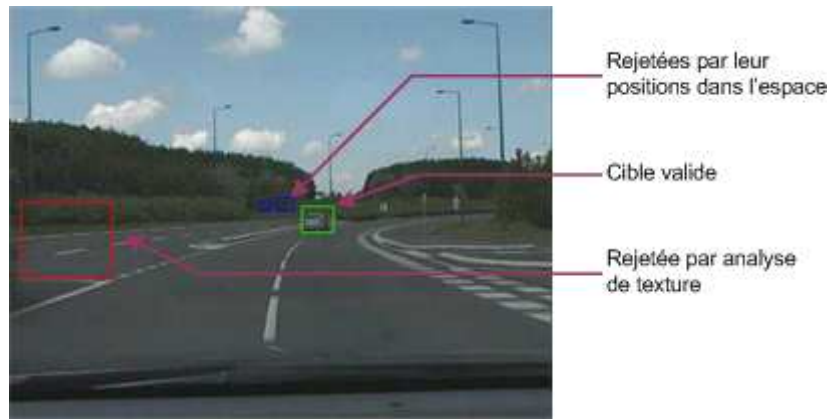


Figure 175 : Illustration des mécanismes additionnels de filtrage des obstacles

On réalise un map-matching entre la position calculée de notre véhicule et les informations fournies par la cartographie. Cette dernière nous fournit de plus de précieuses informations sur l'horizon électronique (HE) comme par exemple la forme et le nombre de voies de la route en avant du véhicule. Ces informations peuvent être vérifiées ou complétées par le système de détection de lignes.

La détermination de la voie de circulation d'un obstacle (O) se fait alors en deux étapes. On détermine tout d'abord notre propre trajectoire (T) en supposant que l'on reste sur notre voie (en fait on détermine notre position dans la voie et on la propage le long de la route). On calcule ensuite la distance d_0 de l'obstacle par rapport à cette trajectoire (Figure 176). Si cette distance est trop grande, typiquement supérieure à une demi largeur de voie, le véhicule est considéré comme étant sur une autre voie. Davantage de précisions peuvent être trouvées dans [Wybo 03a].

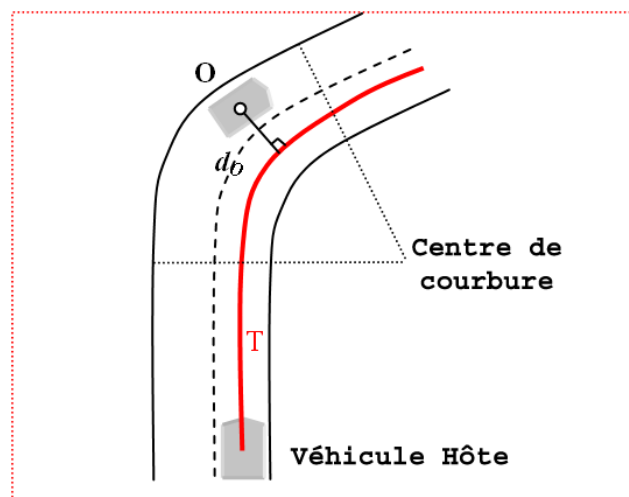


Figure 176 : Principe d'attribution de voie aux obstacles

³⁵ On utilise la définition de l'entropie au sens de la théorie de l'information de Shannon. L'entropie traduit donc la quantité d'information portée par l'image, c'est-à-dire, la diversité des valeurs des pixels de l'image par rapport à la valeur moyenne de l'image globale.

Les Figure 177 et Figure 178 extraites d'essais réalisés dans le cadre d'ARCOS en Juin 2003 sur la piste d'essais de Satory montrent deux exemples d'amélioration de la compréhension de l'environnement par la détection combinée des obstacles et des voies de circulation. Dans la Figure 177, plusieurs véhicules sont visibles. Le premier, bien que plus proche du véhicule hôte n'est pas considéré comme dangereux puisqu'il ne se situe pas sur notre voie de circulation au contraire du deuxième véhicule que l'on a correctement détecté sur notre propre voie de circulation.

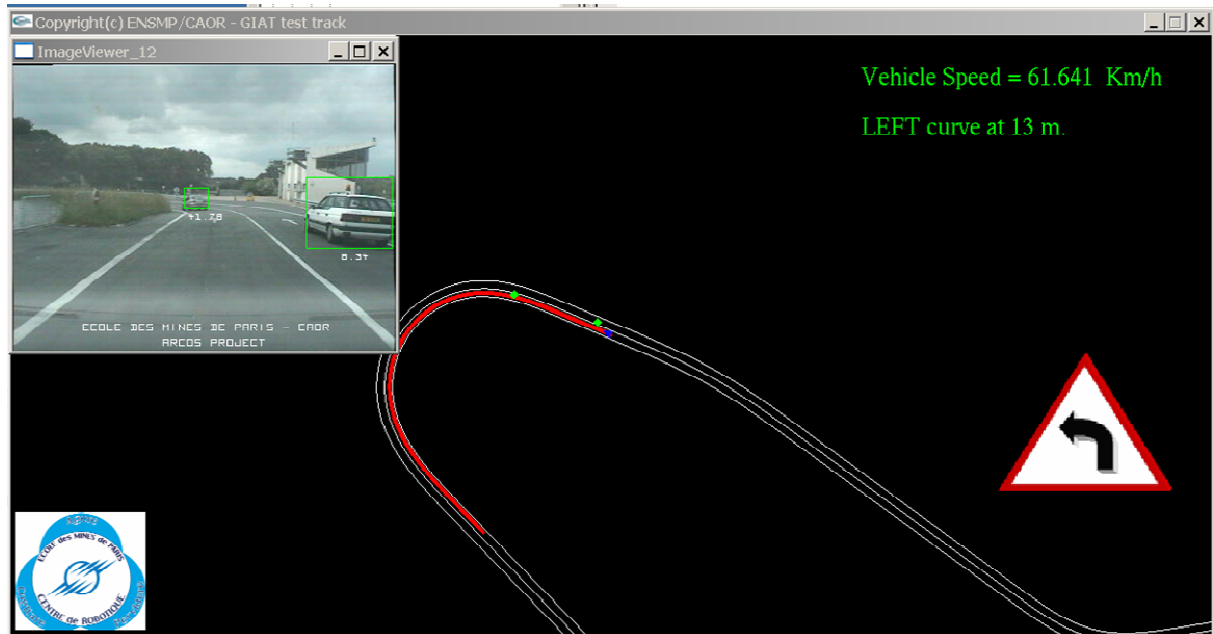


Figure 177 : Exemple d'attribution des voies de circulation (véhicule dans la voie)

La Figure 178 montre l'évolution de cette situation quelques dizaines de mètres plus loin. Il ne reste plus alors qu'un seul véhicule, qui bien que en face du véhicule hôte (et qui serait donc considéré comme dangereux par un système classique) n'est pas considéré comme dangereux puisque roulant sur une autre voie de circulation. Dans ces deux figures, l'évaluation de l'adéquation entre la vitesse du véhicule et la forme de la route est aussi faite. On utilise alors pour ce faire les informations données par une base de données géographiques extrêmement précise.

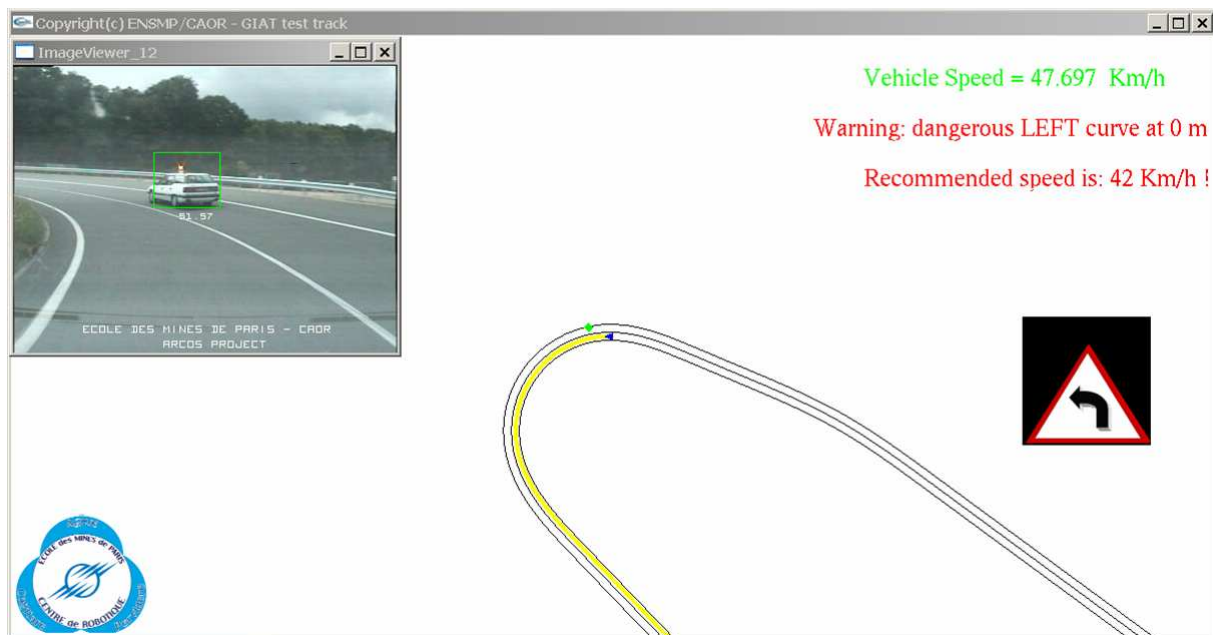


Figure 178 : Exemple de l'attribution des voies de circulations (voie de circulation libre)

VIII - 2. 3. Synthèse :

Les deux applications que nous venons de présenter offrent au conducteur des informations intéressantes et peuvent même servir à l'amélioration de certains systèmes d'aides à la conduite existants. Néanmoins, ces deux applications sont limitées par leurs hypothèses. Ainsi, le calcul de la trajectoire du véhicule hôte se fait en supposant que le conducteur garde sa trajectoire dans la voie. Une telle hypothèse suppose qu'il n'a pas perçu lui non plus le danger représenté par le véhicule présent sur sa voie et donc qu'il ne va pas changer de voie pour doubler à son tour. De même, le calcul du TLC pour la bande de roulement virtuelle se fait en supposant la trajectoire constante.

La réalisation complète du cindynamètre et en particulier de ses modules de prédiction des trajectoires (des obstacles et du véhicule hôte) permettra donc de s'affranchir de ces hypothèses. Ces systèmes pourront alors fournir une information plus pertinente au conducteur quant aux dangers réels qui le guettent.

VIII - 3. Analyses et critiques :

Le cindynamètre tel que nous le proposons, pour la conduite automobile mais aussi pour tout autre système à risques, nous apparaît comme essentiel pour améliorer encore la sécurité de ces systèmes. En effet, devant la complexification croissante des systèmes, l'opérateur a de plus en plus de mal à comprendre et à envisager la situation globale du système et doit donc piloter le système à l'aide d'une connaissance limitée de son état courant en espérant ne pas faire d'erreurs et en comptant sur sa capacité à détecter les déviations et à les corriger. De plus, pour augmenter la productivité du système il doit constamment faire des compromis entre sécurité du système et prise de risques, ce qui conduit souvent au pilotage du système dans des BTCU, conditions d'utilisation hors norme mais néanmoins tolérées pour la performance du système.

On voit bien alors le risque que pose cette situation pour la sécurité du conducteur, du système et de leur environnement puisqu'une mauvaise interprétation de l'état du système peut conduire l'opérateur à effectuer de mauvaises opérations (coupure du circuit d'injection de sécurité à TMI-2 par exemple) entraînant un accident potentiellement catastrophique.

Le concept du cindynamètre, tel que nous l'avons proposé, se propose de donner au conducteur un point de vue supplémentaire lui permettant d'avoir une vue plus générale de l'état du système mais aussi des indications quant aux dégradations potentiellement dangereuses de la situation de conduite courante. De cette façon nous espérons permettre à l'opérateur de prendre les décisions correctes lorsqu'un problème (erreur humaine, incident technique, problème extérieur ayant des conséquences sur le système, ...) intervient dans la conduite du système.

L'intérêt d'un tel système nous a donc paru évident et nous a poussé à explorer son application dans le domaine qui requiert aujourd'hui le plus d'attention, tant il semble que le gain de sécurité puisse être grand, c'est-à-dire la conduite automobile. Nous avons donc proposé une adaptation de l'architecture du cindynamètre au cas particulier de la conduite automobile et nous nous sommes intéressés aux risques majeurs qui y sont liés.

VIII - 3. 1. Détection d'obstacles :

Nous avons ainsi développé deux systèmes de détection des véhicules destinés à évaluer la position et la trajectoire des véhicules alentour puisque ceux-ci constituent l'une des premières sources d'accidents. Le premier d'entre eux permet une détection des obstacles proches du véhicule pour les manœuvres à basse vitesse (parking, garage...) qui entraînent parfois des accidents grave avec des enfants ou des personnes âgées et beaucoup plus souvent de petits accidents matériels. Ce système développé à l'IMRA Europe offre d'excellentes performances malgré la variabilité des environnements et obstacles rencontrés. Ce système reste néanmoins en développement puisqu'il souffre à l'heure actuelle d'un trop grand nombre de fausses alarmes (mauvais positionnement des obstacles par exemple). Son couplage à un télémètre permettrait cependant de le rendre beaucoup plus fiable.

Le second système permet la détection de véhicules lointains afin de permettre une anticipation des trajectoires des obstacles même à grande vitesse. Ce système basé sur des algorithmes de traitement d'images ainsi que sur les informations d'un télémètre lorsqu'elles sont disponibles a montré une grande efficacité sur les tests effectués, permettant de détecter et de positionner correctement des véhicules jusqu'à plus de 80 mètres de distance sur des routes vallonnées et sinueuses (contrairement à de nombreux algorithmes de la littérature basé sur l'hypothèse d'une route plane et dont les résultats sont données pour des essais autoroutiers présentant des routes très droites et plates) et de suivre ces véhicules sur l'intégralité de la période où ils ont été visibles.

Evidemment, tout n'est pas parfait dans ce second algorithme puisqu'il se base sur un modèle moyen du véhicule pour positionner celui-ci correctement (ce qui suppose donc que l'on ait reconnu le type de véhicule auparavant) mais aussi car il ne s'applique correctement qu'aux véhicules vu de face ou de dos. Un véhicule approchant d'une intersection perpendiculairement à la trajectoire du véhicule hôte sera ainsi difficilement détecté avec la version actuelle de l'algorithme et probablement mal positionné. Il est donc nécessaire, afin d'obtenir une détection d'obstacles robuste et fiable, d'utiliser des algorithmes complémentaires, destinés spécifiquement à la détection des véhicules vus de profil par exemple mais aussi à la détection des piétons ou d'obstacles fixes de formes inconnues (murs, arbres, poteaux, ...).

VIII - 3. 2. Détection et reconstruction de la forme de la route :

Nous avons aussi développé un algorithme de détection et de reconstruction des marquages au sol afin de reconstruire la forme tridimensionnelle de la route. Ce développement a été rendu nécessaire par la piètre précision des systèmes de localisation satellite (même en utilisant l'hybridation des données DGPS avec les données inertielles et odométriques, la précision de localisation ne nous aurait pas permis d'évaluer le risque de sortie de la route compte tenu de notre trajectoire) et de la nécessité de pouvoir évaluer la position du véhicule hôte sur la route afin d'évaluer le risque de sortie de route. L'algorithme proposé a donné de très bons résultats en termes de précision de la reconstruction de la route même à grande distance (plusieurs dizaines de mètres). Ces résultats obtenus par simulation (l'obtention de données de référence sur la forme de la route s'avérant extrêmement difficile) ont été vérifiés en partie dans des conditions réelles sur le circuit de Satory utilisé pour les essais (la Figure 179 donne ainsi un exemple de l'utilisation de l'algorithme pour calculer les marges de sécurité à droite et à gauche du véhicule).



Figure 179 : Détermination des marges de distance latérale grâce à la détection de la route

Ces tests en conditions réelles ont cependant permis d'évaluer les limitations de cet algorithme du fait des variations d'assiette (roulis et tangage) de la cabine du véhicule qui ne sont pas entièrement compensées par la détermination de la position du point de fuite. D'autres limitations de l'algorithme, principalement liées à l'absence de marquages au sol ou à la présence d'ombres très marquées, le rendent peu applicable dans certaines situations. Il est donc nécessaire de disposer d'algorithmes complémentaires pour rendre plus fiables la détection de la route ainsi que la reconstruction de sa forme.

VIII - 3. 3. Prédiction des trajectoires :

La prédiction des trajectoires des obstacles et du véhicule hôte nous apparaît comme le point le plus important du cindynamètre puisque sans lui aucune évaluation du risque ne peut se faire de manière fiable. L'algorithme que nous avons conçu utilise un raisonnement en deux étapes comparable au raisonnement que l'on effectue régulièrement. Dans une première étape l'algorithme cherche à évaluer ce que cherche à faire chacun des véhicules étudiés en se basant sur toutes les informations dont il dispose. On va ainsi observer l'utilisation du clignotant, le freinage, la direction du véhicule mais aussi la forme de l'infrastructure alentour (c'est là où l'utilisation du détecteur de route mais aussi des bases de données cartographiques prend toute son importance) afin d'évaluer les intentions de chacun. L'algorithme effectue cette prédiction des intentions et attribue à chacune une probabilité afin de retranscrire au mieux l'incertitude de ces prédictions (il est en effet très difficile de prédire avec certitude quelle manœuvre un conducteur va effectuer, il arrive ainsi qu'un véhicule utilise le clignotant droit avant de tourner à gauche par exemple). Dans une seconde étape, l'algorithme va évaluer quantitativement la trajectoire associée à chacune des intentions possibles prédites. On obtient alors une carte de probabilité de présence de chaque véhicule dans le temps et dans l'espace.

L'architecture neuro-flou que nous avons proposée pour réaliser cette prédiction des trajectoires nous est apparue la plus adaptée à cette tâche puisqu'elle nous permettait de fusionner aussi bien des données qualitatives (utilisation des clignotants par exemple) que quantitatives (vitesse et direction d'un véhicule). De plus, l'utilisation de la logique floue dans ces réseaux nous permet de disposer facilement d'une mesure de la probabilité des événements. Enfin, la logique floue permet de retranscrire au mieux l'incertitude quant à la signification de telle ou telle action du conducteur d'un véhicule (le conducteur peut virer un peu à gauche avant de tourner à droite ou simplement continuer son virage à gauche).

Ce choix d'algorithmes pose cependant quelques problèmes pour la réalisation complète du cindynamètre. Compte tenu du nombre de nœuds du réseau (quelques centaines compte tenu de toutes les variations possibles d'intentions du conducteur) et donc de connexions entre chacun, l'écriture du réseau s'avère extrêmement difficile (il est essentiel que le réseau dispose d'une base la plus exhaustive possible des intentions des conducteurs) et fastidieuse. De plus, l'attribution des paramètres du réseau (poids des connexions, connexions par nœuds, ...) ne peut se faire que grâce à un apprentissage automatique afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Il est donc impératif de disposer d'une base d'apprentissage très large (i.e. représentant de très nombreux cas) pour obtenir des données statistiques fiables. Nous ne disposons malheureusement pas d'une telle base et avons donc du nous contenter d'initialiser manuellement les paramètres du réseau.

De même, le passage des intentions du conducteur à la trajectoire probable qu'il va suivre suppose que l'on dispose d'une bonne connaissance de la façon dont les conducteurs mènent ces manœuvres. Là encore il est donc nécessaire d'effectuer une étape longue d'apprentissage pour donner au système la capacité de prédire convenablement, à la fois la trajectoire suivie mais aussi l'incertitude sur cette trajectoire. Nous proposons d'ailleurs, comme on le verra par la suite, d'utiliser les données recueillies par les caméras de surveillance des réseaux routiers pour constituer cette base d'apprentissage.

Une autre limitation du système provient, comme nous l'avons indiqué lors de la description de l'algorithme, de la non prise en compte des interactions avec les autres véhicules. Ainsi, lors de la prédiction des trajectoires des obstacles dans une circulation dense, l'algorithme développé supposera que chaque véhicule se déplace indépendamment des autres et proposera donc des trajectoires potentiellement accidentogènes pour chaque véhicule. Il serait donc très important de prendre en compte les autres véhicules lors de la prédiction des trajectoires mais ceci demanderait beaucoup plus de calculs et demanderait encore davantage de données d'apprentissage afin de disposer en plus des comportements des conducteurs face aux autres véhicules. Nous avons volontairement choisi de ne pas prendre en compte cet aspect du problème dans un premier temps mais il sera nécessaire de s'y intéresser par la suite. La première approximation (i.e. basée sur une interpolation linéaire de la trajectoire actuelle) que nous avons proposée permettrait de prendre d'ores et déjà en compte la présence des obstacles sans nécessiter de très gros changements d'algorithmes ni de calculs supplémentaires coûteux.

VIII - 3. 4. Calcul des risques :

Les algorithmes de calcul des risques sont a priori les plus simples une fois que l'on dispose des trajectoires prédites, de la forme de la route et de la réglementation. En effet, nous avons choisi de considérer le risque de collision comme l'intégration de la probabilité de présence conjointe du véhicule hôte et d'un obstacle en un point de l'espace au cours du temps. Le calcul de ce risque consiste donc à calculer la probabilité qu'une partie du véhicule et d'un obstacle soient au même instant au même endroit. La prédiction des trajectoires nous permet de calculer simplement la probabilité de présence de chaque véhicule en tout point de l'espace au cours du temps sous la forme d'une carte tridimensionnelle. En combinant la carte tridimensionnelle associée au véhicule hôte avec celles des autres obstacles on peut calculer le risque associé à chaque obstacle. Cependant on atteint là une des limitations principales du système selon nous, à savoir le temps de calcul et l'utilisation de la mémoire.

En effet, le stockage de ces cartes nécessite, comme nous l'avons indiqué précédemment, une capacité mémoire très importante. Le traitement de telles quantités de données requiert un temps de calcul important ce qui limite les capacités temps réelles du système. Bien que nous ayons choisi une implémentation moins gourmande en mémoire, la gestion du temps de calcul nous paraît le problème le plus important de l'approche suivie. Ce problème pourrait néanmoins se résoudre avec l'évolution exponentielle des performances des systèmes informatiques ainsi que par l'utilisation de coprocesseurs spécialisés ou le détournement de la puissance de calcul des processeurs graphiques disponibles.

Le même problème se pose pour le calcul des risques de sortie de route et de violation des réglementations avec cependant beaucoup moins de calculs puisque seule la trajectoire du véhicule hôte est ici prise en compte. Là encore l'amélioration des performances des systèmes informatiques permettra de réduire ces limitations.

VIII - 3. 5. Prise en compte du comportement du conducteur :

La prise en compte du comportement du conducteur nous apparaît à ce jour comme le problème le plus complexe à résoudre. En effet, s'il existe un certain nombre de systèmes permettant d'évaluer l'attention du conducteur (en observant la fréquence de fermeture des paupières par exemple) ou la direction de son regard, il n'existe aucun système permettant d'évaluer de façon fiable son état de stress, de préoccupation ou d'angoisse par exemple. Les facteurs que nous avons proposés ne sont ainsi que le résultat de notre analyse mais ne reposent sur aucune donnée concrète. Il semble donc nécessaire d'effectuer une campagne de recueil de données afin de définir des critères d'évaluation de l'état psychologique du conducteur.

Une deuxième difficulté liée à la prise en compte du comportement du conducteur provient de l'évaluation de sa compréhension de la situation. En effet, comme nous l'avons vu au Chapitre II, l'être humain peut très facilement faire des erreurs de compréhension d'une situation même s'il a bien perçu les données. Ainsi, le fait que le conducteur ait observé une direction de l'espace où se situe un danger ne signifie pas forcément qu'il a effectivement compris le danger. C'est pour cette raison que nous avons considéré que le cindynomètre devait informer le conducteur d'un danger grave même si celui-ci a regardé dans cette direction afin de s'assurer de sa bonne compréhension.

VIII - 3. 6. Analyse générale :

Le concept de cindynomètre que nous proposons nous semble être une réponse particulièrement adaptée au problème de la stagnation du niveau de sécurité des systèmes à risques actuels. Il s'attaque en effet, non pas aux erreurs du conducteur en essayant de les corriger (et ainsi en risquant de réduire encore davantage la marge de sécurité de l'opérateur) mais aux problèmes d'incompréhension du système par le ou les opérateurs. On espère ainsi permettre à l'opérateur de mieux anticiper et de récupérer ses erreurs de lui-même et d'apprendre ainsi de la survenue et de la correction de celles-ci. Ce mécanisme devrait ainsi avoir la double vertu d'améliorer l'apprentissage des opérateurs mais aussi de leur donner plus conscience de la fragilité des marges de sécurité dont ils disposent afin qu'ils conduisent plus prudemment les systèmes à risques.

La conduite automobile pourrait bénéficier grandement d'une telle aide tant la formation de base des conducteurs présente des lacunes et tant la prise de risques semble une composante importante de la conduite. De plus un tel système basé sur la participation active du conducteur ne risquerait pas d'aliéner une partie des conducteurs rétifs à tout système leur imposant des limites. Cependant, l'utilisation du cindynomètre dans un véhicule se heurte à un certain nombre de problèmes liés à la difficulté d'obtenir les informations utiles dans l'environnement ou concernant le conducteur mais aussi à la difficulté de prédire l'évolution de la situation de conduite. Une étude exhaustive des comportements des conducteurs (leur façon de conduire et la relation entre état psychologique et conduite) permettrait sans doute de lever une partie des difficultés liées au facteur humain. La puissance de calcul nécessaire à la bonne marche du cindynomètre appliqué à la conduite automobile pose également des problèmes d'intégration puisqu'on ne peut guère envisager d'installer un super calculateur dans chaque véhicule.

Un dernier point très important de cette analyse provient de l'interface homme machine du cindynomètre. La conception d'une interface homme machine efficace s'avère en effet être extrêmement délicate et constitue à elle seule un domaine de recherche très actifs. Nous avons donc préféré nous limiter à proposer un concept d'interface qui nous semble intéressant mais qui demanderait à être validé expérimentalement (en utilisant des simulateurs de conduite puis une implémentation dans le véhicule lorsque le cindynomètre sera fonctionnel).

VIII - 4. Perspectives :

La réalisation du cindynomètre appliqué à la conduite automobile requiert encore, comme on a pu le voir, un certain nombre de développements et d'améliorations au premier rang desquels se place la réalisation de l'interface homme machine du cindynomètre présentée précédemment et qui sera essentielle pour l'efficacité du système. Néanmoins d'autres développements nous apparaissent nécessaires afin d'obtenir la fonctionnalité finale du système.

VIII - 4. 1. A court terme :

A court terme, il est possible d'envisager la réalisation d'un cindynomètre limité, n'utilisant que les informations sur les obstacles et sur la forme de la route pour effectuer son analyse de danger. En ne prenant pas en compte le comportement du conducteur, on élimine l'une des difficultés de réalisation du système global tout en gardant une information a priori intéressante pour le conducteur.

Dans l'état actuel des développements des algorithmes de détection des obstacles et de la route une telle approche ne fournirait de résultats fiables que dans les cas relativement simples où la route est équipée de marquages et les véhicules se déplacent dans le même sens que le véhicule hôte. Ce contexte correspond à toutes les autoroutes et voies rapides de France, ce qui offre cependant un terrain d'exercice assez large.

Cette limitation du contexte de fonctionnement du système offre un second avantage du fait de la limitation des comportements potentiels sur ce type de routes. Dans l'optique de la fiabilisation du module de prédiction des trajectoires l'apprentissage sur ce type de route des comportements des conducteurs, des différentes actions qu'ils effectuent et de la façon dont ils les effectuent semble moins contraignant. Il serait ainsi intéressant d'utiliser des véhicules équipés des technologies de détection présentées afin de générer automatiquement ces bases d'apprentissage.

On peut même imaginer insérer dans le véhicule un cindynamètre "muet" (c'est-à-dire ne donnant aucune indication au conducteur) se comportant comme une "boîte noire" recueillant les informations sur l'environnement, dans le but de créer cette base d'apprentissage.

On peut aussi proposer l'utilisation de cette "boîte noire" non seulement pour l'apprentissage du cindynamètre mais aussi pour fournir des informations déjà traitées aux constructeurs automobiles au travers de séances d'essais dédiées (les constructeurs recourent actuellement à de telles séances mais doivent par la suite analyser les données manuellement ou semi automatiquement, on proposerait alors un traitement automatique beaucoup plus rapide) ou lors des visites d'entretien (on suppose alors que le système est installé dans les véhicules vendus au public et enregistre en permanence toutes les informations).

Dans ce dernier cas, cette "boîte noire" pourrait aussi jouer un rôle similaire au rôle joué dans l'aviation civile : permettre la reconstitution des conditions ayant mené à l'accident. Une telle information profiterait à la fois aux constructeurs (pour déceler d'éventuels problèmes de conception), aux assureurs (on résoudrait plus facilement les litiges liés aux accidents) mais aussi aux accidentologues (qui se basent actuellement sur les relevés post-accidents sur les lieux de l'accident et sur la mémoire des personnes impliquées et qui disposeraient là d'informations fiables et déjà traitées).

Evidemment, la validation de l'interface homme – machine proposée sera impérative dès que l'on souhaitera utiliser le cindynamètre autrement qu'en mode "muet". Cette étape interviendrait ainsi à la fin de la phase de recueil de données. On devrait alors avoir une bonne efficacité du système globale assurant ainsi une bonne fiabilité des alarmes retournées. On ne peut en effet tester la pertinence du système d'interface homme – machine qu'une fois les sorties du cindynamètre correctement fiabilisées.

VIII - 4. 2. A moyen terme :

A moyen terme il sera nécessaire d'améliorer les algorithmes de traitement des données afin de permettre au cindynamètre de fonctionner dans davantage de contextes. Pour ce faire nous proposons les développements suivants qui permettront de recueillir des informations plus fiables sur l'environnement :

- Développements des algorithmes complémentaires de détection d'obstacles en considérant aussi les obstacles fixes (on pourra utiliser des approches du type "Shape from motion" telles que présentées dans [Fintzel 04] si l'on souhaite utiliser la vidéo comme capteur principal) et les humains ou autres objets déformables (par des approches à base de reconnaissance de formes comme dans [Abramson 05] ou [Gavrila 04]).
- Amélioration des algorithmes de détection de la route en utilisant des approches non dépendantes des marquages au sol souvent basées sur la stéréovision et l'usage de capteurs additionnels. Les équipes participant au "DARPA Grand Challenge" [DARPA 05] ont ainsi offert une magnifique démonstration technologique de l'efficacité de ces approches (même s'il faut reconnaître que l'ajout de plusieurs télémètres lasers, radars et autres capteurs est difficile dans un véhicule commercialisable).
- Développement et implémentation des algorithmes de détection de la signalisation verticale (panneaux de signalisation et feux principalement). De tels algorithmes existent actuellement et offrent de très bonnes performances d'après la littérature [Paletta 02] [Gavrila 99]. Ils commencent de plus à être disponibles dans certains véhicules. La prise en compte de la signalisation est en effet indispensable pour la bonne compréhension de l'environnement dans des scénarios urbains ou périurbains où la présence d'intersections et de feux est courante.

L'utilisation du cindynamètre dans une version ainsi améliorée permettrait de recueillir encore davantage d'informations concernant les réactions des conducteurs dans davantage de contextes et permettrait donc d'enrichir encore la base d'apprentissage du module de prédiction des trajectoires. L'utilisation du cindynamètre comme une "boîte noire" serait évidemment encore possible et souhaitable afin d'enrichir encore les différentes bases d'apprentissage du cindynamètre.

VIII - 4. 3. A long terme :

Les objectifs à long terme pour l'amélioration du cindynamètre consistent en l'utilisation des bases d'apprentissage précédemment créées pour assurer une prédiction des trajectoires fiables. Le recueil et l'analyse des informations précédentes devraient permettre la réalisation du module d'évaluation du comportement du conducteur. Ne resterait plus alors qu'à implémenter le système global et à tester son efficacité en fournissant le système complet à des pilotes d'essais.

La réalisation et l'implémentation du module de calcul de la carte d'adhérence de la route nous semblent aussi des objectifs importants à long terme. Cependant son utilité semble relativement moindre puisqu'il est possible de calculer la probabilité de perte de contrôle du véhicule en ne prenant en compte qu'une valeur arbitraire de l'adhérence de la route. En choisissant des valeurs volontairement plus faibles de l'adhérence de la route on prend en compte la quasi-totalité des situations rencontrées (sauf les cas des routes verglacées ou couvertes de gravillons) et on garde une marge de sécurité plus grande dans le cas où la route est sèche.

VIII - 4. 4. Hors du domaine automobile :

Le cindynamètre a été conçu pour tous les systèmes à risques bien que nous n'ayons développé son concept en détail que pour la conduite automobile. Il serait donc intéressant de mener une étude semblable pour d'autres systèmes à risques tels que les systèmes de contrôle – commande de processus industriels, en particulier dans l'industrie chimique et agro-alimentaire, mais également dans les systèmes ayant déjà atteint un niveau de risque faible, comme les centrales nucléaires ou l'aviation civile, afin d'étudier la faisabilité d'un cindynamètre appliqué à ces systèmes et son impact potentiel en terme de sécurité.

BIBLIOGRAPHIE

Livres et ouvrages collectifs :

[Amalberti 00] – R. Amalberti, C. Fuchs, C. Gilbert et al. – "Risques, erreurs et défaillances. Approche interdisciplinaire". CNRS - Maison des sciences de l'homme, Alpes, Mai 2000.

[Amalberti 01] – R. Amalberti – "La conduite des systèmes à risques". PUF, Paris, Juillet 2001.

[Dubois 88] – D. Dubois, H. Prade – "Théorie des possibilités. Applications à la représentation des connaissances en informatique". Ed. Masson, Paris, 1988.

[Hollnagel 06] – E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson et al. – "Resilience Engineering: Concepts and Precepts". Ashgate Publishing Co – Aldershot, UK . 2006.

[Liu 02] – B. Liu – "Theory and Practice of Uncertain Programming". Ed. Physica – Verlag Heidelberg, New-York, 2002.

[Rasmussen 86] – J. Rasmussen – "Information Processing and Human-Machine Interaction". Elsevier Science Inc., Amsterdam, 1986.

[Reason 93] – J. Reason – "L'erreur Humaine". PUF, Paris, 1993.

[Tisseron 83] – C. Tisseron – "Géométrie affine, projective et euclidienne". Collection formation des enseignants et formation continue, Ed. Hermann, Paris, 1983.

Chapitres de livres et d'ouvrages collectifs :

[Amalberti 06] – R. Amalberti – "Optimum System Safety and Optimum System Resilience: Agonistic or Antagonistic Concepts?" in [Hollnagel 06]. Chapitre 16, pp 253-271.

[Endsley 00] – M.R. Endsley – "Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review." In M.R. Endsley and D.J. Garland – "Situation Awareness Analysis and Measurement". Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 2000.

[Hale 06] – A. Hale and T. Heijer – "Defining resilience" in [Hollnagel 06]. Chapitre 3, pp 35-40.

Rapports et rapports de thèses :

[Abramson 05] – Y. Abramson – "AdaBoost/GA et filtrage particulière: La vision par ordinateur au service de la sécurité routière". Thèse de l'Ecole des Mines de Paris. Paris, 2005.

[Aubert 90] – D. Aubert, C. Thorpe – "Color Image Processing for Navigation: Two Road Trackers". CMU Technical Report CMU-RI-TR-90-09, April 1990.

[Bailly 04] – B. E. Bailly – "Conscience de la Situation des Conducteurs : Aspects fondamentaux, méthodes, et application pour la formation des conducteurs". Thèse de l'Université Lumière Lyon 3. Lyon, Décembre 2004.

[Betke 94] – M. Betke and N. C. Makris – "Fast Object Recognition in Noisy Images Using Simulated Annealing". In A.I. Memo Number 1510, December 1994

[Betke 99] – M. Betke, J. Kawai – "Gaze detection via self-organizing gray-scale units". Boston College Computer Science Department Technical Report BCCS-99-01. May 1999.

[Boeing 08] – "Statistical summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide operations 1959-2007". Aviation Safety, Boeing Commercial Airplanes. July 2008.

[Brenac 97] – T. Brenac – "L'analyse séquentielle de l'accident de la route : comment la mettre en pratique dans les diagnostics de sécurité routière". Outils et Méthodes, n° 3. Mars 1997.

[Broadhurst 04] – A. Broadhurst, S. Baker, T. Kanade – "A prediction and planning framework for road safety analysis, obstacle avoidance and driver information". CMU technical report CMU-RI-TR-04-11, February 2004.

[Coulombeau 98] – P. Coulombeau – "Système de vision des marquages au sol embarqué dans un véhicule automatisé". Rapport de DEA IARFA, Paris, Juin 1998.

[Clady 02] – X. Clady, C. Blanc, L. Trassoudaine, D. Aubert, F. Le Coat, G. Yahiaoui, F. Nashashibi, A. Bensrhair, S. Mousset – "Etat de l'art en détection d'obstacles par perception". Rapport d'avancement ARCOS Thème 1. Mai 2002.

[Dapzol 06] – N. Dapzol – "Analyse de l'Activité de Conduite par les Chaînes de Markov Cachées et les Modèles de Ruptures Multiphasiques : Méthodologie et Applications". Thèse de l'Université Claude Bernard, Lyon. 2006.

[DOT 00] – "Intersection Collision Avoidance Using ITS Countermeasures. Final report: Performance Guidelines". DOT HS 809 171 – September 2000.

[Eidehall 07] – A. Eidehall – "Tracking and threat assessment for automotive collision avoidance". Thèse de Linköpings universitet, 2007.

[Ellingstadt 70] – V.S. Ellingstadt, R.E. Hagen, K.A. Kimball – "An Investigation of the Acquisition of Driving Skills". Technical Report n° 11, University of South Dakota, Department of Psychology. 1970.

[Ellouze 97] – M. Ellouze, Y. Xuan – "Projet de l'autoroute automatisée". Rapport d'activité interne CAOR, Ecole des Mines de Paris, Paris, 1997.

[EPSF 08] – Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire (EPSF) – "Rapport sur la sécurité du réseau ferré national 2007". ISSN : 1967-0656, édité en Octobre 2008. Consulté en Février 2009 sur le site de l'EPSF : <http://www.securite-ferroviaire.fr/fr/modules/cms/fichiers/197/rapport%20de%20securite.pdf>

[Gamme 01] – D. Gamme – "Trajectographie Routière Automatique 3D". Rapport Technique CAOR, Ecole des Mines de Paris, Paris, 2001.

[Georgeon 08] – O. Georgeon – "Analyse de Traces d'Activité pour la Modélisation Cognitive : Application à la conduite automobile". Thèse de l'Université Lyon 2, Lyon. Février 2008.

[Kelly 94] – A. Kelly – "Modern Inertial and Satellite Navigation Systems". CMU Robotics Institute Technical Report CMU-RI-TR-94-15. 1994.

[Leurs 03] – B.A. Leurs and R.C.N. Wit – "Environmentally Harmful Support Measures in EU Members States". Report for DG Environment of the European Commission. Delft, January 2003.

[Mateus 01] – C. F. R. Mateus – "Monolithically MEMS Laser Beam Steering Fabricated on AlGaAs". Undergraduate report. University of California in Berkeley. December 2001.

[Neyer 99] – L. Neyer – "Evaluation quantitative des gains de sécurité à attendre pour les années à venir, des systèmes d'aide à la conduite embarqués, en liaison avec les équipements mis en place sur les autoroutes". Rapport de stage d'option Robotique de l'Ecole des Mines de Paris. 1999.

[NHTSA 06] – National Highway Traffic Safety Administration – "Vehicle Backover Avoidance Technology Study". Report to Congress, November 2006.

[Revue 03] – A. Revue – "Contribution des systèmes d'informations géographiques à la sécurité routière : approche multi capteurs pour l'évaluation de configurations à risques". Thèse de l'Ecole des Mines de Paris. 2003.

[Steux 01] – B. Steux – "RTMaps, un environnement logiciel dédié à la conception d'applications embarquées temps réel. Utilisation pour la détection automatique de véhicules par fusion radar / vision". Thèse de l'Ecole des Mines de Paris. 2001.

[Treat 77] – J. R. Treat, N.S. Tumbas, S.T. McDonald, D. Shinar, R.D. Hume, R.E. Mayer, R.L. Stanisfer and N.J. Castellan – "Tri-level study of the causes of traffic accidents." Report for the Department of Transportation No. DOT-HS-034-3-535-77 (TAC). Washington DC, USA. 1977.

[Unterhinninghofen 02] – R. Unterhinninghofen – "Trajectographie routière 3D". Mémoire de DEA, Ecole des Mines de Paris, Paris, Janvier 2002.

[Welch 95] – G. Welch, G. Bishop – "An Introduction to the Kalman Filter". University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, Chapel Hill, NC, USA. 1995.

[Wiegmann 05] – D.A. Wiegmann, S.A. Schappell, A. Bocquet, C. Detwiler, K. Holcomb and T. Faarborg – "Human Error and General Aviation Accidents: A Comprehensive, Fine-Grained Analysis Using HFACS." Final Technical Report AHFD-05-08/FAA-05-03. May 2005.

[Wybo 00] – S. Wybo – "Détection d'obstacles par vision en vue de l'amélioration de l'ACC rural par fusion de données LIDAR/vidéo". Rapport de DEA MISI, Versailles, Septembre 2000.

Articles de revues et de conférences :

[Abuhadrous 03a] – I. Abuhadrous, F. Nashashibi, C. Laugeau – "3-D Land Vehicle Localization: a Real-time Multi-Sensor Data Fusion Approach using RTMAPS". In Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics. University of Coimbra, Portugal. June 30th – July 3rd, 2003.

[Abuhadrous 03b] – I. Abuhadrous, F. Nashashibi, C. Laugeau, F. Goulette – "On-board Real-time System for Digitizing and Geo-referencing of 3D Urban Environments". In Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics. University of Coimbra, Portugal. June 30th – July 3rd, 2003.

[Amalberti 05] – R. Amalberti, Y. Auroy, D. Berwick and P. Barach – "Five Systems Barriers to Achieving Ultrasafe Health Care". In Annals of Internal Medicine, Volume 142, Issue 9, pp 756-764. May 2005.

[Ayama 00] – M. Ayama, Y. Mekada, H. Hasegawa, M. Kasuga – "Effects of visual and conversation tasks upon functional visual field while driving". In Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp 452-457. Dearborn, MI. USA. Oct. 2000.

[Barbour 98] – N. Barbour, G. Schmidt – "Inertial Sensor Technology Trends". In Proceedings of IEEE Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, pp55-62. Cambridge MA. 20-21 August 1998.

[Bertozzi 98] – M. Bertozzi, A. Broggi – "GOLD: a Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection". In IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 7, Issue 1, pp 62-81. January 1998.

[Bertozzi 05] – M. Bertozzi, A. Broggi, A. Lasagni, M. Del Rose – "Infrared Stereo Vision-based Pedestrian Detection". In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005, pages 23-28, Las Vegas, USA, June 2005.

[Broadhurst 05] – A. Broadhurst, S. Baker, T. Kanade – "Monte Carlo Road Safety Reasoning". In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005, pages 319–324, Las Vegas, USA, June 2005.

[Busch 98] – C. Busch, E. Debes – "Wavelet Transform for Analyzing Fog Visibility". In IEEE Intelligent Systems, Vol. 13, Issue 6, pp 66-71. Nov./Dec. 1998.

[Davis 05] – J.W. Davis and M.A. Keck – "A Two-Stage approach to Person Detection in Thermal Imagery". In Proceedings of the Seventh IEEE Workshops on Application of Computer Vision (WACV/MOTION'05), pp. 364-369 – Volume 1, 2005.

[DeMenthon 90] – D.F. DeMenthon, L.S. Davis – "Reconstruction of a Road by Local Image Matches and Global 3D Optimization". In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1337-1342, Cincinnati, May 1990.

[Endsley 88] – M. R. Endsley – "Design and evaluation for situation awareness enhancement". In Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting, pp 97-101 – Santa Monica, USA. 1988.

[Endsley 93] – M. R. Endsley – "Situation Awareness and Workload: Flip Sides of the Same Coin". In Proceedings of the 7th International Symposium on Aviation Psychology, April 1993.

- [Endsley 95] – M. R. Endsley – "Toward a Theory of Situation Awareness". In *Human Factors*, Volume 37, Issue 1, pp 32-64. 1995.
- [Fablet 02] – R. Fablet, M. J. Black – "Automatic detection and tracking of human motion with a view-based representation". In *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, pp. 476–491, 2002.
- [Fintzel 04] – K. Fintzel, R. Bendahan, C. Vestri, S. Bougnoux – "3D Parking Assistant System". In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles symposium*. Turin, Italy. June 2004
- [Franke 02] – U. Franke, S. Heinrich – "Fast Obstacle Detection for Urban Traffic Situation". In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 3, N° 3, pp. 173-181, September 2002.
- [Gavrila 99] – D. M. Gavrila – "Traffic Sign Recognition Revisited". In *Proceedings of the 21st DAGM Symposium für Mustererkennung*, pp. 86-93, Springer Verlag, Bonn, Germany, 1999.
- [Gavrila 04] – D. M. Gavrila, J. Giebel and S. Munder – "Vision-based Pedestrian Detection: the PROTECTOR+ System". In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Parma, Italy, 2004.
- [Han 07] – F. Han, Y. Tan, J. Eledath – "Preceding Vehicle Trajectory Prediction by Multi-Cue Integration". In *Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2007)*, pp. 575-578. Tokyo, Japan. May 16-18, 2007.
- [Hartland 02a] – C J Harland, T D Clark and R J Prance – "Electric potential probes - new directions in the remote sensing of the human body". In *Measurement Science and Technology*, Issue 13, pp 163-169. 2002.
- [Hartland 02b] – C J Harland, T D Clark and R J Prance – "Remote detection of human electroencephalograms using ultrahigh input impedance electric potential sensors". In *Applied Physics Letters*, Volume 81, number 17, 21 October 2002.
- [Hautière 03] – N. Hautière, D. Aubert – "Driving assistance: Automatic fog detection and measure of the visibility distance". In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transportation System*, Madrid, Spain, 2003.
- [Hein 00] – G.W. Hein – "From GPS and GLONASS via EGNOS to GALILEO Positioning and Navigation in the 3rd Millennium". In *GPS Solutions*, Vol.3, Issue 4, pp 39-47. April 2000.
- [Jones 96] – D. G. Jones, M. R. Endsley – "Sources of Situation Awareness Errors in Aviation". In *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Volume 67, Issue 6, pp 507-512. June 1996.
- [Kalman 60] – R.E. Kalman – "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". In *Transactions of the ASME*, pp. 35-45, Mach 1960.
- [Kluge 94] – K. Kluge – "Extracting Road Curvature and Orientation from Image Edge Points without Perceptual Grouping into Features". In *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium '94*, pp. 109-114, October 1994.
- [Langheim 99] – J. Langheim, J-F. Henrio, B. Liabeuf – "ACC Radar System 'Autocruise' with 77 GHz MMIC Radar". In *Proceedings of ATA*. Florence, 1999.
- [Langheim 00] – J. Langheim, A. J. Buchanan – "CARSENSE Sensing of Car Environment at low speed driving". In *Proceedings of ITS World Congress*. Turin, Italy, November 2000.
- [Lawton 04] – K. Lawton, E. Schrecengost – "The Sony AIBO: Using IR for maze navigation". In *Journal of the PGSS* 2004.
- [Lee 03] – L. Lee, G. Dalley, K. Tieu – "Learning pedestrian models for silhouette refinement". In *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003.
- [Lefaix 02] – G. Lefaix, E. Marchand, P. Bouthemy – "Motion-based Obstacle Detection and Tracking for Car Driving Assistance". In *Proceedings of IAPR International Conference on Pattern Recognition (ICPR'2002)*, vol. 4, pp. 74-77, Québec, Canada, August 2002.
- [Lipton 98] – A. J. Lipton, H. Fujiyoshi, R. S. Patil – "Moving Target Classification and Tracking from Real-Time Video". In *Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, 1998.

- [Liu 96] – C-S. Liu, H. Peng – “Road Friction Coefficient For Vehicle Path Prediction”. In *Vehicle System Dynamics*, Vol 25 Suppl., pp. 413-425. 1996.
- [Mallot 91] – H.A. Mallot, H. H. Bülthoff, J. J. Little, S. Bohrer – "Inverse perspective mapping simplifies optical flow computation and obstacle detection". In *Biological Cybernetics*, Issue 64, pp 177-185. 1991.
- [Masoud 97] – O. Masoud, N. P. Papanikolopoulos – "A robust real-time multi-level model-based pedestrian tracking system". In *Proceedings of the ITS America Seventh Annual Meeting*, Washington, DC, June 1997.
- [McCall 07] – J.C. McCall, D.P. Wipf, M.M. Trivedi, B.D. Rao – “Lane Change Intent Analysis Using Robust Operators and Sparse Bayesian Learning”. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems*, Vol. 8, No. 3. September 2007.
- [Nashashibi 03] – F. Nashashibi, A. Revue, C. Laugeau – "Contribution of GIS to danger prevention in curved roads". In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transportation System*, Madrid, Spain, 2003.
- [Paletta 02] – L. Paletta – "Detection of Traffic Signs Using Posterior Classifier Combination". In *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'02) - Volume 2*, 2002.
- [Pérez 03] – A. Pérez, M.L. Córdoba, A. García, R. Méndez, M.L. Muñoz, J.L. Pedraza, F. Sánchez - "A precise eye-gaze detection and tracking system". In *Proceedings of the 11th International Conference in Central Europe of Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2003 (WSCG 2003)*. Plzen, Czech Republic. 2003.
- [Rasmussen 97] – J. Rasmussen – "Risk Management in a Dynamic Society, a Modelling Problem". In *Safety Science* 27 (2-3), pp 183-214. 1997.
- [Salvucci 04] – D.D. Salvucci – “Inferring Driver Intent: A case study in lane-change detection”. In *Proceedings of the Human Factors Ergonomics Society 48th Annual Meeting*. 2004.
- [Salvucci 06] – D.D. Salvucci – “Modeling Driver Behavior in A Cognitive Architecture”. In *Human Factors*, Vol. 48, No. 2, Summer 2006, pp. 362-380.
- [Shi 94] – J. Shi and C. Tomasi. – "Good Feature to Track". In *Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Seattle, USA. June 1994.
- [Steux 02] – B. Steux, C Laugeau, L Salesse, D Wautier – "Fade: A vehicle detection and tracking system featuring monocular vision and radar data fusion". In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2002*. Versailles, France, June 18-20, 2002.
- [Summala 98] – H. Summala, D. Lambale, M. Laasko – "Driving experience and perception of the lead car's braking when looking at in-car targets". In *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 30, pages 401-407, 1998.
- [Trawen 02] – A. Trawen, P. Marasate, U. Persson – "International comparison of costs of a fatal casualty of road accidents in 1990 and 1999". In *Accident Analysis and Prevention*, Issue 34, pages 323-332. 2002.
- [Tsuji 02] – T. Tsuji, H. Hattori, M. Watanabe, N. Nagaoka – "Development of night-vision system". In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Volume 3, Issue 3, pp 203~209. Sept. 2002.
- [Van Elslande 92] – P. Van Elslande – “Les erreurs humaines en conduite automobile : mauvaise catégorisation ou activation erronée de schémas ? ». In *Intellectica*, 3(15), pp. 125-149. 1992.
- [Vestri 05] – C. Vestri, S. Bougnoux, R. Bendahan, K. Fintzel, S. Wybo, F. Abad, T. Kakinami – "Evaluation of a Point Tracking Vision System for Parking Assistance". In *Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Transportation System*. San Francisco, USA. 6-10 November 2005.
- [Watanabe 95] – T. Watanabe, N. Kishimoto, K. Hayafune, K. Yamada, N. Maede – "Development of an Intelligent Cruise Control System". In *Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1229-1235, 1995.

[Winsum 00] – W. van Winsum, K.A. Brookhuis, D. de Waard – "A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (TLC) during car driving". In Accident Analysis and Prevention, Vol. 32, pages 47 – 56. 2000.

[Witte 00] – K. Witte, W.A. Donohue – "Preventing Vehicle Crashes at Grade Crossings: the risk seeker challenge". In Accident Analysis and Prevention, Vol. 32, pages 127-139. 2000.

[Wybo 03a] – S. Wybo, A. Khammari, F. Nashashibi, C. Laugeau – "Improved environment understanding using géolocalisation". In Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transportation System, Madrid 2003.

[Wybo 03b] – S. Wybo, Présentation à ARCOS 2003, Satory, France. Juin 2003.

[Wybo 06] – S. Wybo, R. Bendahan, S. Bougnoux, C. Vestri, F. Abad, T. Kakinami – "Movement Detection for Safer Backward Maneuvers". In Proceedings of the Intelligent Vehicles symposium. Tokyo, Japan. June 2006.

[Wybo 07] – S. Wybo, R. Bendahan, S. Bougnoux, C. Vestri, F. Abad, T. Kakinami – "Improving Backing-up Maneuvers Safety with Vision-Based Movement Detection". In IET Intelligent Transport Systems - Volume 1, Issue 2, p. 150-158. June 2007.

[Yu 97] – B. Yu, A. Jain – "Lane boundary detection using a multiresolution Hough transform". In Proceedings of ICIP '97, Vol. 2, pp. 748 – 751. 1997.

[Zadeh 65] – Zadeh L.A. – "Fuzzy sets". In Information and control, Vol. 8, pages 338-353, June 1965.

[Zhao 98] – L. Zhao, C. Thorpe – "Qualitative and quantitative car tracking from a range image sequence". In Proceedings of CVPR '98, Santa Barbara, CA, June 23-25, pp. 496-501, 1998.

Brevets et brochures commerciales :

[Eckardt 05] – A. Eckardt, H. Driescher – "Exterior mirror or rear-view mirror for a motor vehicle". World Patent WO2005123453. 2005.

[Hough 62] – P.V.C. Hough – "Method and means for recognizing complex patterns". U.S. Patent 3,069,654. 1962.

[Mickeler 04] – R. Mickeler, M.-T. Schneider – "Control device for a vehicle electrochromic rear-view mirror, comprises at least three sensors mounted near or in the mirror itself for monitoring front, rear and over the vehicle lighting conditions". German Patent DE10313465. 2004.

[Sony 04] – Brochure 2004 sur le chien robot AIBO de Sony

Publications internet:

[AFIL] – Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne – AFIL. Description sur le Site de Citroën : <http://www.citroen.com/CWW/fr-FR/TECHNOLOGIES/SECURITY/AFIL/AFIL.htm>

[ARCOS 04] – Site du projet ARCOS : <http://www.arcos2004.com>

[ASFA 02] – Site de l'ASFA, données 2002 : http://www.autoroutes.fr/fr/p_res_securite1.htm

[ASFA 04] – Site de l'ASFA, données 2004 : <http://www.autoroutes.fr/securite/bilan.php>

[ASN] – Site de l'autorité de sûreté nucléaire : <http://www.asn.gouv.fr/divers/ines/echelleines.asp>

[CAR2CAR] – Site du consortium Européen Car2Car : <http://www.car-to-car.org>

[Comet] – Article Wikipedia sur le Comet : http://en.wikipedia.org/wiki/De_Havilland_Comet

[DARPA 05] – <http://www.darpa.mil/grandchallenge05/index.html> Site du DARPA Grand Challenge

[Gestalt] - <http://www.gestalttheory.net/fr/> Site de la Société pour la théorie de la Gestalt et ses applications, dernier accès en Avril 2009.

[MEDAD] – http://www.ecologie.gouv.fr/article.php3?id_article=2445 Site du ministère de l'écologie

[MobilEye] – Site de MobilEye : <http://www.mobileye.com/eyeQ.shtml>

[NOAA-NGS] – Site du National Geodetic Survey : <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/CorsPP/WA-SlideShow/index.htm> Using CORS Workshop presentation. Dernier accès Avril 2009.

[NRC] – Rapport de l'US Nuclear Regulatory Commission sur l'accident de Three Miles Island : <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.pdf>

[OACI] – Historique de l'OACI : http://www.icao.int/cgi/goto_m_f.pl?icao/fr/hist/history02_f.htm

[PanAm] – Site dédié à l'histoire de la Pan-Am : <http://www.panamair.org>

[Rocket] - http://en.wikipedia.org/wiki/Stephenson%27s_Rocket Article Wikipedia sur la “Rocket” de Stephenson, accédé en Mars 2009.

[Sécurité 07] – Données accidentologie routière 2007 sur : <http://www.securite-routiere.gouv.fr>

[SteamHorse] – http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_Horse_locomotive Article Wikipedia sur la steam horse, accédé en Mars 2009.

[Tenerife] – Article Wikipedia sur Tenerife : http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Ténérife

[TMI-2 a] – Article Wikipedia sur TMI-2 : http://fr.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island

[TMI-2 b] – Site dédié à l'accident de TMI-2 : <http://www.tmia.com/accident/28.html>

[Trevithick] – http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick#Railway_locomotive. Article Wikipedia sur Richard Trevithick, accédé en Mars 2009

Publications dans la presse généraliste :

[Croize 02] – Jean-Paul CROIZE, Le Figaro du Mardi 22 Janvier 2002

[Got 02] – Claude GOT, Le Figaro du Mardi 22 Janvier 2002.

ANNEXE A – CATASTROPHE DE THREE MILES ISLAND

Le 28 Mars 1979, une panne du circuit de refroidissement secondaire du réacteur n°2 de la centrale de Three Miles Island (TMI-2), Pennsylvanie, Etats-Unis, entraîna (après d'autres pannes secondaires et de multiples erreurs des opérateurs de la centrale) la fusion de plus de la moitié du cœur du réacteur. Cette accident est classé 5 sur l'échelle internationale des évènements nucléaires (INES : International Nuclear Events Scale) qui compte 7 échelons (Figure 180) l'échelon 7 correspondant à la catastrophe de Tchernobyl.



Figure 180 : Illustration de l'échelle INES [ASN]

A - 1. La centrale de Three Miles Island

La centrale nucléaire de Three Miles Island et plus particulièrement son réacteur n°2 (que l'on désigne par le sigle TMI-2 et dont on donne le schéma Figure 181) est une centrale utilisant la technologie PWR, c'est-à-dire dont le circuit primaire de refroidissement utilise de l'eau pressurisée à environ 150 bars afin de rester à l'état liquide à la température de fonctionnement du réacteur (320°C).

Dans une telle centrale, en fonctionnement normal, l'eau est pompée à haute pression dans le circuit primaire et circule dans le cœur afin d'en extraire la chaleur. L'eau ainsi chauffée est ensuite amenée à un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur la chaleur du circuit primaire est transférée au circuit secondaire par le biais de la vaporisation de l'eau circulant dans ce dernier. Cette vapeur est ensuite amenée aux turbines présentes dans l'enceinte secondaire afin de générer de l'électricité.

Une enceinte de confinement entoure le réacteur et le circuit primaire afin d'éviter toute fuite radioactive dans l'environnement. L'eau circulant dans le circuit primaire est radioactive et circule donc en circuit fermé pour ne pas contaminer l'enceinte. Le circuit secondaire quant à lui n'entre pas en contact avec des éléments radioactifs et n'est donc pas radioactif.

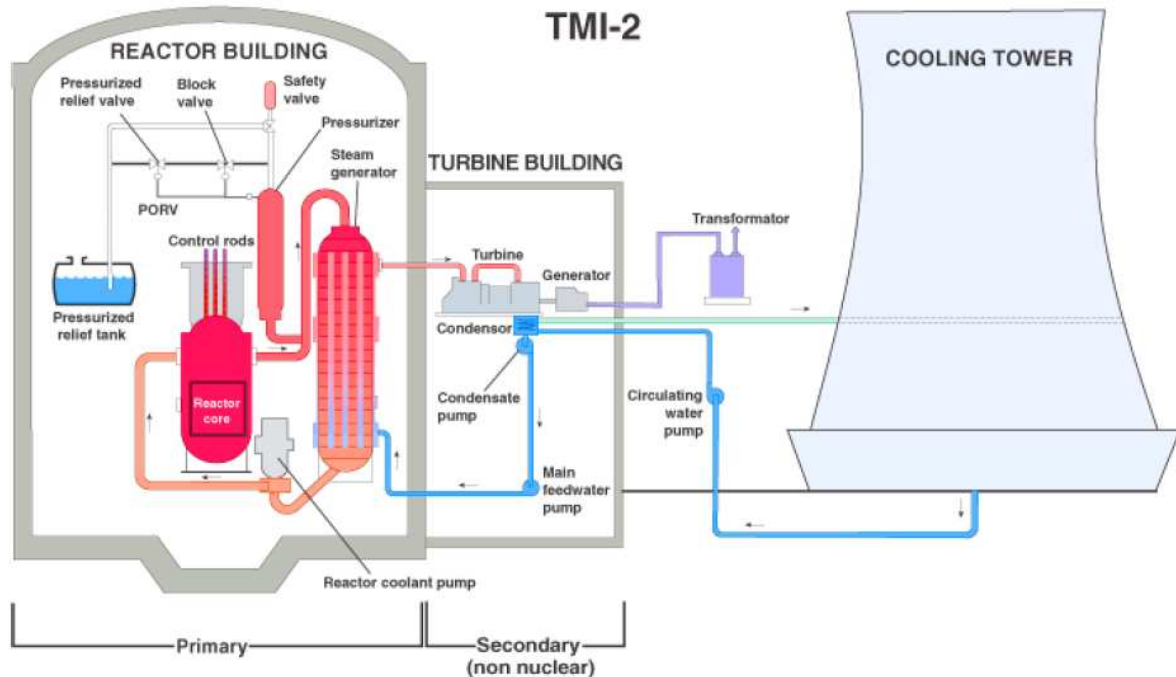


Figure 181 : Schéma du réacteur TMI-2 [NRC]

A - 2. Séquence des évènements [NRC][TMI-2 a]

L'accident commença aux alentours de 4 heures du matin le 28 Mars 1979. Une panne électrique ou mécanique dans le circuit secondaire (Secondary) entraîna l'arrêt des pompes principales d'alimentation (Main feedwater pump) empêchant l'évacuation de la chaleur des générateurs de vapeurs (Steam generator). La turbine et le réacteur s'arrêtèrent alors automatiquement. La hausse de température causée par la défaillance du circuit secondaire entraîna immédiatement une hausse de la pression à l'intérieur du circuit primaire (Primary). Afin d'éviter une hausse excessive de cette pression, la soupape de décharge (Pressurized relief valve) du pressuriseur (Pressurizer) fut ouverte par l'opérateur depuis la salle de contrôle. Cette soupape aurait alors dû se refermer automatiquement lorsque la pression du circuit primaire serait redescendue à une valeur acceptable. Malheureusement, la soupape ne se referma pas. Dans le même temps, les indicateurs visibles par l'opérateur depuis la salle de contrôle n'indiquèrent pas cette défaillance mais au contraire la fermeture de la soupape. Cette dissonance entre l'état de la soupape et celui de l'indicateur correspondant provient du fait que le voyant utilisé n'indiqua pas la fermeture de la soupape mais la transmission correcte de l'ordre de fermeture. La pression dans le circuit primaire continua donc à baisser à mesure que l'eau s'écoulait par cette soupape.

La baisse de pression dans le circuit primaire entraîna le démarrage automatique du circuit d'injection de sécurité (non représenté), chargé d'amener de l'eau dans le circuit primaire. A mesure que la pression baissait des bulles de vapeur se formèrent dans le circuit primaire, entraînant l'élévation du niveau d'eau dans le pressuriseur. L'opérateur, ne disposant pas d'une indication directe de la quantité d'eau présente dans le circuit mais seulement de la hauteur d'eau dans le pressuriseur, il en conclut que le circuit primaire était plein et arrêta donc manuellement le circuit d'injection de sécurité. La baisse de pression dans le circuit primaire continuant (la soupape de décharge étant toujours ouverte) l'eau se mit à bouillir peu de temps après à la sortie du cœur du réacteur.

Le mélange de vapeur et d'eau sortant de la soupape de décharge était dirigé vers un réservoir de décharge prévu à cet effet (Pressurized relief tank). Au bout d'une dizaine de minutes ce réservoir fut rempli, amenant à la rupture des disques de décharge prévus pour une telle éventualité. Dès cet instant, l'eau radioactive s'échappant du circuit de refroidissement primaire se vidait directement dans l'enceinte de confinement (qui constitue l'ultime barrière de confinement de la radioactivité).

Après plus d'une heure de vidange du circuit accompagné par une augmentation de la température, les pompes du circuit primaire (Reactor coolant pump) se mirent à trembler à force de pomper plus de vapeur que d'eau. Leur coupure fut décidée afin d'éviter d'endommager les pompes et la tuyauterie, la théorie prévoyant que le liquide de refroidissement continuerait à circuler grâce à la convection naturelle. Malheureusement, cette circulation naturelle ne put s'effectuer du fait de l'hydrogène déjà piégé dans les générateurs de vapeur accélérant ainsi l'évaporation de l'eau restante dans le circuit primaire. La température au sein du réacteur favorisa la réaction entre la vapeur et le revêtement en zirconium, entraînant la formation d'hydrogène et dégradant fortement la gaine du combustible. Ceci conduisit au relâchement d'éléments radioactifs dans le circuit primaire et donc dans l'enceinte de confinement.

Au fur et à mesure de ces événements, des officiels de la centrale avaient rejoint le poste de commande de TMI-2 afin de suivre l'évolution de la situation en temps réel. Cette accumulation d'officiels dans la salle de commande ajouta un stress supplémentaire aux opérateurs déjà submergés sous les alarmes et mis face à une situation jamais rencontrée.

Plus de deux heures après le début de l'accident, la vanne d'isolement (Block valve) située en aval de la soupape de décharge fut finalement fermée par les opérateurs espérant ramener ainsi le réacteur sous contrôle. Les opérateurs décidèrent ensuite de relancer une des pompes du circuit primaire. Le faible niveau de l'eau encore présent dans le circuit primaire entraîna une forte dégradation des éléments combustibles en partie émergés. Les opérateurs arrêtaient la pompe 19 minutes plus tard à cause des très fortes vibrations causées par le pompage du mélange eau – vapeur et rouvrirent 5 minutes la vanne d'isolement pour faire retomber la pression dans le circuit primaire. L'eau, fortement contaminée par les éléments du cœur, qui s'échappa alors du circuit primaire déclencha alors les alarmes d'irradiation. Les opérateurs comprirent alors que le cœur du réacteur avait été fortement dégradé et en déduirent que le circuit primaire manquait sûrement d'eau. Ils décidèrent alors de remettre en service l'injection de sécurité, remettant ainsi le cœur partiellement fondu sous l'eau et stabilisant ainsi la situation.

Le circuit d'injection de sécurité envoyant de l'eau à très haute pression dans le circuit primaire, il fallut, dans les quatre heures qui suivirent, ouvrir et fermer successivement la vanne d'isolement afin de maintenir une pression acceptable (ce qui était le rôle de la soupape défaillante normalement). Ceci amena encore à relâcher des centaines de mètres cubes d'eau contaminée dans l'enceinte de confinement.

Près de dix heures après le début de l'accident, une partie de l'hydrogène contenu dans l'enceinte de confinement explosa mais heureusement sans endommager celle-ci. Cette explosion ne fut d'ailleurs pas remarquée ni comprise par les opérateurs qui rapportèrent avoir entendu un "*thud*" [TMI-2 b] et avoir constaté un pic de pression dans l'enceinte vite attribué à un dysfonctionnement des instruments.

Pendant les heures qui suivirent, les opérateurs tâchèrent de remplir le circuit primaire en eau, ce qui fut difficile puisque de grandes quantités d'hydrogène étaient piégées dans les points hauts du générateur de vapeur. Enfin, la situation se stabilisa, et les pompes du circuit primaire furent finalement remises en service près de 16 heures après le début de l'accident. L'état du réacteur était très dégradé, mais permettait néanmoins de refroidir le combustible qui, même partiellement fondu, allait continuer de produire de la chaleur pendant des années...

A - 3. Les conséquences écologiques de l'accident

Contrairement à l'accident de Tchernobyl qui intervint 7 ans plus tard, l'accident de Three Miles Island n'eut pas de conséquences graves pour l'environnement de la centrale. Les études indépendantes menées après l'accident de la centrale lui attribuèrent une surexposition de l'ordre de 1 millirem à comparer aux 100 à 125 millirems annuellement reçus par la population locale du fait de la radioactivité naturelle. Toutes les études menées conclurent à une très faible dissémination de nucléotides dans l'environnement, la quasi-totalité de la radioactivité étant restée contenue dans l'enceinte de confinement.

La décontamination du réacteur numéro 2 de la centrale de Three Miles Island commencée en 1980 prit fin en 1993. Le combustible du réacteur, les débris dus à l'accident ainsi que l'eau contaminée furent évacués du site et envoyés dans des sites de stockage adaptés. Le site est depuis sous surveillance en attendant la fin de l'exploitation de TMI-1 et le démantèlement du site.

A - 4. L'impact de l'accident sur l'industrie nucléaire

Les enquêtes sur les causes de l'accident de TMI-2 révélèrent une série de pannes techniques (soupape de décharge bloquée en position haute), de défauts de conception (pas d'indicateur de remplissage du circuit primaire, seulement de hauteur d'eau dans le générateur de vapeur) et d'erreurs humaines du personnel. L'impact de la révélation de l'accident sur le public ainsi que la crainte et la perte de confiance de celui-ci envers l'industrie nucléaire, entraînaient une série de changements dans la façon dont la NRC (Nuclear Regulatory Commission, l'organisme gérant les licences d'exploitation des centrales nucléaires américaines) contrôlait les sociétés opératrices de centrales nucléaires. Ces changements se firent par le biais de contrôles plus sévères et plus étendus des centrales et de leur mise en œuvre, ainsi que par le biais de changements profonds dans la formation des opérateurs et dans l'équipement des centrales nucléaires. Nous citons ci-dessous quelques-unes des mesures prises par la NRC depuis l'accident pour améliorer la sécurité des installations nucléaires [NRC].

- Mise à jour et renforcement de la conception des centrales et des exigences concernant les équipements requis (ce qui inclut les équipements de protection anti-feu, les canalisations, les systèmes auxiliaires d'alimentation en eau, l'isolation de l'enceinte de confinement, la robustesse de certains éléments tels les soupapes de décharge et les coupe-circuits électriques, ainsi que la possibilité pour les centrales de s'arrêter automatiquement).
- Prise de conscience de l'aspect critique de la performance des opérateurs humains dans la sécurité de la centrale. Changement de la formation des opérateurs et dans les critères de sélection de ceux-ci. Amélioration de l'instrumentation et des contrôles pour le pilotage de la centrale et établissement de programmes d'aptitude au travail pour prévenir l'utilisation d'alcool et de drogue.
- Amélioration des instructions pour éviter les signaux dissonants qui perturbèrent les opérations durant l'accident.
- Amélioration de la préparation à la gestion de crise par la mise en place d'un centre de réponse aux urgences du NRC disponible 24 heures sur 24. Des exercices de mise en situation sont désormais effectués plusieurs fois par an afin de tester les procédures d'urgence.
- Etablissement d'une publication périodique et publique intégrant les observations, découvertes et conclusions du NRC sur la performance et l'efficacité des compagnies opérant les centrales.
- Mise en place d'analyses régulières de la performance des centrales pour identifier celles nécessitant plus d'attention de la part de l'organisme de régulation.
- Expansion du programme d'inspecteurs résidents démarré en 1977 qui impose deux inspecteurs du NRC vivant près des installations et travaillant uniquement dans chacune des centrales américaines pour fournir une surveillance journalière du respect des réglementations du NRC.
- Extension de l'usage d'inspections orientées vers les performances et la sécurité. Utilisation de l'évaluation des risques pour identifier les vulnérabilités potentielles des installations nucléaires à des accidents sévères.
- Renforcement et réorganisation de l'organisme d'application au sein du NRC.
- Création de l'INPO (Institute of Nuclear Power Operations) constituant l'organe de régulation interne à l'industrie et création du Nuclear Energy Institute pour uniformiser l'approche des industriels aux réglementations nucléaires.
- Installation d'équipements supplémentaires dans les installations afin de réduire les conditions d'accidents et leurs conséquences et afin de contrôler les niveaux de radiation et l'état des installations.
- Mise en place d'une initiative majeure de retour d'expérience permettant la collecte et le partage rapide des informations concernant les problèmes de sécurité de façon à partager les expériences.
- Extension des activités internationales du NRC afin de partager une meilleure connaissance de la sûreté nucléaire avec d'autres pays.

Cette meilleure coopération entre les différentes compagnies gérant les sites nucléaires ainsi qu'avec les autres pays nucléaires permit de grandes avancées en matière de sécurité nucléaire. Les dispositions prises ici constituent en fait l'adoption d'une véritable culture de la sécurité nucléaire. Des changements similaires furent apportés dans la plupart des autres pays utilisant l'énergie nucléaire. Néanmoins, malgré l'application de ces nouvelles règles, la méfiance du public américain envers l'énergie nucléaire depuis cet accident a empêché à ce jour la construction de toute nouvelle centrale.

A - 5. Analyse de l'accident

L'accident de Three Miles Island trouve sa source comme nous l'avons signalé dans une succession de défaillances techniques et d'erreurs humaines générées par le manque de compréhension de la nature des problèmes en cours causé par le stress dû à la situation, la mauvaise interprétation des indicateurs proposés aux opérateurs (et la mauvaise conception de ces indicateurs qui n'indiquent pas la grandeur mesurée mais une valeur dérivée de cette mesure dans des conditions normales d'utilisation) ainsi que l'inadéquation des procédures suivies par les opérateurs (les opérateurs ne disposant alors que de procédures à suivre en réaction à des événements et non à l'état du système). On voit ainsi apparaître un motif récurrent dans la plupart des accidents technologiques, à savoir une dégradation progressive de la situation (ici la fuite du circuit primaire due à la soupape de décharge) dont les indices sont ignorés ou mal interprétés par les opérateurs.

ANNEXE B – CATASTROPHE DE TENERIFE

Les accidents technologiques ne concernent pas uniquement les centrales nucléaires ou les grandes usines chimiques. Ainsi, le transport de passagers ou de marchandises est-il régulièrement victime d'accidents, souvent mineurs mais qui, lorsqu'ils sont importants, ont des conséquences humaines catastrophiques. Ainsi la collision entre deux Boeing 747 au décollage, le 27 Mars 1977 sur l'aéroport Los Rodeos de Tenerife, constitue encore à ce jour la plus grande catastrophe aérienne au monde. Elle entraîna la mort de 583 personnes et modifia profondément les procédures et systèmes dans l'aviation commerciale.

B - 1. Situation de la catastrophe

Le 27 Mars 1977 une bombe explosa dans l'aérogare de l'aéroport Las Palmas (îles Canaries) amenant à l'évacuation du terminal. De plus la menace d'un second attentat sur l'aéroport entraîna le déroutement de la plupart des vols en approche vers l'aéroport voisin de Los Rodeos sur l'île de Tenerife (voir Figure 182 pour un plan de situation des Canaries). Du fait de ce déroutement et de la petite taille de l'aéroport de Los Rodeos (une seule piste et un seul taxiway) le parking ainsi qu'une partie du taxiway étaient utilisés pour garer les avions ayant atterri. Enfin, l'aéroport de Los Rodeos ne disposait pas d'un radar de piste pour guider les avions au sol, bien que situé en altitude près de la mer et régulièrement couvert par des nuages bas en cette période de l'année.

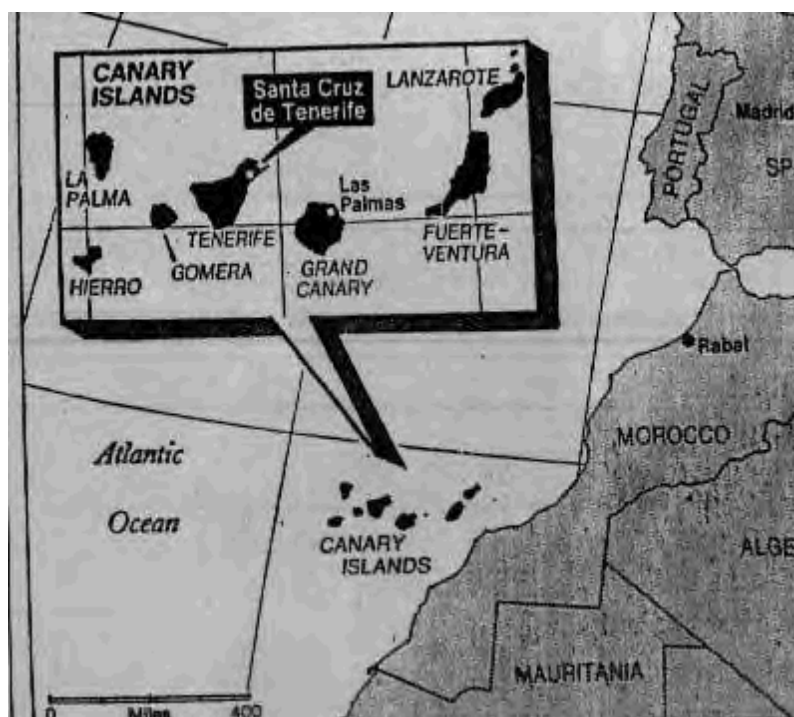


Figure 182 : Vue de situation des îles Canaries

B - 2. Séquence des évènements [Tenerife] [PanAm]

Le vol Pan Am 1736 a décollé de l'aéroport international de Los Angeles à destination de l'aéroport de Las Palmas Canaries via New York JFK. Le vol KLM 4805, un vol charter rempli de passagers néerlandais, a décollé 4 heures auparavant de l'aéroport de Schiphol. La destination des 2 avions est Las Palmas aux Canaries. Les deux appareils sont des Boeing 747.

Suite à la fermeture de l'aéroport de Las Palmas consécutive à l'attentat à la bombe les deux vols sont détournés vers l'aéroport de Los Rodeos sur l'île voisine de Tenerife. Les deux appareils se retrouvèrent donc garés sur l'aéroport de Los Rodeos en attendant la réouverture de l'aéroport de Las Palmas.

Lorsque l'aéroport de Las Palmas rouvre, l'aéroport de Tenerife est saturé, au moins cinq appareils gros porteurs (dont les vols Pan Am et KLM) étant déjà stationnés sur le taxiway. Cet encombrement du taxiway oblige donc les appareils à remonter à contre sens une partie de la piste jusqu'à atteindre la zone libre du taxiway.

Le commandant du vol KLM, souhaitant perdre le moins de temps possible afin de se conformer à la nouvelle réglementation néerlandaise gérant la durée de vol des équipages, met à profit le temps passé sur le taxiway pour refaire le plein de ses réservoirs afin de pouvoir repartir le plus rapidement possible de Las Palmas.

Au moment de la réouverture le l'aéroport de Las Palmas, le Boeing 747 de la Pan Am est prêt à se positionner pour décoller mais se retrouve bloqué par l'appareil de la KLM qui finit le remplissage de ses réservoirs. Une fois le plein effectué, l'appareil de la KLM se prépare à décoller suivi par le vol Pan Am. Il remonte alors entièrement la piste pour se positionner en bout de piste, prêt à décoller. Pendant ce temps le Boeing de la Pan Am remonte lui aussi la première partie de la piste conformément aux instructions de la tour de contrôle (Figure 183). Il doit ensuite rejoindre la partie libre du taxiway par la voie de service 3 (au lieu de la voie 4 qui forme un angle avec la piste beaucoup plus ouvert et donc beaucoup plus facilement négociable par un appareil aussi gros que le 747). Du fait du brouillard dense couvrant alors la piste de décollage aucun des deux appareils ne pouvait voir l'autre.

Arrivé en bout de piste l'appareil de la KLM s'aligne avec la piste et informe la tour de contrôle qu'il s'apprête à décoller. Ici une erreur de compréhension dans l'anglais parlé entraîne des conséquences dramatiques. En effet, alors que l'équipage du vol KLM indiquait qu'il s'apprêtait à décoller, le contrôleur aérien comprit que l'appareil était en attente de l'autorisation de décollage (selon la procédure normale). Il confirma donc d'un simple "OK" le message du vol KLM puis indiqua qu'il devait attendre l'autorisation de décollage (take-off clearance). Malheureusement au même moment le vol Pan Am indiqua à la tour de contrôle qu'il était encore sur la piste. Ce message provoqua des interférences dans le signal reçu dans le cockpit du vol KLM. L'équipage de celui-ci ne perçut donc que partiellement le message du vol Pan Am à la tour de contrôle indiquant qu'il se trouvait toujours sur la piste. En effet, à cause du fort brouillard ou à cause de l'angle trop grand formé par la sortie 3 le Boeing de la Pan Am avait raté la sortie 3 et se trouvait à ce moment entre les sorties 3 et 4.

L'ingénieur de vol de la KLM exprima néanmoins ses doutes sur le fait que la piste soit libre à son commandant. Le commandant du vol (l'un des plus expérimenté de la compagnie KLM et l'instructeur ayant formé son copilote) ne tint pas compte de ces doutes et entama le décollage. Quelques instants plus tard le pilote de la Pan Am apercevait le 747 de KLM arrivant sur lui à plus de 300 km/h et vira sur la gauche afin d'éviter la collision. Dans le même temps, le pilote du vol KLM tenta un décollage anticipé en cabrant l'appareil entraînant un contact entre la queue de l'appareil et la piste. Malheureusement, aucune de ces deux manœuvres ne permit d'éviter la collision. Le Boeing 747 KLM heurta donc par le flanc droit l'appareil de la Pan Am entraînant la destruction quasi-totale des deux appareils. La collision fit 583 victimes alors que 64 personnes, toutes assises à l'avant du Boeing de la Pan Am, survécurent.

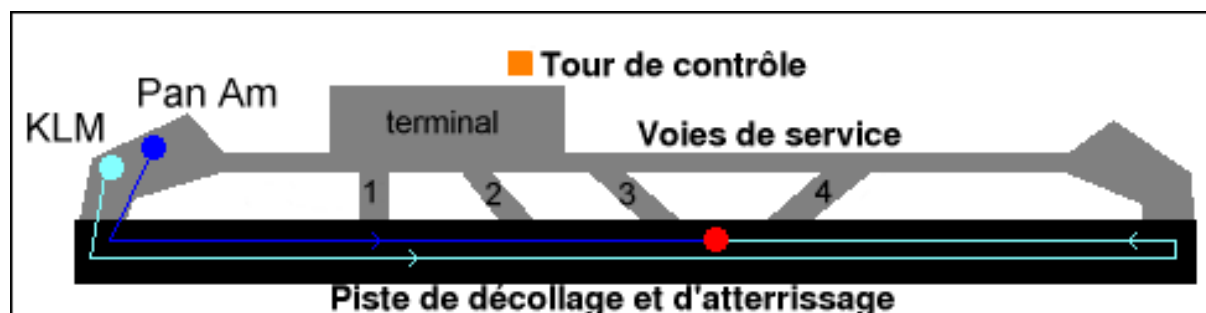


Figure 183 : Plan de situation de l'aéroport de Los Rodeos et trajectoire des deux appareils.

B - 3. Les causes de l'accident

Face à l'émotion générée par cette catastrophe, une grande enquête fut ouverte réunissant plus de 70 experts aéronautiques ainsi que des représentants des deux compagnies. Les conclusions de cette enquête démontrèrent plusieurs erreurs humaines ayant entraîné la catastrophe. Il faut aussi souligner le rôle majeur joué par le brouillard dans cet accident puisqu'il empêcha les deux appareils de se voir et permis donc à cette catastrophe d'avoir lieu.

Les conclusions du rapport d'expertise de l'OACI démontrèrent que le commandant de bord du 747 de la KLM n'avait pas attendu l'autorisation de décollage (il semble qu'il augmentait déjà les gaz en vue du décollage alors que son second répétait les instructions de décollage de la tour). Le départ anticipé de l'appareil de la KLM serait aussi dû à une interprétation différente de la phrase "we are now at takeoff" entre le contrôleur et le copilote. Le contrôleur a compris cette phrase comme "nous sommes en position de décollage" alors que le pilote aurait signifié "nous décollons". Le "OK" de la tour signifié donc que le plan de vol avait bien été répété alors que le copilote compris ceci comme une autorisation de décollage. Les interférences entre le message de la Pan Am et la fin du message du contrôleur ne permirent d'entendre dans le cockpit du vol KLM ni l'information de la présence du vol Pan Am sur la piste, ni la demande d'attente d'autorisation de décoller du contrôleur. Le rapport d'expertise pointa de plus certains facteurs aggravants qui rendirent cette catastrophe possible.

Les contrôleurs de la tour de contrôle, probablement stressés par une situation peu commune de gestion de gros appareils et par la nécessité de faire toutes les communications en anglais, semblèrent manquer de fermeté face à des équipages de vols internationaux qualifiés. Ce manque de fermeté dans les ordres peut avoir été une des causes du non respect des consignes par le commandant du vol KLM.

Le pilote de la Pan Am n'a pas respecté les consignes en ne sortant pas à la bretelle 3. Il semble qu'une des bretelles n'ait pas été comptée alors que l'appareil passait devant peut être à cause du manque de visibilité mais l'hypothèse d'un choix délibéré pour prendre la bretelle 4 beaucoup plus facile a été émise.

L'équipage du vol KLM semble de plus avoir été stressé par de multiples facteurs tels que la marge de temps restant pour faire repartir l'appareil de Las Palmas avant d'être contraint par la réglementation néerlandaise de passer la nuit sur place; la visibilité faible et changeante qui ajoutée à la panne de l'éclairage central de la piste risquait d'empêcher le décollage de l'appareil; la réaction des passagers à ce retard. Il semble que ces facteurs de stress aient influencé le commandant du vol KLM qui semble absent dans les dernières phases précédant l'accident.

B - 4. Conséquences de la catastrophe sur l'aviation civile

À l'aune de cette catastrophe un certain nombre de mesures furent prises afin d'éviter la répétition d'un tel accident. Le vocabulaire anglais utilisé dans la communication entre tour de contrôle et cockpit fut modifié et normalisé afin de réduire le risque de mauvaise interprétation des consignes. La répétition par les pilotes des ordres entendus à la tour de contrôle devint systématique. Enfin et surtout, une procédure dite de "cockpit management" assurant un contrôle mutuel plus formalisé entre les différents membres d'équipage fut mise en place. Des formations régulières sur cette procédure sont effectuées par les compagnies aériennes. Cette procédure a été conçue pour éviter que le pilote puisse ne tenir aucun compte de l'avis de son copilote et du chef mécanicien comme cela s'est produit dans le cockpit du vol KLM.

Quelques années plus tard un nouvel aéroport fut construit sur l'île de Tenerife dans une zone moins exposée au brouillard et aux nuages bas.

B - 5. Analyse de l'accident

La catastrophe de Tenerife est la résultante d'une combinaison exceptionnelle de défaillances dans l'exécution des procédures causées par le stress de la situation et par des contraintes extérieures (nouvelle norme néerlandaise sur le temps de travail des pilotes), d'incompréhension (de dissonances) entre les différents acteurs (mauvaise interprétation du vocabulaire utilisé par le contrôleur et le copilote, non prise en compte des doutes de l'ingénieur de bord), de conditions dégradées (piste non prévue pour une telle situation forçant les avions à remonter la piste pour pouvoir décoller, visibilité réduite, interférences radio, panne de l'éclairage central de la piste) et de manque de mesures de sécurité supplémentaires (radar de piste par exemple).

On retrouve ainsi, bien que dans une situation complètement différente, le même type de causes que lors de l'accident de Three Miles Island. Encore une fois, la dégradation des conditions normales du système crée un stress pour les opérateurs qui ignorent ainsi certains indices de l'accident en cours (pour TMI-2) ou à venir (dans le cas de Tenerife, la non prise en compte des communications de l'appareil de la Pan Am ou des doutes de son ingénieur de bord par le commandant du vol KLM).

ANNEXE C – FORMULES DE RECONSTRUCTION 3D

On utilise ici les notations présentées dans le chapitre dédié à la détection et à la reconstruction tridimensionnelle de la route.

On rappelle que l'on a (1) :

$$\begin{cases} u = u_\infty + \frac{Z(\cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi) - Y \cos\Theta \cos\Phi}{x \cos^2\Phi \cos^2\Psi + Y \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi - Z \cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi} k_u f \\ v = v_\infty + \frac{Y \sin\Theta \cos\Phi - Z(\cos\Theta \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi)}{x \cos^2\Phi \cos^2\Psi + Y \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi - Z \cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi} k_v f \end{cases}$$

On pose (2) :

$$\begin{cases} Nu_Y = -\cos\Theta \cos\Phi \\ Nu_Z = (\cos\Theta \sin\Phi \sin\Psi - \sin\Theta \cos\Psi) \\ Nv_Y = \sin\Theta \cos\Phi \\ Nv_Z = -(\cos\Theta \cos\Psi + \sin\Theta \sin\Phi \sin\Psi) \\ D_X = \cos^2\Phi \cos^2\Psi \\ D_Y = \cos^2\Phi \cos\Psi \sin\Psi \\ D_Z = -\cos\Phi \sin\Phi \cos\Psi \end{cases}$$

En réinjectant (2) dans (1) on obtient (3) :

$$\begin{cases} u - u_\infty = \frac{Nu_Y Y + Nu_Z Z}{D_X x + D_Y Y + D_Z Z} k_u f \\ v - v_\infty = \frac{Nv_Y Y + Nv_Z Z}{D_X x + D_Y Y + D_Z Z} k_v f \end{cases}$$

On cherche maintenant à exprimer Y et Z en fonction de x à partir de (3). On obtient donc le système d'équations (4) à résoudre en fonction de x :

$$\begin{cases} [D_Y(u - u_\infty) - Nu_Y k_u f] Y = [Nu_Z k_u f - D_Z(u - u_\infty)] Z - D_X(u - u_\infty) x \\ [D_Y(v - v_\infty) - Nv_Y k_v f] Y = [Nv_Z k_v f - D_Z(v - v_\infty)] Z - D_X(v - v_\infty) x \end{cases}$$

On en tire donc (5) par combinaison linéaire des lignes de (4) :

$$\begin{cases} [(D_Y Nv_Z k_v f - D_Z Nv_Y k_v f)(u - u_\infty) + (D_Z Nu_Y k_u f - D_Y Nu_Z k_u f)(v - v_\infty) + (Nu_Z Nv_Y - Nu_Y Nv_Z) k_u k_v f^2] Y = D_X x f [Nu_Z k_u (v - v_\infty) - Nv_Z k_v (u - u_\infty)] \\ [(D_Y Nu_Z k_u f - D_Z Nu_Y k_u f)(u - u_\infty) + (D_Z Nv_Y k_v f - D_Y Nv_Z k_v f)(v - v_\infty) + (Nu_Z Nv_Y - Nu_Y Nv_Z) k_u k_v f^2] Z = D_X x f [Nu_Y k_u (v - v_\infty) - Nv_Y k_v (u - u_\infty)] \end{cases}$$

On en tire la relation (6) :

$$\begin{cases} Y = \frac{D_X [Nu_Z k_u (v - v_\infty) - Nv_Z k_v (u - u_\infty)]}{k_v (D_Y Nv_Z - D_Z Nv_Y)(u - u_\infty) + k_u (D_Z Nu_Y - D_Y Nu_Z)(v - v_\infty) + (Nu_Z Nv_Y - Nu_Y Nv_Z) k_u k_v f^2} x \\ Z = -\frac{D_X [Nu_Y k_u (v - v_\infty) - Nv_Y k_v (u - u_\infty)]}{k_v (D_Y Nv_Z - D_Z Nv_Y)(u - u_\infty) + k_u (D_Z Nu_Y - D_Y Nu_Z)(v - v_\infty) + (Nu_Z Nv_Y - Nu_Y Nv_Z) k_u k_v f^2} x \end{cases}$$

On exprime maintenant les différents produits présents dans (6) :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_x Nu_z = \cos^2 \Phi \cos^2 \Psi (\cos \Theta \sin \Phi \sin \Psi - \sin \Theta \cos \Psi) \\ D_x Nv_z = -\cos^2 \Phi \cos^2 \Psi (\cos \Theta \cos \Psi + \sin \Theta \sin \Phi \sin \Psi) \\ D_x Nu_y = -\cos \Theta \cos^3 \Phi \cos^2 \Psi \\ D_x Nv_y = \sin \Theta \cos^3 \Phi \cos^2 \Psi \\ D_y Nv_z - D_z Nv_y = \cos^2 \Phi \cos^2 \Psi (\sin \Theta \sin \Phi \cos \Psi - \cos \Theta \sin \Psi) \\ D_z Nu_y - D_y Nu_z = \cos^2 \Phi \cos^2 \Psi (\sin \Theta \sin \Psi + \cos \Theta \sin \Phi \cos \Psi) \\ Nu_z Nv_y - Nu_y Nv_z = -\cos \Phi \cos \Psi \end{array} \right.$$

En réinjectant ces simplifications dans (6) on obtient les équations (7) de liaison exactes liant Y et Z à x :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = \frac{\cos \Phi \cos \Psi [k_u (\cos \Theta \sin \Phi \sin \Psi - \sin \Theta \cos \Psi) (v - v_\infty) + k_v (\cos \Theta \cos \Psi + \sin \Theta \sin \Phi \sin \Psi) (u - u_\infty)]}{k_v \cos \Phi \cos \Psi (\sin \Theta \sin \Phi \cos \Psi - \cos \Theta \sin \Psi) (u - u_\infty) + k_u \cos \Phi \cos \Psi (\sin \Theta \sin \Psi + \cos \Theta \sin \Phi \cos \Psi) (v - v_\infty) - k_u k_v f^x} \\ Z = \frac{\cos^2 \Phi \cos \Psi [k_u \cos \Theta (v - v_\infty) + k_v \sin \Theta (u - u_\infty)]}{k_v \cos \Phi \cos \Psi (\sin \Theta \sin \Phi \cos \Psi - \cos \Theta \sin \Psi) (u - u_\infty) + k_u \cos \Phi \cos \Psi (\sin \Theta \sin \Psi + \cos \Theta \sin \Phi \cos \Psi) (v - v_\infty) - k_u k_v f^x} \end{array} \right.$$

On peut maintenant calculer directement les coordonnées Y et Z de tout point de l'image en ne connaissant que ses coordonnées image et la valeur de sa coordonnée x. Dans le cas qui nous intéresse (marquages de bord de route) cette dernière peut être obtenue, soit en posant des hypothèses sur la forme de la route (par le biais d'une équation liant les coordonnées x, y et z), soit en utilisant plusieurs points liés par des équations de contrainte. C'est une combinaison de ces deux méthodes que nous avons utilisée.

Title:

Assisting driving of risky systems by considering risk level: Example of an application to automotive driving.

Abstract:

Nowadays, risky systems are encountered in everyday life, from nuclear power plants to civilian air transport or individual vehicle driving. Driving such systems is greatly different from one system to the next. Yet, an essential factor is shared among all these systems. Situation awareness and risk awareness in particular drive any such system driving. Failure in correctly understanding the driving situation can result in driving in degraded conditions that are riskier and thus have more probability of an accident.

This thesis thus proposes a driving assistant system aimed at improving risky systems safety. To reach this goal it is proposed to assess current risk level and to inform the driver to bring him to safer driving conditions. This concept is then applied for automotive driving. This thesis proposes an implementation of such an automotive driving assistant system based on multi sensors data fusion to assess environment, driver and vehicles states. Such fusion is later used by the system to understand current driving situation, predict its evolution to predict the risks applied to the driver and his vehicle so as to inform the driver afterwards.

Keywords :

Risky systems, driving assistance, automotive driving, situation awareness, multi-sensors data fusion, obstacles detection, road detection, trajectory prediction

AUTEUR : Sébastien WYBO

TITRE : Aide à la conduite des systèmes à risques par la prise en compte du risque : Exemple de l'application à la conduite automobile.

DIRECTEUR DE THESE : Bernard PAVARD

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : 19 Janvier 2010 à TOULOUSE

RESUME en français :

Les systèmes à risques peuplent aujourd'hui notre quotidien, qu'il s'agisse des centrales nucléaires, du transport aérien ou de l'automobile individuelle. La conduite de ces systèmes diffère grandement entre chaque système. Cependant, un facteur essentiel est commun à chacun de ces systèmes. La conscience de la situation et en particulier la conscience du risque encouru conditionne en effet toute conduite d'un tel système. La défaillance de cette conscience de la situation peut ainsi entraîner des conduites en conditions dégradées plus risquées qui ont plus de risques d'accidents.

Cette thèse propose ainsi un concept d'aide à la conduite visant à améliorer le niveau de sûreté de ces systèmes à risques. Pour ce faire on propose d'évaluer le niveau de risque courant et d'en informer le conducteur afin de l'inciter à rester dans une conduite sûre. Ce travail de thèse s'attache ensuite à proposer une telle aide appliquée au domaine de la conduite automobile et en propose une implémentation basée sur l'utilisation de la fusion de données multi capteurs pour détecter l'état de l'environnement, du véhicule et de son conducteur. Cette fusion de données permet par la suite au système de comprendre la situation de conduite courante et d'anticiper son évolution afin de prédire les risques encourus puis d'en informer le conducteur.

MOTS-CLES : Systèmes à risques, aide à la conduite, conduite automobile, conscience de la situation, fusion de données multi-capteurs, détection d'obstacles, détection de route, prédiction de trajectoire.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Informatique

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE : IRIT, Université Paul Sabatier, 118 Route de Narbonne, 31062 TOULOUSE Cedex 9 - FRANCE