HAL
open science

Contribution des systèmes d'informations géographiques à la sécurité routière : approche multicapteurs pour l'évaluation de configurations à risques

Alexandre Revue

▶ **To cite this version:**

Alexandre Revue. Contribution des systèmes d'informations géographiques à la sécurité routière : approche multicapteurs pour l'évaluation de configurations à risques. domain_other. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003. Français. NNT : 2003ENMP1147 . pastel-00000833

HAL Id: pastel-00000833

https://pastel.hal.science/pastel-00000833v1

Submitted on 6 Aug 2010

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

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

ECOLE DES MINES
DE PARIS
Collège Doctoral

N° attribué par la bibliothèque
|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité «Informatique temps réel-Robotique-Automatique»

présentée et soutenue publiquement
par
Alexandre REVUE

le 20 mars 2003

CONTRIBUTION DES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES A LA SECURITE ROUTIERE : APPROCHE MULTICAPTEURS POUR L'EVALUATION DE CONFIGURATIONS A RISQUES

Directeur de thèse : Fawzi NASHASHIBI

Jury

M.	Said Mammar	Rapporteur
Me.	Michèle Rombaut	Rapporteur
M.	Patrick Jean	Examinateur
M.	Claude Laurgeau	Examinateur
M.	Roger Pagny	Examinateur
M.	François Peyret	Examinateur
M.	Tullio Tanzi	Examinateur

Table des matières

INTRODUCTION **9**

CHAPITRE 1 : SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES (SIG) **15**

1.1 LE POSITIONNEMENT PAR GPS 16
1.1.1 Historique *16*
1.1.2 Positionnement de précision *17*
1.2 LES FORMATS DE CARTOGRAPHIE 20
1.2.1 Représentation des données *20*
1.2.2 Le format GDF *21*
1.2.3 Le format MapInfo *21*
1.2.4 Le format ArcInfo *22*
1.2.5 Le format SDAL *22*
1.3 METHODES DE LOCALISATION 23
1.3.1 L'approche géométrique *23*
1.3.2 L'approche topologique *25*
1.3.3 Autres approches *26*
1.3.4 La méthode retenue pour nos travaux *27*
1.4 DE NOUVELLES APPLICATIONS POUR LES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES 27
1.4.1 La signalétique embarquée *28*
1.4.2 L'annonce de points noirs *30*
1.4.3 Des perspectives nouvelles *30*

CHAPITRE 2 : ETUDES D'ACCIDENTOLOGIE **33**

Qu'est-ce que l'accidentologie ? *34*
2.1 LE CONDUCTEUR 37
2.2 L'INFRASTRUCTURE 38
2.2.1 Les intersections *38*
2.2.2 Les virages *41*
2.2.3 Profil en long *42*
2.2.4 le milieu urbain *42*
2.3 SCENARIOS D'ACCIDENTS 42
2.3.1 Les accidents en intersection *43*
2.3.2 Les accidents en virages *45*

CHAPITRE 3 : PERTE DE CONTROLE EN VIRAGE **49**

3.1 RAPPEL SUR LES ACCIDENTS EN VIRAGES 50
3.2 LE MODELE DYNAMIQUE DU TRICYCLE 50
3.2.1 Modélisation des trajectoires *52*
3.3 LES ACCIDENTS EN VIRAGES 54
3.3.1 arrivée sur virages simples *54*
3.3.2 arrivée en virages, avec considération de trajectoires *57*

3.3.3 Cas d'une trajectoire de Reeds et Shepp *58*
3.3.4 Cas d'une trajectoire de Dubins *60*
3.3.5 Représentation des résultats attendus *67*

CHAPITRE 4 : ARRIVEE SUR INTERSECTION, ANTICIPATION DE COLLISIONS ENTRE VEHICULES 71

4.1 ARRIVEE SUR VEHICULES S'APPRETANT A TOURNER, UNE APPROCHE SIMPLE 72
4.2 ARRIVEE SUR VEHICULE S'ENGAGEANT LATERALEMENT SUR UNE INTERSECTION 74
4.3 DETECTION DE COLLISIONS DANS LE CAS GENERAL 76
4.3.1 Cas des arrivées sur intersections *80*
4.3.2 Prise en compte de la taille des véhicules *81*

CHAPITRE 5 : LA MESURE DU RISQUE, EXPERIMENTATION ET VALIDATION 83

5.1 VALIDATION SUR SIMULATEUR : 84
5.1.1 le programme RARS *85*
5.1.2 Estimation de risque de perte de contrôle en virage *87*
5.1.3 Estimation de risque de collision *90*
5.1.4 Le programme RACER *91*
5.1.5 Estimation de risque de perte de contrôle en approche de virage *92*
5.1.6 Estimation de risque de perte de contrôle à l'intérieur d'un virage *94*
5.2 VALIDATION SUR DONNEES REELLES 96
5.2.1 L'instrumentation du véhicule *97*
5.2.2 Acquisition et exploitation de données : l'environnement RT-maps *100*
5.2.3 Calibrage de la caméra *101*
5.2.4 Traitement de la perte de contrôle en virage *105*
5.2.5 Traitement du risque de collision en intersection *110*
5.2.6 Résultats sur scénarios en données réelles *128*
5.3 SYNTHESE ET PERSPECTIVES SUR LA MISE EN APPLICATION DE NOS ALGORITHMES 130

CONCLUSION 133

BIBLIOGRAPHIE 137

ANNEXES 145

ANNEXE A **147**

ANNEXE B **153**

5.3.1 Le World Geodetic System (WGS 84) *153*
5.3.2 La Nouvelle Triangulation de la France (NTF) *154*

Table des figures

Figure 1 : positionnement spatial par trois satellites 16
Figure 2 : Illustration de la « Dilution of Precision » 18
Figure 3 : correction différentielle 19
Figure 4 : limitation du matching point à point : attribution erronée du point GPS au segment B au lieu de A 23
Figure 5 : limitation du matching point à segment 24
Figure 6 : intérêt de la distance courbe à courbe 25
Figure 7 : Intérêt de l'approche topologique 26
Figure 8 : L'intérieur du véhicule instrumenté 28
Figure 9 : le tableau de bord numérique 28
Figure 10 : Le tableau de bord en utilisation normale 29
Figure 11 : le tableau de bord intégrant la signalétique 29
Figure 12 : le tableau de bord du démonstrateur 30
Figure 13 : Problématique du champ de vision pour une intersection en courbe 40
Figure 14 : Sorties de route observées sur virages à droite 47
Figure 15 : Sorties de route observées sur virages à gauche 47
Figure 16 : Modèle tricycle 51
Figure 17 : trajectoire suivant Reeds et Shepp 52
Figure 18 : trajectoire suivant une courbe de Dubins 54
Figure 19 : approche simple du problème des virages 55
Figure 20 : Perte de contrôle par courbure locale excessive 57
Figure 21 : Trajectoire de rattrapage 59
Figure 22 : Première étape de correction de trajectoire 60
Figure 23 : Seconde étape de correction de trajectoire 61
Figure 24 : Localisation du point limite P 62
Figure 25 : Correction de trajectoire en deux étapes 62
Figure 26 : Lieu du point limite P 63
Figure 27 : portion de clothoïde de courbure évoluant entre courbure courante c_0 (point Q) et courbure maximale autorisée $c_{\max}$ (point P) 64
Figure 28 : Lieu du point P pour O2 quelconque 65
Figure 29 : Localisation du point de sortie 66
Figure 30 : Configuration initiale 67
Figure 31 : temps de rattrapage en fonction de la courbure et de l'orientation initiale du véhicule (angle initial en radians et courbure en mètres) 68
Figure 32 : temps de rattrapage en fonction de la courbure du virage et celle de la trajectoire du véhicule 69
Figure 33 : suivi de véhicule sur intersection 72
Figure 34 : Schéma récapitulatif du traitement des arrivées sur véhicule tournant 74
Figure 35 : arrivée sur véhicule de profil 75
Figure 36 : schéma récapitulatif de la détection de véhicules de profil 75
Figure 37 : Volume de positions possibles 77
Figure 38 : Détection et quantification d'une collision possible 78
Figure 39 : représentation schématique du calcul de risque de collision 79
Figure 40 : contre-exemple pour ce critère de mesure de risque 79
Figure 41 : exemple de pondération des positions possibles par une distribution de probabilités 80

Figure 42 : Le simulateur RARS avec rendu OpenGL....85
Figure 43 : le simulateur en rendu 2D....86
Figure 44 : Le modèle de friction du revêtement au sol en fonction de la vitesse du véhicule....87
Figure 45 : Le circuit expérimental....88
Figure 46 : la trajectoire du véhicule....88
Figure 47 : courbure de la piste en fonction du temps....89
Figure 48 : temps de réaction (en secondes) maximal autorisé au conducteur, en fonction du temps....90
Figure 49 : Suivi de véhicule présentant peu de risques de collision : temps de réaction autorisé = 4.77s....91
Figure 50 : suivi de véhicule présentant un fort risque de collision : temps de réaction autorisé = 1.46s....91
Figure 51 : Modèle de friction suivant les forumules de Pacejka....92
Figure 52 : Trajectoires effectuées dans des conditions variables....93
Figure 53 : Profil des vitesses pour chaque trajectoire suivie....93
Figure 54 : Estimation du temps de réaction autorisé pour chaque scénario....94
Figure 55 : Trajectoires empruntées dans les différents scénarios....95
Figure 56 : Profil de vitesse au coursde chacun de ces scénarios....95
Figure 57 : temps de réaction autorisé pour chacun des scénarios....96
Figure 58 : Le véhicule instrumenté du Centre de Robotique....97
Figure 59 : L'environnement RT-Maps....101
Figure 60 : La mire de calibration....104
Figure 61 : horizon électronique....105
Figure 62 : Traitement de l'horizon électronique : conversion des segments de route dans le repère relatif au véhicule....106
Figure 63 : Détection de masquages statiques par la végétation....107
Figure 64 : distance segment à segment....107
Figure 65 : Validation et invalidation d'hypothèses : seuillage par hystérésis....108
Figure 66 : Positionnement du véhicule sur la voie....109
Figure 67 : décélération requise en arrivée sur virage....109
Figure 68 : Module de détection d'ombres....115
Figure 69 : module de détection de lignes horizontales et verticales....115
Figure 70 : module de détection de symétrie....116
Figure 71 : Réseau bayésien employé pour la fusion de données....117
Figure 72 : Ligne de visée....119
Figure 73 : Représentation simplifiée de l'environnement....119
Figure 74 : création d'hypothèses....120
Figure 75 : Schéma récapitulatif de la détection de véhicules de profil....121
Figure 76 : détection de masquages statiques sur intersection....122
Figure 77 : masquage dynamique de véhicules arrêtés....123
Figure 78 : masquage dynamique de véhicules en déplacement....124
Figure 79 : Modèle de véhicule considéré....125
Figure 80 : suivi d'hypothèses avec évolution de taux de fiabilité....126
Figure 81 : Détection de clignotant....126
Figure 82 : détection de feux stop....127
Figure 83 : Seuillage d'une image bimodale....148
Figure 84 : Relation entre les coordonnées réelles et les coordonnées projectives....150

Introduction

Ce travail de thèse réalisé au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris a pour sujet principal une réflexion appliquée sur différents dispositifs pouvant être intégrés dans les véhicules automobiles actuels ou à venir, et susceptibles de fournir au conducteur une information riche et complète concernant son environnement, et notamment la présence de dangers éventuels liés à sa conduite. La conception et la mise en œuvre de tels dispositifs requiert avant toute chose une connaissance détaillée des phénomènes d'accidents routiers, permettant ensuite d'aboutir à une modélisation cohérente de différents risques d'accidents, qui pourront au final servir à évaluer des conditions de conduite réelles ou simulées.

L'insécurité routière en quelques chiffres

Au sein de la délégation interministérielle à la sécurité routière, l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière a en charge de rassembler l'information relative aux accidents que ce soient les statistiques ou les études pour aider à mieux orienter la politique de sécurité routière.
Pour mieux comprendre les accidents, il faut en connaître les circonstances exactes : lieu, type de véhicule, type d'usager etc. : c'est le rôle du *fichier national des accidents corporels* qui débouche sur un certain nombre de publications et d'études et en particulier le rapport annuel « *la sécurité routière en France* ».

Ce rapport montre qu'en 2001, les statistiques de la sécurité routière en France ont révélé le chiffre désolant de 162 105 victimes d'accidents de la route dont 8 160 morts ainsi que 153 945 blessés (dont 26 192 blessés graves).

Les causes d'accidents connues aujourd'hui du public sont : l'excès de vitesse, ivresse au volant, fatigue ou défaillance technique du véhicule. Celles-ci ne sont pas forcément classées dans l'ordre de leur importance mais correspondent à la perception habituelle des raisons de ces accidents. Très peu de gens reconnaissent dans ces éléments une prédominance du facteur humain que ce soit directement dans l'élément qui a causé l'accident (ivresse, manque de vigilance, excès de vitesse, …) ou indirectement (contrôle technique non effectué, profil de conduite inadapté, etc.).

Les acteurs clés de la conduite sont au nombre de trois : le conducteur, le véhicule et l'infrastructure. Ces trois acteurs sont intimement liés et interagissent en permanence tout le long de la conduite.

L'infrastructure agit sur le véhicule puisque les contraintes géométriques (la forme de la route par exemple) ou mécaniques (nature de la route ou du revêtement) peuvent influer la tenue du véhicule et son adhérence. A l'infrastructure, nous pouvons rajouter comme facteur externe l'environnement en général dont les éléments (comme le temps ou les conditions atmosphériques par exemple) sont des acteurs principaux pendant la conduite.
La relation conducteur-infrastructure provient du fait que le conducteur, à travers ses cinq sens, intègre les éléments percevables de son environnement proche, interprète la

situation de conduite puis élabore un profil de conduite approprié qui lui est propre. Les décisions prises par le conducteur se traduisent par un profil de conduite (position et vitesse du véhicule sur la route) qui agit sur son environnement proche.
Enfin, si le conducteur est le seul maître de son véhicule qu'il considère comme simple outil, ce dernier constitue une véritable extension sensorielle pour l'homme sur la route lui procurant beaucoup d'informations (e.g. les phares la nuit pour améliorer la perception ou le klaxon pour avertir ou – au contraire - détecter la présence d'un véhicule occulté).

Les études accidentologiques ont montré la responsabilité directe du conducteur dans la majorité des accidents de la route; celui-ci étant le seul acteur contrôlant dynamiquement les paramètres de la conduite et la variation de la configuration géométrique. En effet, l'infrastructure peut être non-coopérative ou dégradée (e.g. lignes de marquage effacées, feux tricolores en panne, éclairage public défaillant, …), le véhicule peut également avoir ses limitations dues à ses caractéristiques cinématiques et mécaniques et à ses composants (mode de roulement, usures des composants, capacités d'adhérence, etc.). En revanche, le conducteur a des défaillances dues à son caractère et à ses états psychiques et physiques (fatigue physique ou mentale, inconscience, maladie, ivresse, …).
Les résultats de ces défaillances sont l'hypovigilance et la mauvaise prise de décision due à un mauvais jugement de la situation accidentogène. La fatigue ou l'ivresse relèvent de hypovigilance alors qu'une mauvaise prise de décision peut se manifester par exemple par une mauvaise négociation d'un virage ou d'un dépassement.
Comment surmonter ces défaillances pour réduire ou annihiler les risques d'accidents ? L'hypovigilance représente un état psychomoteur inférieur à l'état nominal nécessaire à la conduite; parfois, elle peut se manifester par des gestes ou des signes apparents : clignements anormaux des yeux, relâchement ou prise ferme du volant, bâillements, etc. La détection de ces signes apparents constitue une des techniques classiques utilisées dans les systèmes d'aide à la conduite.

Des dispositifs de sécurité modernes

Les constructeurs automobiles sont actuellement particulièrement concernés par les problèmes de sécurité à bord de leurs véhicules. Les principales innovations récentes concernent en effet des modifications du véhicule de façon à diminuer le risque d'occurrence d'un accident (dispositifs de sécurité dits secondaires ou tertiaires), ou de limiter les conséquences que peuvent avoir les accidents lorsque ceux-ci sont inévitables (dispositifs de sécurité dits primaires).
C'est ainsi qu'ont été développé et progressivement généralisés des équipements tels que l'ABS (anti-lock braking system), l'ACC (Adaptive Cruise Control), l'airbag, ou les dispositifs d'anti-patinage. Mais quel que soit le niveau d'intervention de ces dispositifs ou le principe de leur fonctionnement, toutes ces innovations ont comme particularité commune de nécessiter à chaque fois une instrumentation supplémentaire du véhicule, que ce soit sous la forme d'un capteur, d'un calculateur ou d'un élément mécanique supplémentaire. Cette nécessité est souvent problématique pour les constructeurs comme pour les usagers, pour des raisons de coûts bien entendu mais également des raisons de convivialité, certains dispositifs étant souvent mal exploités par les conducteurs.

Le GPS : un capteur sous-exploité ?

En parallèle du développement des systèmes de sécurité, de nombreux éléments de confort prennent également place dans l'habitacle de nos véhicules. C'est notamment le cas du GPS (Global Positioning System), utilisé de plus en plus fréquemment dans des appareils de navigation, et qui est sur le point de devenir un composant standard des véhicules modernes.

Or le GPS est également un capteur très puissant dont les possibilités sont certainement sous-exploitées dans les seules applications de navigation. En effet ce capteur permet de faciliter l'accès à une très grande quantité d'informations présentées sous la forme de bases de données cartographiques et pouvant concerner l'environnement direct du conducteur.
La perception et la compréhension de l'environnement sont des tâches particulièrement délicates parmi celles que le conducteur est censé effectuer en permanence, et pour lesquelles toute défaillance peut devenir source de danger. Il s'agit également des défaillances que les dispositifs de sécurité actuels sont incapables de compenser.

Une façon de pallier ces défaillances est d'étendre les capacités de perception humaines et de lui fournir des systèmes d'aide l'avertissant de la présence ou de l'imminence d'une situation accidentogène. Cette prévention des risques s'appuiera donc en premier sur un système multi-capteurs adéquat, intégrant notamment les systèmes d'informations géographiques. Quant aux systèmes de décision et d'alerte, contrairement aux systèmes actuels qui alertent d'un danger immédiat tels que les régulateurs de vitesse (ACC: Autonomous/Adaptive Cruise Control), leur tâche serait d'anticiper les risques à venir. Les noyaux de ces systèmes seraient des algorithmes informatiques mettant l'intelligence artificielle au service de la sécurité routière. Les données d'entrée de ces algorithmes seront donc les données des capteurs embarqués renseignant sur l'environnement "matériel visible" (cibles avant, route, marquages, etc.) mais aussi ceux qui renvoient des informations plus sémantiques tels que la nature des voies, leur géométrie, la présence ou la proximité d'une intersection, les limitation de vitesse, etc.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons donc particulièrement aux systèmes d'informations géographiques utilisés actuellement dans les véhicules légers, qu'il s'agisse de modèles de série ou de prototypes. Ce premier chapitre inclut donc une description sommaire du fonctionnement d'un récepteur GPS, ainsi que les principes de base de localisation sur une carte numérique à partir des données retournées par ce capteur. Pour ce niveau encore simple d'utilisation du GPS, nous verrons qu'il est déjà possible de mettre au points des dispositifs d'assistance au conducteur innovants, tels que la signalétique embarquée et l'annonce de sites dangereux.

Mais ces applications sont encore trop sommaires comparées à la richesse des données auxquelles le GPS nous donne accès. En effet la description de l'environnement figurant sur les bases de données cartographiques couplée à des capteurs de perception permettrait une évaluation plus complète de l'état sécuritaire d'un véhicule en fonction de l'infrastructure traversée. Après une étude plus complète des mécanismes d'accidents qui sera décrite dans le second chapitre, nous considèrerons donc dans un troisième chapitre une exploitation possible de ces informations pour prévenir des scénarios de perte de contrôle en virage qui constituent une part importante des accidents liés à l'infrastructure (cette information ayant été confirmée par des études accidentologiques menées en partenariat avec le LAB, Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique). Dans ce

chapitre nous décrirons dans un premier temps les mécanismes de ces accidents afin de bien comprendre les éléments accidentogènes concernés, puis par une modélisation adéquate du comportement des véhicules nous aboutissons à des algorithmes permettant d'estimer quantitativement un risque de perte de contrôle.

A ce stade, nous n'aurons traité que l'interaction du conducteur avec l'infrastructure routière. Or le danger peut bien entendu provenir d'autres sources, et notamment des autres usagers de la route. Cet élément étant trop important pour pouvoir être négligé, nous consacrerons donc un quatrième chapitre à la prévention de risques de collisions avec d'autres véhicules, mais en appuyant toujours notre raisonnement sur notre connaissance de l'infrastructure acquise grâce aux systèmes d'informations géographiques (SIG). Comme dans le chapitre précédent, l'anticipation des risques ne pourra se faire que par la définition d'un modèle dynamique des différents acteurs de ces scénarios.

Enfin ces différentes façon d'aborder la question du risque au cours de la tâche de conduite seront testées dans le chapitre 5. Pour ce faire, nous aurons recours à la fois à des scénarios réalisés par simulation, et à des enregistrements de données réelles tentant de reproduire aussi fidèlement que possible les conditions d'utilisation d'un dispositif d'assistance au conducteur.

Chapitre 1 : Systèmes d'informations géographiques (SIG)

Ce chapitre est entièrement consacré aux systèmes d'informations géographiques (SIG) et à leurs applications actuelles dans les véhicules automobiles. Nous verrons dans un premier temps comment le système GPS a évolué au cours des années, de ses origines militaires jusqu'à ses applications civiles actuelles. Mais le GPS seul ne peut fournir qu'une information brute de positionnement absolu par rapport au globe terrestre, et ce n'est que couplée à une base de données cartographiques que cette information peut nous être utile : la tâche consistant à mette en correspondance le positionnement brut du GPS avec les données figurant sur une carte constitue donc une pièce essentielle d'un SIG, dont dépendront souvent les performances des systèmes exploitant ces informations. Après une brève description des principaux formats de cartographie utilisés actuellement, nous verrons donc les principales règles permettant de procéder à cette tâche dite de *map-matching*. Arrivés à ce stade, nous pourrons logiquement décrire les premières applications directes des SIG dans le cadre d'assistance au conducteur, ces applications simples reposant uniquement sur les données inexploitées pouvant figurer dans les bases cartographiques.

1.1 Le positionnement par GPS

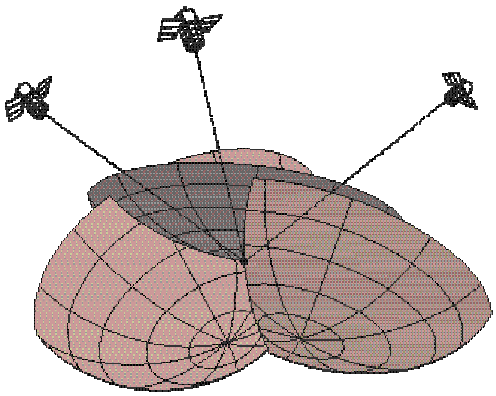


Figure 1 : positionnement spatial par trois satellites

1.1.1 Historique

Les premiers projets de localisation par réception de signaux satellites datent des années soixante : dans le cadre de la guerre froide, l'importance croissante sur le plan stratégique des sous-marins avait mis en évidence le besoin de pouvoir obtenir un positionnement absolu d'un navire, quelle que soit sa position sur l'océan. Afin d'y parvenir, l'armée américaine mit en place le NNSS (US Navy Navigation Satellite System). Le principe de ce système reposait alors sur la mesure du décalage en fréquence (effet Doppler) des signaux émis par un satellite situé en orbite basse (1100 km). Il permettait un positionnement de l'utilisateur avec une précision de 35 mètres environ si ce dernier était immobile, mais cette imprécision pouvait aller jusqu'à 400m si l'utilisateur était en mouvement. Les conditions d'utilisation étaient également assez contraignantes, les satellites n'étant visibles que par tranches de 6 heures, et le calcul de la position exigeait une observation du satellite pendant 10 à 15 minutes.

En 1972, ce système fut remplacé par le TIMATION (TIMe navigATION), qui avait pour avantage de synchroniser les différentes sources au moyen d'horloges atomiques embarquées par les satellites. Les informations de distance étaient pour la première fois déduites du temps de vol des signaux, et cette solution a ensuite été conservée jusque dans les systèmes actuels.

Le système GPS actuel fut mis en place par l'US Air Force, de 1973 à 1979. Ce système a pour spécificité une modulation pseudo-aléatoire des signaux. La constellation de 24 satellites situés en orbite haute de 20180 km garantit une visibilité permanente d'un nombre suffisant de satellites en tout point du globe.

Le principe de fonctionnement des GPS actuels repose donc sur la mesure du temps de vol de signaux émis par des satellites équipés d'horloges atomiques. La connaissance de la distance du récepteur à chacun de ces satellites permet d'en calculer la position par triangulation. Un nombre minimal de satellites est donc nécessaire afin d'obtenir un positionnement fiable du récepteur.

Jusqu'à mai 2000, les récepteurs civils étaient soumis à une dégradation de performances, pour des raisons de sécurité militaire : la position des satellites en orbite n'était diffusée aux utilisateurs civils qu'avec une précision de 200m. Ce brouillage a été supprimé par le gouvernement américain, afin d'améliorer la compétitivité du système GPS face aux prochaines constellations de satellites concurrentes. L'incertitude du positionnement d'un GPS civil est ainsi passée de 100m à environ 10m.

1.1.2 Positionnement de précision

Différents phénomènes peuvent diminuer la performance de la localisation par GPS. Outre la dégradation volontaire des données par l'armée américaine qui n'est plus d'actualité aujourd'hui, les signaux sont également perturbés par la traversée de différentes couches de l'atmosphère.
C'est notamment lors de la traversée de l'ionosphère (couche constituée de particules chargées, à plus de 20 km de la surface de la planète) que les signaux radio sont le plus susceptibles d'être perturbés de façon imprévisible. En effet la densité électronique de cette couche atmosphérique varie beaucoup en fonction des conditions « météorologiques » de l'espace, et notamment du rayonnement solaire. Or cette densité électronique a une influence directe sur la vitesse de propagation des signaux, et donc sur les temps de vol des signaux qui la traversent. La troposphère (couche basse de l'atmosphère : 0 à 10 km d'altitude) joue également son rôle dans la modification des signaux GPS, puisque sa teneur variable en vapeur d'eau modifie son indice de réfraction et donc également le temps de vol des signaux.
Comme le système GPS repose sur le calcul de ces temps de vol, ces perturbations introduisent ainsi un biais quasiment constant pour une zone donnée d'utilisation du récepteur GPS, puisque toutes les émissions des satellites sont soumises aux mêmes conditions atmosphériques.

A cela s'ajoutent des perturbations d'ordre matériel : des erreurs au niveau des horloges des récepteurs ou de la précision de l'orbite des satellites peuvent conduire à un écart sensible du positionnement.
Plus localement au récepteur, la précision de la localisation peut très facilement être faussée par le phénomène de multi-trajet (réflexion des signaux GPS sur des éléments de l'infrastructure et notamment sur les bâtiments élevés) qui retourne vers le récepteur des signaux dont le temps de vol aura été supérieur à celui des signaux ayant atteint le récepteur directement, faussant ainsi l'estimation de la distance au satellite correspondant.
Enfin la qualité du positionnement peut également dépendre de la constellation de satellites visibles par le récepteur : non seulement un nombre minimal de quatre satellites est nécessaire pour obtenir un positionnement complet, mais la disposition géométrique de ces satellites dans le ciel joue également un rôle important dans la qualité de la localisation. La qualité d'une constellation de satellites est quantifiée par la Dilution of Precision (DOP), que l'on peut séparer en HDOP (dilution horizontale) et VDOP (dilution verticale).

Des solutions ont été développées afin de compenser certaines de ces erreurs.

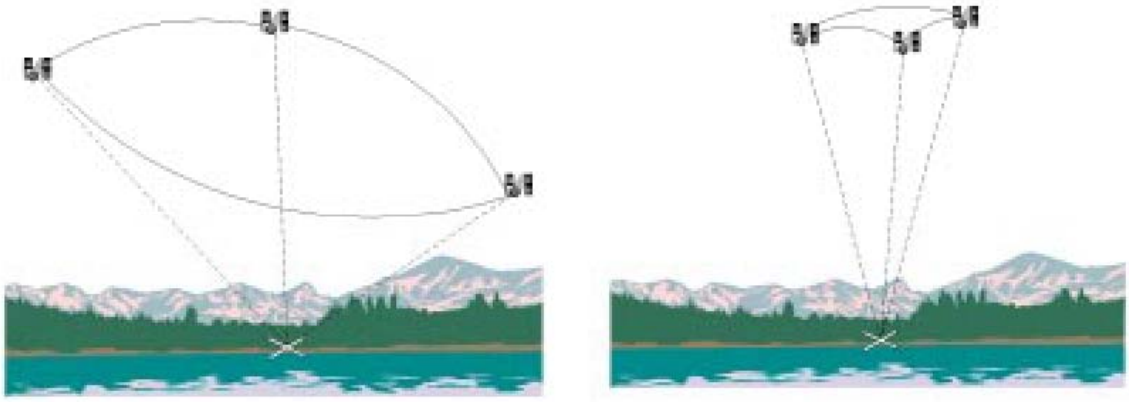


Figure 2 : Illustration de la « Dilution of Precision »

1.1.2.1 la correction différentielle

Le principe de la correction différentielle repose sur l'utilisation d'une station de référence de coordonnées connues avec précision. Cette station reçoit également les signaux GPS et en déduit un vecteur d'erreur qu'elle transmet à l'utilisateur afin de corriger son propre positionnement. La précision du positionnement peut ainsi descendre en-dessous du mètre.

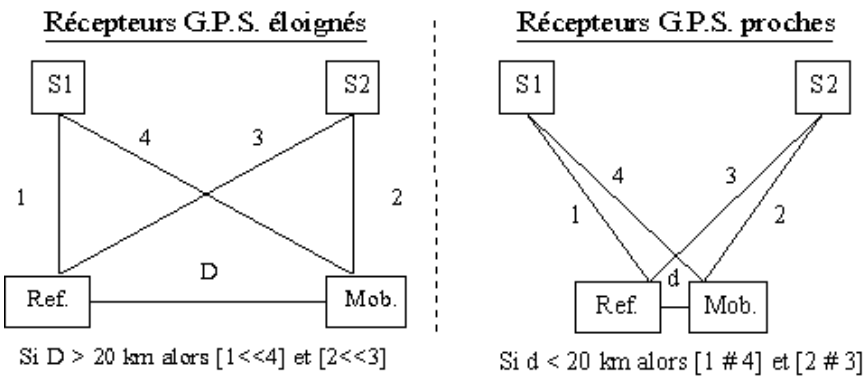


Figure 3 : correction différentielle

Lorsqu'on utilise une unique balise de référence fixe, il est important de considérer la distance séparant le récepteur de celle-ci. En-dessous de 20 km, on la considère comme négligeable en comparaison de l'altitude des satellites. Au delà, on estime que l'erreur varie comme le carré de la distance.

Certaines sociétés fournissent actuellement des couvertures complètes du territoire (national ou européen) par un ensemble de balises. Les corrections sont relayées par satellites et accessibles par les récepteurs appropriés en échange d'un abonnement annuel. L'utilisateur se libère ainsi des contraintes de distance et de positionnement des balises.

1.1.2.2 le GPS centimétrique

Des récepteurs GPS à très grande précision sont produits par certaines entreprises, telles que Real Time Kinematics (RTK). Le GPS centimétrique utilise une particularité des signaux GPS : ceux-ci sont en effet transmis sur deux fréquences différentes, notées L1 et L2. (L1=1.57542 GHz, L2 = 1.22760 GHz).
L1 ayant une longueur d'onde de 19 cm, il est possible, en mesurant les décalages de phases, d'obtenir un positionnement précis à quelques millimètres près, modulo 19 cm. La résolution de l'ambiguïté peut se faire soit en initialisant le GPS en un point dont la position est connue avec une très grande précision (clous IGN), soit par des algorithmes d'initialisation. Dans les modèles récents de GPS centimétriques, cette phase d'initialisation dure environ une minute et peut être effectuée pendant le déplacement du véhicule, contrairement aux premiers modèles dont la phase d'initialisation était bien plus longue et exigeait un arrêt du véhicule, rendant leur utilisation dans des applications automobiles peu pratiques.
La principale limitation technique des GPS centimétriques à l'heure actuelle reste la nécéssité de disposer de sa propre base de référence pour les corrections d'erreurs, sachant que le récepteur RTK ne doit pas s'éloigner de plus de 10 km de cette base, contrairement aux GPS différentiels qui peuvent utiliser des signaux de correction plus accessibles, par radio ou par satellites.

1.1.2.3 Hybridation de plusieurs capteurs

Afin de compenser les erreurs inhérentes au positionnement par GPS, une solution très explorée en ce moment consiste à avoir recours à d'autres capteurs, et notamment des capteurs inertiels et odométriques. La fusion des données de ces capteurs de types très différents, que l'on nomme également hybridation, permet de compenser les erreurs spécifiques à chaque capteur. Ainsi le Centre de Robotique participe dans le cadre du contrat Predit Arcos à la fusion d'informations provenant d'un GPS, d'une centrale inertielle et de capteurs odométriques. Le cumul de ces informations permet notamment de reconstituer avec une précision sub-métrique le profil tridimensionnel de la trajectoire du véhicule instrumenté, précision que l'on peut évaluer en confrontant les résultats obtenus par l'algorithme de fusion et un positionnement de référence obtenu par des GPS centimétriques.

Le seul positionnement de type GPS ne fournit cependant qu'une position absolue brute, le plus souvent sous la forme de coordonnées «longitude, latitude, altitude ». Une telle donnée ne contient en soi que peu d'information, et les applications envisageables à ce niveau ne peuvent être que très simples, comme le positionnement sur une carte.
Afin de pouvoir exploiter cette information de positionnement, il faut donc être capable d'associer à ce positionnement des données qui lui soient spécifiques. Cela nécessite donc l'emploi d'une carte numérique à laquelle on associe une base de données où figurent les informations utiles aux applications souhaitées. Ainsi pour un simple navigateur automobile, il est nécessaire d'intégrer dans cette base la structure géométrique des routes, leur nom et les règles de circulation qui les régissent, afin que le logiciel de navigation puisse extraire un parcours cohérent et compréhensible par le conducteur.
De telles bases de données existent sous différents formats, suivant les applications pour lesquelles elles sont utilisées.

1.2 Les formats de cartographie

La cartographie utilisée dans le cadre de ce projet est fournie par la société Navigation Technologies (NavTech), qui dispose d'une base de données de précision métrique. Elle peut être convertie sous différents formats standards, en fonction des librairies de programmation utilisées par les développeurs. Comme nous n'avions pas jusqu'à présent traité de données cartographiques dans nos différents travaux, le choix de ce format était a priori ouvert.

1.2.1 Représentation des données

Bien qu'il existe plusieurs formats de représentation de données cartographiques, la modélisation de ces données obéit à certaines règles fixes. Ainsi les routes sont-elles invariablement décomposées en segments, dont on évalue un certain nombre d'attributs (longueur, orientation, position des extrémités,…). Parmi ces attributs figurent des *shape*

points qui subdivisent ces segments et permettent d'en définir une forme générale, affine par morceaux.

1.2.2 Le format GDF

Le format GDF est un format d'échange de données, établi par le Comité Européen de Normalisation (CEN), avec la collaboration d'entreprises concernées par l'utilisation de données cartographiques (CETE Méditerranée, Daimler Benz, European Geographic Technologies, Intergraph, MVA Systematica, Philips Electronics, Robert Bosch, Renault, SAGEM, Siemens, Tele Atlas, Volvo, Vägverket).
Ce format a pour principal but de servir de norme commune pour l'échange de données cartographiques, sans dépendre des autres formats commerciaux et des différentes solutions logicielles retenues par les utilisateurs. Les fichiers de données sont donc des fichiers ASCII, lisibles au moyen de tout éditeur de texte.

Les données figurant dans ces fichiers sont classifiées suivant trois catalogues :

- *features catalogue*
- *attributes catalogue*
- *relationships catalogue*

Les *features* sont les différentes classes d'objets considérés comme des éléments de la cartographie : routes, voies ferrées, voies fluviales, zones urbaines, …
Les *attributes* sont les différents attributs que l'on peut associer à ces features : largeur, longueur, nombre de voies, …
Enfin, les *relationships* sont les liens que l'on peut établir entre deux features : jonctions, appartenances, …

Chacun des éléments de cartographie est indexé arbitrairement par un nombre qui lui sert d'identifiant. Cette indexation ne dépend essentiellement que du protocole de saisie des données, et ne peut donc pas être interprétée de façon significative.

Bien que ce format ne soit pas à la base adapté à une utilisation logicielle directe, certains utilisateurs en emploient des formes modifiées dans leurs applications. Ainsi le navigateur Siemens, utilisé dans le projet INARTE et implémenté dans certains véhicules Peugeot, utilise le format C4 dérivé du GDF.

Cependant, la plupart des formats de cartographie commercialisés sont des fichiers binaires, dont l'architecture est plus adaptée à des fonctions de recherche de données (et rendant les données plus difficilement exploitables pour qui ne dispose pas de la licence logicielle appropriée).

1.2.3 Le format MapInfo

Le format MapInfo est un format très employé dans les applications commerciales, ainsi que dans des cadres universitaires. Il propose pour un prix relativement bas une solution cartographique simple mais efficace. Des outils de développement sont en outre

disponibles afin d'intégrer facilement ces cartes sous forme d'ActiveX dans les applications de son choix.
L'organisation des données sous le format MapInfo utilise les graphes nommés *R-trees*, afin de représenter les relations spatiales entre les différents éléments de la cartographie. Cet outil est généralement apprécié pour ses bonnes performances dans l'accès aux données, mais doit généralement être optimisé par des heuristiques locales.

1.2.4 Le format ArcInfo

Le format ArcInfo est un des plus utilisés actuellement dans le milieu professionnel. De même que MapInfo, le logiciel nécessaire pour travailler sur ce format consiste en un ensemble de librairies généralistes (ArcInfo) et de plusieurs logiciels optionnels, selon l'utilisation envisagée (ArcView, ArcScan, ArcStorm, Network Analyst, 3D analyst, Spatial Analyst).

1.2.5 Le format SDAL

Ce format a été créé par la société Navigation Technologies, dans l'intention d'établir un nouveau standard. Il s'agit d'un format relativement récent, ayant été officiellement lancé en novembre 1999. Il serait particulièrement optimisé pour les applications automobiles, en particulier en ce qui concerne le calcul d'itinéraire et la recherche de noms de rues.

Les données codées au format SDAL se distinguent suivant deux catégories : spatiales et non spatiales.

Les données spatiales regroupent tous les objets de type segment (portions de routes), nœud (intersections, culs de sac ou représentation d'objets complexes tels que les ronds-points), ou point d'intérêt (POI). L'organisation des données spatiales se fait par une parcellisation de l'espace sous une structure arborescente (kd-tree, arbre dont l'architecture dépend des probabilités de ses différents nœuds). Les données codées en binaire correspondent donc à un parcours précis de ces arbres, rendant les algorithmes d'accès à ces données plus rapides.

Certaines données sont codées de façon non spatiale, et au lieu d'être classées suivant une organisation de l'espace, elles se voient attribuer une indexation arbitraire (voir le format GDF). Les données concernées peuvent être des points d'intérêt, des jonctions, des codes postaux etc.
Les données non spatiales figurent dans un index spécifique, permettant d'effectuer des recherches suivant d'autres critères que la localisation spatiale (exemple : recherche de l'ensemble des restaurants d'une région, par extraction des points d'intérêt correspondants).

Afin de pouvoir exploiter de façon efficace les informations figurant dans la base de données cartographique, il est bien entendu indispensable de pouvoir positionner avec précision notre véhicule par rapport à l'infrastructure. Or nous avons constaté que le positionnement GPS peut présenter des erreurs sensibles ainsi que subir des perturbations

dues à l'environnement. De plus la carte numérique introduit également son propre lot d'incertitudes, dépendant de sa résolution et d'éventuelles erreurs de mesure.
Dans la tâche la plus courante de localisation d'un véhicule sur un réseau routier, le simple report du point GPS (correspondant aux données brutes retournées par les capteurs) sur la carte numérique tombe rarement sur l'élément routier sur lequel le véhicule circule effectivement. Afin de déterminer le positionnement du véhicule par rapport à l'infrastructure, il est donc nécessaire d'avoir recours à un traitement de localisation sur la carte, aussi appelé *map-matching*.

1.3 Méthodes de localisation

Il existe plusieurs méthodes de *map-matching*, de complexité et d'efficacité variables. Les plus simples et les plus intuitives consistent à utiliser une mise en correspondance géométrique entre les points GPS et la représentation des routes par la base de données. Une autre approche plus avancée prend également en compte la topologie du réseau routier, afin d'éviter un positionnement incohérent par rapport à l'historique du véhicule et la configuration de l'infrastructure. L'ensemble des principales méthodes sont décrites par Bernstein dans [Bernstein98].

1.3.1 L'approche géométrique

L'approche géométrique consiste à prendre une représentation très simple du problème : celui–ci se limite ainsi à mettre en correspondance une série de points (les données brutes envoyées par le GPS) avec un ensemble de segments (les portions de route situées aux alentours de ces points et susceptibles de correspondre à la route sur laquelle le véhicule est en train de circuler)

1.3.1.1 La méthode de la distance point à point

Les cartes numériques étant essentiellement constituées d'ensembles de points reliés entre eux par des propriétés de connexité, une approche simple et immédiate consisterait à comparer le point correspondant aux coordonnées GPS fournies par les capteurs et les différents points de la carte, et de sélectionner le candidat le plus proche de notre point GPS comme position supposée de notre véhicule.

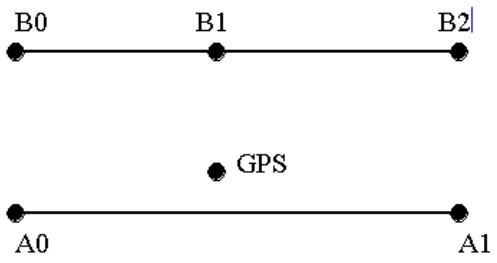


Figure 4 : limitation du matching point à point : attribution erronée du point GPS au segment B au lieu de A

Cette approche un peu naïve a cependant de nombreux inconvénients. Notamment la résolution de son positionnement se limite à l'espacement des différents nœuds de la carte, ce qui est en général très grossier. De plus cette méthode peut facilement effectuer de faux appariements dans des situations a priori peu problématiques : on peut voir sur la figure 4 que dans cette configuration précise, le point GPS sera apparié au point le plus proche donc B1, alors que le bon sens laisse croire que le véhicule se trouve plus vraisemblablement sur le segment [A0;A1]. Les résultats du positionnement dépendront donc beaucoup de la façon dont la cartographie aura été réalisée.

1.3.1.2 La méthode de la distance point à segment

Afin de corriger les erreurs observées dans la méthode précédente, l'amélioration la plus logique revient à mesurer la distance du point GPS aux différents segments et donc de considérer que notre véhicule circule sur le segment le plus proche.

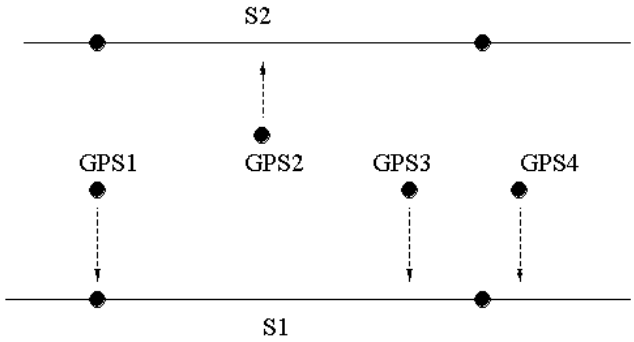


Figure 5 : limitation du matching point à segment

Cette méthode corrige effectivement le problème observé dans l'exemple précédent, puisque cette fois ci le point GPS sera attribué au segment [A0;A1] et non plus au segment B.
Cependant des défauts importants persistent dans certaines configurations. On, peut par exemple observer de fréquentes instabilités dans l'attribution à un segment donné, comme l'illustre la figure 5 : la plupart des points GPS se voient affectés au segment S1, mais le point GPS2 se trouvant plus près du segment S2 lui sera affecté à tort, puisqu'il est matériellement impossible au véhicule d'être passé temporairement d'un segment à l'autre.

De façon générale cette méthode ne tient pas assez compte de la cohérence spatiale et temporelle des données : en traitant les points GPS un à un sans tenir compte des données précédentes, il faut s'attendre à voir apparaître des incohérences dans le positionnement.
La figure 6 en est une autre illustration : en observant les points GPS 1 à 4, on devine facilement que le véhicule est en train de circuler le long du segment S1. Or le point GPS4 pouvant se trouver plus proche de S2 que de S1, il y a un risque pour qu'il soit affecté à ce segment S2 au mépris de toute cohérence.

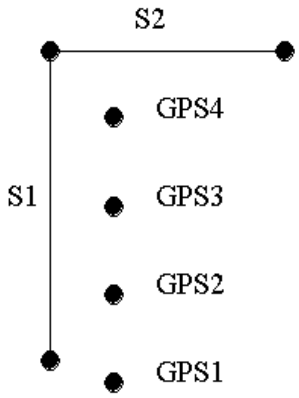


Figure 6 : intérêt de la distance courbe à courbe

1.3.1.3 La méthode de la distance courbe à courbe

Pour corriger les lacunes de la méthode précédente, il est possible de garder en mémoire plusieurs des points GPS reçus précédemment, et de les considérer comme un ensemble à mettre en correspondance avec la carte. Il est donc utile dans un premier temps de définir une mesure de distance entre arcs, sachant que l'espacement entre les nœuds des segments cartographiques peut être très différent de celui entre les points GPS. La plupart des distances ré-échantillonnent donc les segments de la cartographie en y projetant les différents points GPS conservés en mémoire. La distance peut alors être définie par la somme des distances entre chaque point et sa projection sur l'arc correspondant.

1.3.2 L'approche topologique

L'approche topologique consiste à tenir compte de la connectivité des différents arcs pour éventuellement résoudre certaines ambiguïtés, en supprimant les hypothèses qui ne seraient pas matériellement réalisables compte tenu de la topologie de la cartographie. Cette méthode nécessite cependant un "point d'appui" sous la forme d'une position de référence que l'on considère comme fiable, et à partir de laquelle se développeront nos raisonnements.

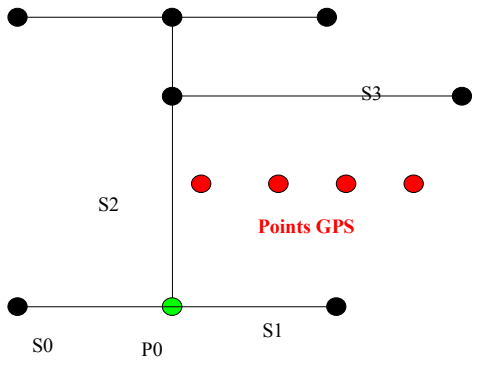


Figure 7 : Intérêt de l'approche topologique

Considérons par exemple le cas de la figure 7 : les méthodes géométriques auront tendance à attribuer la plupart des points GPS au segment S3. Mais si l'on considère que le véhicule se trouve initialement et avec certitude au point P0, alors il est matériellement impossible qu'il ait pu joindre S3 compte tenu de la longueur de S2. Le véhicule est donc plus vraisemblablement en train de circuler sur le segment S1.

Cette méthode qui cherche avant tout à éviter les incohérences a pour principale limitation la nécessité de connaître une position initiale du véhicule avec une précision satisfaisante. Pour y parvenir il peut être nécessaire de procéder à une phase d'initialisation, ce qui peut s'avérer gênant suivant le contexte d'utilisation d'un tel dispositif : une telle phase d'initialisation ne serait pas gênante dans le cadre de travaux expérimentaux, elle le serait déjà plus pour un simple usager automobile souhaitant juste profiter de fonctions de navigation au quotidien.

1.3.3 Autres approches

Les méthodes de map-matching peuvent en fait être très variées dans leur approche, et ne reposent pas toujours sur des considérations géométriques ou topologiques. Une méthode de logique floue a ainsi été implémentée par Lee ([Lee99]) afin d'améliorer les performances des méthodes topologiques habituelles. D'autres méthodes s'appuient sur des amers tels que virages et intersections afin d'effectuer des recalages réguliers, entre lesquels les données de capteurs inertiels et/ou odométriques sont intégrées afin d'obtenir un positionnement plus fin localement.
L'utilisation de ces capteurs inertiels et la fusion des données qu'ils fournissent avec celles du GPS constituent une méthode bien plus prometteuse que l'exploitation du GPS seul. En effet Les capteurs inertiels ont en général une très bonne précision dans la mesure de déplacements relatifs, et permettent donc de reconstituer localement la trajectoire parcourue par le véhicule avec une meilleure définition qu'une simple suite de points GPS. Cette trajectoire reconstituée est donc un objet dont le matching avec les éléments de la carte pourra être bien plus discriminant, puisque l'erreur GPS introduira un simple biais sur la position de cette section, mais ne jouera pas (ou peu) sur sa forme même.

En réalité, les industriels réalisant des applications de localisation ont souvent recours à des algorithmes qui leur sont propres et dont ils ne diffusent que très rarement le principe de fonctionnement. Beaucoup d'entre eux semblent reposer sur des heuristiques s'appuyant sur des données bien spécifiques à l'application visée, et peuvent donc être considérées comme des modifications des approches précédentes en tenant compte du contexte d'utilisation du système.
Dans nos applications, nous avons pu avoir recours dans certains cas aux algorithmes de navigation développés par la société NavTech (Navigation Technologies), intégrant la fusion de données GPS, gyroscopiques et odométriques, mais prenant également en compte le passage par des points stratégiques de l'infrastructure, tels que les intersections de différentes vois de circulation.
En revanche dans les cas où nous avons dû développer nos propres applications de localisation, nous avons eu recours par souci de simplicité à une simple mise en correspondance géométrique courbe à courbe. En effet ces applications, que nous verrons plus en détail dans le paragraphe suivant, concernent essentiellement l'arrivée sur des infrastructures complexes, et non le « départ » de telles infrastructures. Les risques d'ambiguïtés ou d'erreurs topologiques sont donc bien moins grands.

1.3.4 La méthode retenue pour nos travaux

Dans les cas qui nous occupent, nous considérons essentiellement l'arrivée sur différentes infrastructures. Sachant que la précision de notre DGPS peut être inférieure à 1.7m 95% du temps (avec de bonnes conditions de DOP), et que la cartographie numérique dont nous disposons a une précision de 5m en absolu et de 1m en relatif, la méthode de matching courbe à courbe s'avère suffisante et plus simple à implémenter. En effet nous ne cherchons qu'à considérer l'approche des infrastructures complexes telles que virages ou intersections, et non la traversée même de ces infrastructures. Or c'est au moment de ces traversées que se posent la plupart des problèmes d'ambiguïtés que corrigent les méthodes plus avancées, telles que la méthode topologique.
Cependant dans le cadre des projets Parina et Arcos (qui seront explicités dans les paragraphes suivants), nous avons eu recours à l' environnement ADASRP développé par la société Navigation Technologies, qui dispose de ses propres algorithmes de map-matching.

1.4 De nouvelles applications pour les systèmes d'informations géographiques

La présence d'un navigateur GPS à bord d'un véhicule sous-entend que le conducteur peut avoir accès à tout moment à une base de données pouvant contenir toutes sortes d'informations sur la zone qu'il est en train de traverser. Bien qu'à l'heure actuelle les seules informations qui soient véritablement exploitées par le conducteur ne concernent que la navigation, il est tout à fait possible d'introduire d'autres sortes de données et par la même de créer de nouveaux dispositifs d'assistance au conducteur, et cela sans avoir à modifier l'équipement matériel du véhicule.

De telles applications ont été suggérées dans le cadre de différents projets au Centre de Robotique.

1.4.1 La signalétique embarquée

Le concept de la signalétique embarquée consiste à afficher sur le tableau de bord du véhicule toutes les informations de signalisation, qui figurent habituellement sur les différents panneaux et dispositifs d'affichage placés aux abords des voies de circulation. Contrairement aux systèmes de navigation courant, l'information recherché ne concerne donc pas le nom des rues. Il est donc nécessaire de réaliser une base de données spécifique qui intègre l'ensemble des panneaux présents sur le réseau routier, leur position précise ainsi que le segment routier auquel ils sont attachés.

Figure 8 : L'intérieur du véhicule instrumenté

Figure 9 : le tableau de bord numérique

Ainsi connaissant la voie de circulation sur laquelle circule le véhicule, nous pouvons accéder directement à l'ensemble des panneaux attachés à cette voie. Considérant alors la distance qui nous en sépare de ces panneaux, nous pouvons alors décider d'afficher le message correspondant à ce panneau sur l'écran du navigateur si celui ci le permet.
Pour le cas du prototype du Centre de Robotique, l'affichage a en outre été rendu plus souple et plus esthétique par la réalisation d'un tableau de bord numérique composé de plusieurs écrans LCD personnalisables à volonté (voir figures 8 et 9). Les panneaux de signalisation peuvent ainsi s'y afficher sous la forme d'images standards, dont la taille à l'écran pourra dépendre de l'importance de ces panneaux et de la distance qui les sépare du véhicule. Ainsi sur la figure 10 nous pouvons observer une reproduction du tableau de bord du véhicule tel qu'il apparaît en conditions de conduite courante. L'interface personnalisable permet de représenter de différentes façons des informations telles que vitesse du véhicule ou jauge d'essence. Lorsque le véhicule s'approche d'un panneau de signalisation tel que « virage à gauche », cette information peut temporairement apparaître à la place de certaines indications (voir figure 11).

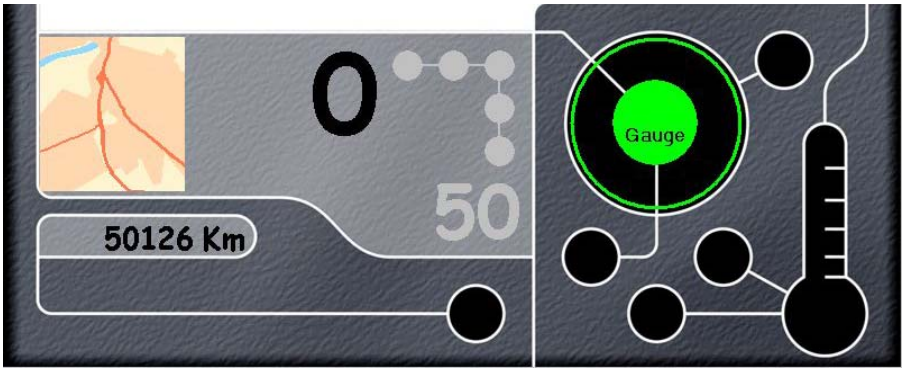


Figure 10 : Le tableau de bord en utilisation normale

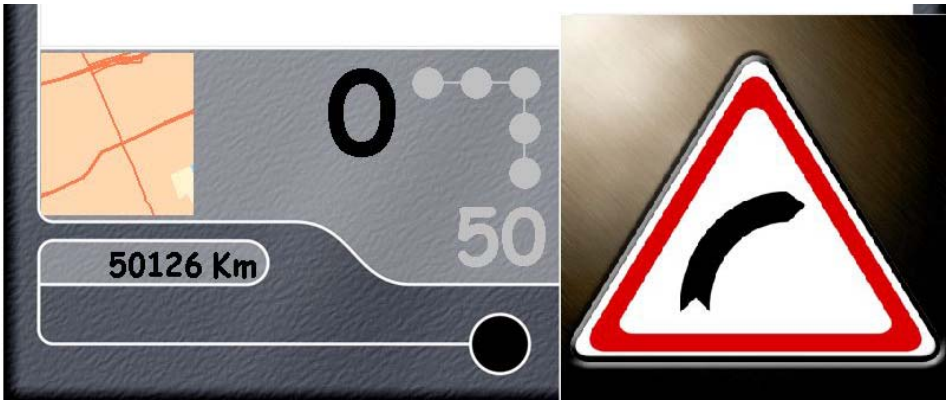


Figure 11 : le tableau de bord intégrant la signalétique

Il est également possible d'introduire un élément contextuel à cette application : plutôt que d'afficher en permanence la vitesse limite autorisée sur la voie que nous empruntons, il peut sembler plus approprié de ne l'afficher que lorsque la vitesse courante du véhicule dépasse sensiblement cette limite. En sélectionnant de la sorte les informations pertinentes à fournir au conducteur, il est ainsi possible de limiter la confusion de celui-ci et les troubles à la compréhension que peut occasionner la recherche d'une donnée particulière noyée dans un excès d'informations.
Ce système a été installé sur le prototype du centre de robotique, en utilisant pour seuls capteurs un DGPS AgGPS132 de marque Trimble et les codeurs odométriques standards du véhicule. Le map-matching sur la carte numérique au format MapInfo a été réalisé suivant une approche «distance courbe à courbe » par souci de simplicité. La Figure 12 montre un exemple de signalétique embarquée sur une reproduction hors-ligne du tableau de bord : la localisation sur la carte du véhicule, représentée par un point rouge, permet de détecter la présence du panneau correspondant à des virages successifs. Limage de ce panneau est alors affichée sur le tableau de bord avec une insistance pouvant dépendre de la vitesse du véhicule et de la distance nous séparant de ce panneau.

Figure 12 : le tableau de bord du démonstrateur

1.4.2 L'annonce de points noirs

De nombreux projets, soutenus par des organismes tels que la DDE ou la sécurité routière, reposent sur la localisation de "points noirs", c'est à dire d'emplacements au niveau desquels la fréquence des accidents est particulièrement élevée. Ces travaux reposent donc sur une étude à grande échelle des accidents de la route sur l'ensemble du territoire, exploitant notamment les relevés effectués systématiquement par la gendarmerie et classifiant de façon assez succincte les différents types d'accidents. Le relevé de points d'accumulation d'accidents permet ainsi aux organismes initiateurs de mettre en place une signalisation spécifique ou d'envisager des travaux de modification de l'infrastructure afin de diminuer le nombre d'accidents en ces emplacements.

Une autre forme d'étude consiste à s'intéresser à un emplacement bien précis, notamment à un de ces "points noirs" que l'on aura identifié au préalable, et de procéder à une observation détaillée des différentes conditions de circulation sur une durée relativement longue, allant d'une à plusieurs années. Le but poursuivi est d'établir une loi de probabilité de l'occurrence d'accidents sur cet emplacement précis, la méthode la plus usitée consistant à utiliser une loi de distribution de Poisson afin de décrire ce risque ([Brenac 94]), cette loi étant paramétrée par des facteurs tels que le nombre de voies des routes, le débit moyen de circulation ou les conditions environnementales et météorologiques. De tels résultats permettent d'émettre des prévisions sur le nombre d'accidents susceptibles d'avoir lieu durant une période donnée.

Au final, ces travaux permettent d'identifier les emplacements statistiquement problématiques, voire mêmes les périodes pendant lesquelles la dangerosité de ces emplacements est particulièrement importante. Une telle information peut s'avérer particulièrement utile à un conducteur connaissant mal une région donnée, et peut l'inciter à être particulièrement vigilant en ces endroits sensibles.

1.4.3 Des perspectives nouvelles

Les applications de signalétique embarquée et d'annonce de points noirs décrites dans les paragraphes 1.4.1 et 1.4.2 ont pour point commun de vouloir fournir au conducteur une assistance relative à sa sécurité, que ce soit sous la forme de signalisation routière ou des

propriétés statistiques des emplacements qu'il est sur le point de traverser. Mais ces informations ont également cela de commun qu'elles figurent de façon statique dans les bases de données accessibles par le véhicule.
Dans la mesure où il est désormais envisageable d'équiper les véhicules de capteurs supplémentaires, qu'ils soient proprioceptifs (odomètres, centrale inertielle etc.) ou extéroceptifs (télémètres, caméras, etc.), une étape suivante dans l'évolution de tels dispositifs d'assistance consisterait à analyser en temps réel les conditions de circulation du véhicule, et de détecter les situations de conduite dangereuse afin d'anticiper la survenue d'un accident.
La réalisation de tels dispositifs est bien entendue une tâche bien plus complexe que la simple gestion de données statiques. Une des particularités d'un tel dispositif est qu'il exige de pouvoir traiter en temps réel un grand nombre de données, concernant à la fois le véhicule et son environnement, et d'en extraire par les traitements appropriés des informations haut niveau telles que le niveau de danger encouru par le conducteur.

Ce sujet est en ce moment très activement exploré, tant dans le milieu industriel que dans le milieu académique. Le Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris a ainsi eu l'opportunité de collaborer avec le constructeur automobile Renault dans le cadre du projet PARINA (Prévention Anticipée des Risques par la Navigation), projet qui a servi de ligne conductrice pour la majeure partie de cette thèse. Ce projet se déroulant dans un milieu strictement industriel avait pour objectif de mettre au point des dispositifs de détection et d'identification de source de danger dans des scénarios routiers pré-établis.

Dans un autre cadre, le Centre de Robotique participe également de façon active dans le projet ARCOS (Action de Recherche pour une COnduite Sécurisée), projet se déroulant dans le cadre du programme national Predit de recherche et d'innovation dans les transports terrestres. Le projet ARCOS d'ambition très vaste aborde des problématiques aussi variées que la gestion d'inter distance entre véhicules, la prévention de collision contre des obstacles fixes ou lents, la prévention de sorties de routes et une information amont des véhicules en cas d'accident.
Des travaux similaires ont également eu lieu aux Etats-Unis, dans le cadre du National Highway Traffic Safety Administration ([NHTSA99], [NHTSA00]). Ce projet a à l'heure actuelle établi les *lignes de conduite* attendues de la part de tels dispositifs de sécurité.

Les travaux effectués au cours de cette thèse ont donc eu pour but initial de parvenir à extraire d'une scène routière des informations permettant d'estimer en temps réel le niveau de danger encouru par le conducteur ou le véhicule. Le but visé s'arrête cependant à la seule estimation quantitative du danger, et ne va pas jusqu'à la réalisation d'un système de sécurité complet. En effet, un tel dispositif pour être efficace devrait intégrer le conducteur dans les boucles de traitement : les alarmes ne doivent notamment pas perturber la tâche de conduite et être suffisamment explicites pour apporter une aide pertinente au conducteur. De plus la fréquence de ces alarmes doit rester modérée afin de ne pas entraîner une lassitude de l'utilisateur qui finirait par désactiver le système ou ne plus y prêter attention.
La gestion du comportement du conducteur ne fait cependant pas partie des travaux effectués dans le cadre de cette thèse ; ils font cependant l'objet d'un autre projet intitulé « cindynomètre », financé par la compagnie d'assurance MAIF. Le sujet qui nous occupe se limitera donc à la seule évaluation du danger sans aborder le problème de l'interface homme-machine. Pour cela il est cependant nécessaire d'avoir une bonne compréhension

des mécanismes d'accidents, afin d'être en mesure d'identifier les éléments accidentogènes et d'évaluer leur influence sur la dangerosité d'une situation donnée. Afin d'y parvenir, il a donc été nécessaire d'effectuer des études d'accidentologie .

Chapitre 2 : Etudes d'accidentologie

Les accidents de la route sont des évènements pouvant reposer sur des mécanismes complexes et difficilement prévisibles. En effet ces phénomènes font intervenir des paramètres aussi variés que la configuration géométrique de l'infrastructure, les conditions météorologiques, les caractéristiques mécaniques et dynamiques de chaque véhicule, et bien entendu le comportement des différents conducteurs impliqués. Tous ces éléments dont beaucoup sont difficilement classifiables, voire mesurables, vont faire en sorte que pour des mises en situation à priori très similaires, certaines vont aboutir à un accident réel tandis que d'autres ne présenteront pas de danger visible.
Puisque notre but est de comprendre et modéliser les mécanismes d'accidents, il sera donc indispensable d'analyser les différents paramètres accidentogènes détectables dans une scène, et de comprendre l'influence que ces paramètres peuvent avoir sur la tâche de conduite.

Approche statistique contre approche événementielle.

Dans la plupart des cas, les études d'accidents prennent la forme de relevés statistiques à grande ou moyenne échelle, afin de donner des résultats statistiques sur l'ensemble d'une zone géographique ou un emplacement particulier, mais observés pendant une période étendue. Les informations qui en découlent peuvent être exploitées dans certaines des applications décrites dans le chapitre précédent, notamment l'annonce d'arrivée sur points noirs, mais ce études ne sont à la base pas pensées pour être appliquées dans des applications d'assistance au conducteur ; leur intérêt est bien plus global et concerne généralement l'élaboration de statistiques prévisionnelles ou la localisation d'emplacements où des travaux de modification de l'infrastructure s'avèrent nécessaires.

Il faut cependant être conscient que le cas qui nous intéresse est bien différent. Nous nous intéressons en effet à un "individu" bien précis, à savoir notre véhicule au cours de son déplacement. Dans le cas où nous aborderions un emplacement particulièrement délicat de l'infrastructure, des informations sur les statistiques d'accidents ayant eu lieu sur cet emplacement nous seraient peu utiles pour déterminer si nous nous trouvons effectivement dans une situation de danger potentiel.
En effet même si en un point noir particulier le nombre d'accidents observés est plus important que la normale, cela n'empêche pas la majorité des véhicules traversant cet emplacement de le faire en toute sécurité. Inversement de nombreux accidents peuvent avoir lieu sur des emplacements totalement sécuritaires de façon générale.

Nous ne chercherons donc pas à émettre des probabilités quant à l'occurrence d'un accident à un moment précis, mais plutôt à évaluer les conditions de conduite en cet instant et de détecter en temps réel les éventuels paramètres accidentogènes. Afin de pouvoir ainsi anticiper les accidents, il est indispensable de bien en connaître les mécanismes, et c'est la raison pour laquelle nous avons eu recours aux connaissances accumulées par l'accidentologie.

Qu'est-ce que l'accidentologie ?

L'accidentologie est une science relativement nouvelle dont le but est avant tout de comprendre les mécanismes accidentels, dans le but d'identifier les besoins qui permettraient de réduire le nombre et la gravité des accidents de la route.

La compréhension de ces mécanismes nécessite, entre autres, des études approfondies sur les accidents réels et la construction de modèles théoriques permettant à l'accidentologiste de structurer le déroulement de l'accident et de déterminer les interactions entre les facteurs et les causes l'ayant provoqué.

On distingue généralement les études approfondies d'accident selon qu'elles concernent la sécurité primaire (les mécanismes accidentels, la prévention et l'évitement de l'accident), ou la sécurité secondaire (les mécanismes lésionnels et la prévention des blessures). Les études accidentologiques approfondies orientées vers la sécurité primaire datent des années 1950 dans certains pays et se sont développées dans les années 1970 et 1980, notamment en France à l'Organisme National de Sécurité Routière (ONSER) puis au département Mécanismes d'Accident de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS).

Les constructeurs automobiles français, par l'intermédiaire de leur Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique commun (le LAB), ont développé ce genre d'études au début des années 1990, dans le cadre du programme de recherche VSR (Véhicule et Sécurité Routière) en partenariat avec l'INRETS. Ces études sont destinées à apporter aux constructeurs automobiles français les connaissances accidentologiques suffisantes pour comprendre les configurations d'accidents et éventuellement spécifier des dispositifs d'évitement de l'accident qui pourront assister le conducteur ou même s'y substituer en cas de défaillance dans une situation d'urgence.

Comprendre les mécanismes accidentels implique notamment de recueillir de l'information sur les accidents de la route, puis d'analyser cette information. Au début du programme VSR, le LAB a choisi de développer une méthode d'investigation prospective et systématique qui consiste à établir un catalogue évolutif de l'information à collecter sur les accidents.

En quoi consiste une collecte approfondie d'informations de l'accident, orientée vers la sécurité primaire ? Il y a en réalité de nombreuses manières de procéder à de telles études. La meilleure façon de procéder, puisqu'il n'est quasiment jamais possible d'être sur les lieux de l'accident au moment où il se produit ou qu'il n'est pas encore possible de disposer d'enregistreurs (boite noire) sur les véhicules routiers, est de se rendre sur les lieux de l'accident en même temps que les pompiers et les forces de l'ordre puis de procéder rapidement à la collecte des données périssables (entretiens avec les impliqués, photographies des lieux et des véhicules, repérage et mesures des traces sur la chaussée, inspection des véhicules, …). Cette méthode prend le nom d'investigation sur la scène de l'accident et implique évidemment un système d'alerte qui avise l'équipe accidentologique de l'occurrence d'un accident pour que celle-ci se rende sur le terrain aussi vite que possible. Une autre manière de procéder est de ne recueillir les données sur les accidents que plusieurs heures ou plusieurs jours après que l'accident a eu lieu. C'est la méthode d'investigation en temps différé. Un accidentologiste se rend à la préfecture ou dans les commissariats et compagnies de CRS plusieurs fois par semaine, prend connaissance des accidents, recueille les éléments disponibles auprès des services de la préfecture ou des policiers, notamment dans le procès-verbal en cours de constitution, puis continue son exploration de l'accident en cherchant les données complémentaires dans les mêmes conditions que le recueil complémentaire de la méthode sur la scène. Cette méthode donne généralement des résultats moins bons mais coûte moins cher et

n'est adaptée que s'il est difficile de se rendre sur les lieux d'un accident assez rapidement avant que les véhicules ne soient déplacés ou que les impliqués soient emmenés à l'hôpital par le Véhicule de Secours aux Asphyxiés et aux Blessés (VSAB).

Le LAB a choisi de développer des études détaillées d'accident sur la scène de l'accident et a confié au CEESAR la réalisation de ces études. Typiquement, il s'agit d'envoyer une équipe de spécialistes le plus rapidement sur les lieux de l'accident et de rechercher tous les indices pouvant aider à expliquer ce qu'il s'est passé. Evidemment, on sait ce que l'on cherche et l'on a identifié auparavant une check-list d'informations à recueillir :

- à propos de l'impliqué : état civil, maladies, permis de conduire, expérience de conduite, état au moment de l'accident, motif de déplacement, manœuvres effectuées en situation d'urgence, … Ces informations sont généralement recueillies par des entretiens avec l'impliqué.

- à propos des lieux de l'accident par la mesure des caractéristiques de la chaussée (géométrie, accotement, surface, signalisation, trafic, visibilité, …),

- à propos des véhicules par une inspection systématique (identification, caractéristiques techniques, défaillances, équipement, charge, signalisation, pneus, direction, …),

- à propos de l'environnement (météo, type de route, date de l'accident, …).

Une grande partie des informations importantes est recueillie sur le site. Les informations complémentaires sont recueillies par des entretiens avec les impliqués à l'hôpital ou chez eux, par l'inspection des véhicules chez les garagistes, et par des recherches à la DDE. Le procès-verbal est éventuellement consulté au commissariat, à la brigade de gendarmerie, ou à la compagnie de CRS. Les bilans médicaux, établissant les lésions des impliqués lors de l'accident, sont obtenus auprès des services hospitaliers.

Le CEESAR dispose de deux antennes à Amiens (80) et à Evreux (27) composées d'accidentologistes (psychologue, technicien du véhicule et technicien de la route) pour effectuer les enquêtes approfondies. Celles-ci ne peuvent s'effectuer que sur un terrain d'observation restreint et nécessitent un partenariat étroit avec les autres intervenants sur les lieux de l'accident (les secours, les policiers) et avec les intervenants qui peuvent faciliter le déroulement des enquêtes ou fournir des informations autour de l'accident (la Direction Départementale de l'Equipement pour l'infrastructure et le trafic, le Tribunal de Grande Instance pour les autorisations et l'accès aux procès-verbaux d'accidents, les services hospitaliers pour les bilans médicaux et l'autorisation de procéder à des entretiens avec les impliqués).

L'analyse de l'ensemble de ces éléments accident par accident, environ un millier d'informations élémentaires enquêté par accident, permet ensuite de procéder à une reconstruction cinématique et cognitive de l'accident puis leur analyse agrégée pour tous les accidents aide à mieux comprendre les mécanismes accidentels, voire, dans certains cas, à fournir des résultats épidémiologiques sur l'incidence ou les risques relatifs des facteurs de risque identifiés.

Une grande partie de l'information recueillie et / ou analysée est codifiée puis stockée dans une base de données pour la rendre accessible plus facilement. L'autre partie est accessible dans le dossier d'accident et dans le logiciel de reconstruction. La connaissance qualitative complémentaire réside dans l'expertise des accidentologistes acquise au fil des années d'investigations sur les accidents.

2.1 Le conducteur

Le conducteur est bien entendu au cœur de la question des accidents de la route. Outre le fait qu'il est l'élément du système conducteur-véhicule-infrastructure que l'on souhaite protéger en priorité (avec d'éventuels passagers), il est considéré comme acquis que la plupart des accidents sont liés, directement ou non, à une erreur humaine ([Setra01],[Yerpez98]).
Dans cette section nous nous intéresserons donc

On considère que le conducteur a trois tâches à réaliser au cours de la conduite :

- **la navigation** consiste à déterminer à grande échelle la façon dont le conducteur a l'intention d'atteindre sa destination compte tenu de son point de départ. Cette tâche revient donc à faire le choix entre différents itinéraires, ainsi que la prise en compte des différentes informations qui pourraient y être liées.
- **la guidance** consiste à positionner le véhicule par rapport à la voie et le trafic environnant et en déduire les trajectoires admissibles afin de circuler dans de bonnes conditions de sécurité.
- **le contrôle** du véhicule même, c'est à dire l'interaction directe entre le conducteur et la machine afin que celle-ci suive la trajectoire décidée par le conducteur.

Dans une grande majorité des cas, les accidents de la route sont liés à une défaillance d'un conducteur (que celui ci soit légalement fautif ou non), dans la mesure où à part pour quelques rares cas de défaillances mécaniques, l'accident aurait été évitable si le conducteur avait adopté un comportement adéquat.
Ces défaillances se classent elles aussi en sous-catégories, dont la définition peut varier suivant les laboratoires d'accidentologie. Celle proposée par le LAB classe les défaillances suivant qu'elles concernent la perception, l'estimation, l'interprétation, la compréhension et l'action (modèle PEIDA).

La perception concerne la faculté à effectivement recevoir les informations visuelles provenant des objets de la scène. Une cause de défaillance à la perception d'un objet peut par exemple être un masquage par un élément du décor, un éblouissement ou une inattention du conducteur.
L'estimation concerne la représentation géométrique que se fait mentalement le conducteur des éléments observés. Il s'agit notamment de l'estimation des distances, des vitesses ou des courbures. Des mauvaises conditions météorologiques, la fatigue ou l'inexpérience du conducteur peuvent être des causes possibles de défaillances dans ce domaine.

L'interprétation représente la compréhension qu'a le conducteur de la scène. Les causes de défaillance sont donc très souvent liées à un facteur humain (fatigue ou habitude du conducteur le poussant à ignorer un élément nouveau), mais peuvent également être dues à la complexité de l'infrastructure. Il faut noter que la notion d'*interprétation* peut facilement être rapprochée de celle d'*estimation*. Certains formalismes regroupent d'ailleurs ces deux concepts sous le terme de *compréhension*.
La décision, comme son nom l'indique, représente les conclusions que tire le conducteur sur le comportement à adopter au cours de sa tâche de conduite. Une défaillance est donc nécessairement imputable au seul conducteur, notamment dans le cas d'inexpérience, de fatigue ou d'ébriété.
L'action enfin est la phase où le conducteur effectue physiquement la tâche qu'il aura décidé d'accomplir. A ce niveau les causes de défaillance peuvent être très variées, allant de la défaillance mécanique aux mauvaises conditions de route (chaussée rendue glissante par la pluie, par exemple).

L'analyse de l'état du conducteur est cependant un sujet à part entière qui est déjà l'objet de nombreux travaux, et qui demande une instrumentation particulière. Comme notre projet a surtout pour but l'analyse des scènes extérieures au véhicule, nous ne nous attarderons pas sur l'évaluation des facultés du conducteur même, mais nous nous intéresseront davantage aux interactions entre le véhicule et l'infrastructure.

2.2 L'infrastructure

L'infrastructure prend dans le cadre de ce projet une importance très particulière. En effet il s'agit de l'information principale que peut nous fournir le système d'information géographique, et celui-ci est l'élément que nous souhaitons mettre en valeur comme capteur innovant. Nous avons donc cherché à identifier la façon dont les différentes configurations de l'infrastructure peuvent créer des éléments accidentogènes, ou de façon générale contribuer à un mécanisme d'accident.

2.2.1 Les intersections

Le danger inhérent aux intersections repose sur la convergence de différents flux de circulation en un même endroit, le risque encouru est donc principalement la collision avec un autre véhicule, sachant que ce véhicule est susceptible de venir de chacune des branches de l'intersection, et peut entamer des manœuvres variées et complexes.

Selon la facilité de l'infrastructure, on estime qu'il est nécessaire d'avoir une visibilité en arrivée sur intersection de 5 à 10 secondes. L'arrivée sur une intersection demande en outre une visibilité particulière, étant donné le nombre relativement important de tâches devant être effectuées par le conducteur. Celui ci doit en effet d'une part comprendre le fonctionnement de l'intersection, et d'autre part tirer de la scène les informations nécessaires à une traversée sans risque.

Le champ de vision du conducteur doit donc être nécessairement plus large que pour la conduite sur une portion de route simple, afin qu'il puisse percevoir les différentes voies arrivant sur l'intersection, et y détecter les véhicules qui y circulent. Il est donc nécessaire de prêter attention à d'éventuels masques à la visibilité, qui pourraient compliquer sensiblement la tâche du conducteur. Au niveau d'une intersection, ce genre de masques est fréquent et peut être de différents types :

- environnement végétal
- signalisation
- mobilier urbain
- véhicules en file ou à l'arrêt
- présence de plusieurs voies de circulation, pouvant occasionner des masquages dynamiques

Les types d'accidents observés varient en général en fonction de la configuration de l'infrastructure :

- <u>Carrefour « stop » ou « cédez le passage »</u>

Les accidents les plus souvent observés sur ce type de carrefours sont :

- des collisions à angle droit (ou cisaillements), survenant lorsque le véhicule non prioritaire tente de traverser l'intersection ou de tourner à gauche
- des collisions entre véhicules prioritaires, lorsque l'un d'eux souhaite s'engager dans la voie non prioritaire
- des traversées de piétons.

On observe que ces accidents sont très souvent liés à des excès de vitesse sur la voie prioritaire. Celle-ci semble en effet déterminante du nombre d'accidents sur ce type d'intersections, que ce soit en milieu urbain ou rural.

- <u>Carrefour avec priorité à droite</u>

Ce type de carrefour est généralement observé à la rencontre de routes secondaires et peu fréquentées. Les accidents que l'on peut y observer résultent donc le plus souvent d'un manque d'attention au trafic de la part d'au moins un des conducteurs en présence, et/ou d'un manque de visibilité. Là encore, la plupart de ces accidents sont des collisions à angle droit.

- <u>Carrefour en courbe</u>

Le principal problème de cette configuration apparaît lorsqu'un véhicule non prioritaire arrive sur le côté concave de la route prioritaire. Il doit alors effectuer son contrôle visuel sur un angle supérieur à 180°, ce qui rend l'opération plus difficile. De plus, l'estimation de la vitesse des véhicules circulant sur une route courbe est moins aisée. En contrepartie, une arrivée sur le côté convexe de la route ne pose pas de difficulté spécifique, sauf si cette arrivée est tangentielle à la route principale. Dans ce cas, il arrive que les règles de priorité soient mal interprétées par les conducteurs.

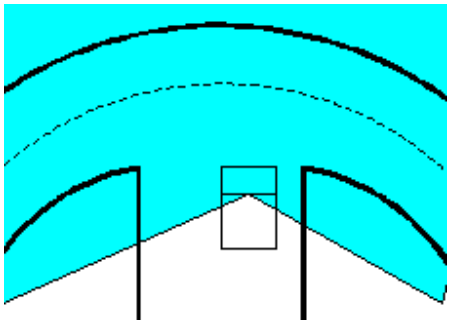


Figure 13 : Problématique du champ de vision pour une intersection en courbe

Les carrefours en courbe peuvent également présenter des difficultés liées au dévers de la route.

- Carrefour à feux tricolores

Les accidents survenant sur les carrefours à feux tricolores sont pour la plupart des heurts entre un véhicule tournant à gauche et un véhicule arrivant en sens inverse, des collisions entre véhicules situés sur la même voie, des collisions à angle droit (cisaillement) et des heurts de piétons. Un grand nombre de ces accidents est lié à la mauvaise perception de la signalisation par le(s) conducteur(s).

- Carrefour giratoire

Cette catégorie de carrefour est souvent considérée comme la plus sûre. Cependant, elle n'est pas exempte de cas d'accidents, qui sont pour la plupart très spécifiques à cette configuration particulière de l'infrastructure.

On observe par exemple que les carrefours giratoires ovales présentaient en moyenne davantage d'accidents que les carrefours giratoires ronds. De plus, le niveau de dangerosité d'un carrefour giratoire semble augmenter avec la taille de l'anneau et le nombre de branches qui en partent. Concernant ces branches, on considère également que le risque augmente si celles-ci possèdent plusieurs voies.
De façon générale la dangerosité d'un carrefour giratoire augmente avec sa complexité ou la présence d'artefacts particuliers car inhabituels.

L'un des principaux dangers des carrefours giratoires semble en fait résider dans l'îlot central. En effet, 90% des accidents mortels sur ces carrefours sont dus au heurt du véhicule contre un obstacle situé à cet endroit. Dans certaines circonstances, on peut donc considérer un carrefour giratoire comme un obstacle agressif, notamment si 75% des usagers ont une vitesse supérieure à 70 km/h à 150m de ce carrefour (50 km/h en milieu urbain), et/ou que le rayon de l'îlot central est inférieur à 10m. ([1])

Les principaux types d'accidents observés dans les carrefours giratoires sont les suivants :
- Perte de contrôle en entrée de carrefour (environ 40% des cas) : la plupart du temps le véhicule termine sa course sur l'îlot central.
- Collision entre un véhicule entrant sur l'anneau et un véhicule qui y circule (40% des cas également).
- Perte de contrôle sur l'anneau.
- Heurt de piétons.

2.2.2 Les virages

L'action de prendre un virage peut être considérée comme une tâche délicate à effectuer, étant donné qu'elle fait appel à la fois aux capacités de guidance et de contrôle du conducteur. Compte tenu des compétences moyennes observées chez les individus, certains virages peuvent être considéré comme plus difficiles que d'autres.

On peut observer que les accidents surviennent le plus souvent dans des virages isolés de faible rayon (inférieur à 150m), ou dans des virages de rayon modéré (inférieur à 250m) mais présentant un défaut de conception tel qu'une irrégularité de la courbure. Les irrégularités de courbure sont quantifiées par la notion de « rayon mini », qui prend en compte la courbure locale de la route, et la compare à la courbure générale du virage. On considère en effet qu'il y a danger dû à un « rayon mini » si, sur une longueur d'au moins 30m, on observe un «rayon moyen partiel » inférieur d'au moins 30% au rayon moyen du virage

Le dévers de la route (c'est à dire l'inclinaison de la route suivant l'axe longitudinal) peut également fortement augmenter les risques de perte de contrôle dans les cas où il est inversé par rapport au virage, c'est à dire qu'il « penche » du côté de l'extérieur du virage, ou qu'il présente un basculement d'orientation au cours de ce virage.

Outre ces situations extrêmes, on peut considérer comme délicates à aborder les configurations suivantes :
- ligne droite de plus d'un kilomètre suivie d'un virage de rayon inférieur à 300m.
- ligne droite de 0.5 à 1 kilomètre suivie d'un virage de rayon inférieur à 200m.
- virages rapprochés (pas nécessairement consécutifs), dont le rapport des rayons est compris entre 2/3 et 3/2. Cette dernière configuration n'est cependant pas considérée comme potentiellement dangereuse si les rayons des virages sont supérieurs à 500m.

Au niveau de la perception, les virages ont pour spécificité de faire intervenir deux types de visibilité :
- la visibilité **sur** virage concerne la perception du virage lui-même par le conducteur, c'est à dire la facilité avec laquelle celui-ci peut se rendre compte qu'il est sur le point d'aborder un virage. Il a été évalué qu'une visibilité inférieure à 3 secondes peut devenir une cause directe d'accident.
- la visibilité **en** virage concerne la perception de la route lorsque le véhicule se trouve dans le virage. Celle-ci peut être très facilement dégradée par la présence de masques sur le côté concave de la route.

La dangerosité d'un virage peut également dépendre fortement de la nature de ses accotements : certains abords plus accueillants (de par leur stabilité, leur largeur, leur adhérence, …) peuvent rendre les virages plus tolérants envers les erreurs de conduite, puisque le conducteur peut espérer rattraper un début de sortie de route et éviter l'accident. Inversement la présence d'obstacles sur l'accotement peuvent aggraver les conséquences d'une sortie de route.

2.2.3 Profil en long

Le profil en long de la route (courbure dans le sens longitudinal) intervient surtout dans des problèmes de visibilité, notamment au cours de dépassements. En effet, si la route est convexe, la distance de visibilité des véhicules y circulant se trouve diminuée.
On estime que les conditions de dépassement sont confortables à partir d'une distance de visibilité des 500m. Cette distance correspond à une convexité de la route de 30 000m, et autorise de 30% à 50% des dépassements souhaités. En dessous d'une distance de visibilité de 350m (correspondant à une convexité de 14 000m), les dépassements sont jugés impossibles ou dangereux. Les situations où l'on ne dispose que d'une visibilité de 250m à 350m et que le marquage au sol n'est pas une ligne continue : le conducteur peut en déduire qu'un dépassement serait envisageable, alors qu'il est fortement déconseillé.

Concernant la présence d'obstacle, on estime qu'une convexité de 3300m offre une visibilité permettant un arrêt sur piéton à 90 km/h. Un évitement latéral reste encore possible jusqu'à des convexités de 2000m.

2.2.4 le milieu urbain

L'étude d'accidents en milieu urbain fait apparaître certaines spécificités, propres à ce milieu. En effet les piétons y jouent visiblement un rôle bien plus important : 26% des tués en milieu urbain sont des piétons, contre seulement 8% en milieu non urbain.
Mais une autre particularité des accidents en milieu urbain est de présenter une localisation très diffuse, sans qu'il y ait véritablement de « point noir ». On remarquera cependant que la plupart des accidents ont lieu sur les artères principales (70%), et assez fréquemment en carrefour (40%).

La principale cause d'accidents en milieu urbain semble être les excès de vitesse, qui seraient responsables de 50% des accidents. Les scénarios d'accidents observés dans ce milieu peuvent cependant être très divers, faisant intervenir des problèmes de signalisation, de visibilité, de non respect de priorités, de collision avec des piétons, des véhicules en déplacement ou à l'arrêt, ou même du mobilier urbain.

2.3 Scénarios d'accidents

Forts de l'expérience de l'accidentologie, nous pouvons mettre en place un formalisme nous permettant de détecter et d'identifier les différentes situations d'accident dans les cas qui nous occupent. Devant la grande diversité des situations d'accidents possibles, nous nous sommes en effet limités à deux cas bien précis ayant pour spécificité leur rapport assez directe à la configuration géométrique de l'infrastructure : les accidents en intersection par collision de véhicules, et les accidents en virages par sortie de route.

Il faut cependant garder à l'esprit l'approche événementielle que nous souhaitons toujours adopter. En effet les études d'accidentologie décrites dans le paragraphe

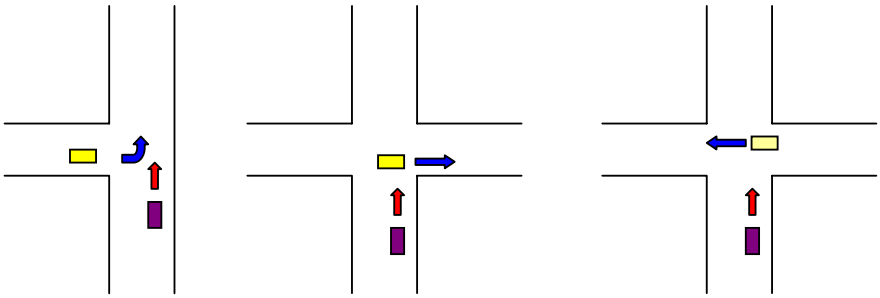
précédent prennent encore parfois la forme de statistiques, en relevant la proportion d'accidents de chaque type observé sur une configuration géométrique donnée. Or la question n'est pas de déterminer le scénario d'accident le plus probable, mais d'identifier les indices survenant avant l'accident et qui pourraient nous donner des informations sur la possibilité d'occurrence et la gravité d'une situation de risque. Par la suite nous nommerons ces indices « marqueurs », et leur identification s'est faite par la consultation d'une base de données d'Etudes Détaillées d'Accidents (EDA), dans lesquelles les accidentologistes ont reconstitué le déroulement de différents accidents, incluant la dynamique du véhicule, les conditions environnementales et le comportement du conducteur.

2.3.1 Les accidents en intersection

Les résultats décrits dans le paragraphe précédents et l'observation de cas réels d'accidents montrent que le principal danger sur une intersection est celui d'une collision avec un autre véhicule. Cette collision peut se faire de différentes façons, suivant la provenance et les intentions du véhicule avec lequel notre propre véhicule est susceptible d'entrer en collision.

Les scénarios observés parmi les cas réels sont résumés par les schémas suivants (dans tous les schémas, le véhicule instrumenté est le véhicule A, en sombre).

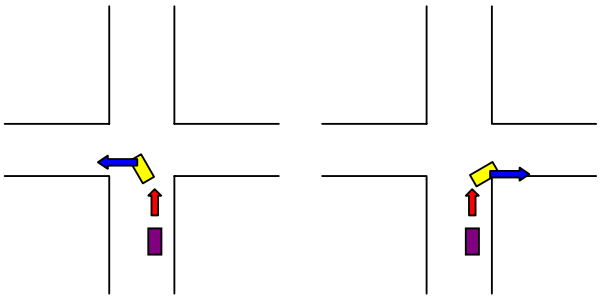
2.3.1.1 Collisions en cisaillement



Le cisaillement concerne tous les types de collision où l'un des véhicules vient percuter le second sur le côté. Dans le cas des intersections, plusieurs éléments peuvent contribuer au déroulement d'un tel scénario. Si nous nommons A le véhicule prioritaire et B le véhicule non prioritaire, il peut y avoir risque d'une telle collision si :

- le conducteur de A ne voit pas le véhicule B, par manque d'attention ou en raison d'une mauvaise visibilité.
- le conducteur de B ne voit pas le véhicule A, par manque d'attention ou en raison d'une mauvaise visibilité.
- Le conducteur de B estime mal la vitesse de A est pense avoir le temps de s'engager sur l'intersection avant l'arrivée de A.
- A arrive sur l'intersection avec une vitesse excessive.

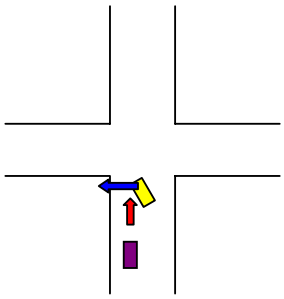
2.3.1.2 Collisions fronto-arrières sur véhicule tournant



Ces scénarios concernent le suivi d'un véhicule arrivant sur une intersection : dans le cas où notre véhicule suit le véhicule qui le précède avec une vitesse excessive, un éventuel ralentissement du premier véhicule pour pouvoir s'engager sur l'intersection peut aboutir à une collision fronto-arrière.
Il y a risque de collision si :

- A suit B avec une vitesse excessive
- B ralentit ou freine brusquement

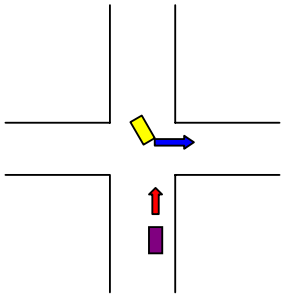
2.3.1.3 Collisions sur dépassement



Ce scénario a lieu lorsque le véhicule A amorce un dépassement sur le véhicule B au moment où celui-ci commence à tourner vers la gauche au niveau de l'intersection. Les éléments à détecter pour identifier un tel risque sont :

- vitesse excessive du véhicule A
- intention de tourner du véhicule B

2.3.1.4 Collision frontale sur véhicule tournant



Ce scénario met en scène deux véhicules circulant en sens opposés : notre véhicule A s'engage sur l'intersection au moment où le véhicule B, initialement arrêté sur l'intersection, commence une manœuvre pour tourner dans la voie secondaire.
Les marqueurs pouvant identifier une collision dans cette configuration sont :

- vitesse excessive du véhicule A
- la visibilité au niveau de l'intersection est mauvaise, rendant difficile la perception mutuelle des véhicules
- le conducteur de B estime mal la vitesse d'arrivée de A
- le conducteur de A estime mal les intentions du conducteur de B

2.3.2 Les accidents en virages

2.3.2.1 Vitesses et courbures

On observe dans les résultats retournés par l'accidentologie que les accidents en virages sont directement liés à la courbure de ceux-ci, ou plus exactement à la courbure de la trajectoire empruntée par le véhicule (en effet au cours de la traversée du virage, la trajectoire du véhicule peut avoir localement une courbure supérieure à celle du virage). Cette relation s'explique facilement, puisque tout véhicule empruntant une trajectoire de courbure c à la vitesse V subit nécessairement une accélération latérale égale à cV^2. Si cette accélération s'avère excessive, et notamment supérieure à l'adhérence de la route, le conducteur a de grandes chances de perdre le contrôle de son véhicule et donc de sortir de la route. Ainsi les études du NHTSA ([NHTSA00]) définissent la vitesse maximale autorisée par la formule :

$$V = \sqrt{R\, g\, \frac{e+f}{1-ef}}$$

Où R est la courbure du virage, g l'accélération gravitationnelle, f le coefficient de frottement latéral et e l'élévation du virage. (comme nous ne considérons pas l'élévation du virage dans nos travaux par manque d'information des SIG, cette formule revient à considérer un coefficient d'accélération dépendant uniquement de f).

On peut donc retenir comme marqueurs d'un accident en virage la vitesse du véhicule et la courbure du virage.

2.3.2.2 Voies roulantes

La notion de voie roulante précédant un virage de courbure donnée n'est elle qu'un facteur favorisant le risque d'une arrivée trop rapide sur un virage, mais ne pourrait être retenue comme marqueur de ce scénario, puisqu'elle ne fait qu'influencer le marqueur « vitesse du véhicule » que nous prenons déjà en compte de façon déterministe.

2.3.2.3 Défauts géométriques de l'infrastructure

Les problèmes de discontinuités de courbure ou de dévers sont également des éléments qui peuvent être pris en compte pour déterminer la dangerosité de l'abord d'un virage. Ces cas sont assez particuliers, puisqu'ils correspondent à des erreurs de conception ou de réalisation de la route, et sont en général corrigés par la DDE une fois qu'ils ont été localisés. Malheureusement les informations de dévers ne figurent pas dans les bases de données cartographiques actuelles, et les mesures de courbure sont rarement assez précises pour permettre la détection d'un rayon mini. Ces paramètres ne pourront donc pas être pris en compte dans nos algorithmes.

2.3.2.4 Perception et attention du conducteur

Tous les accidents en virage ne présentent pas nécessairement une perte de contrôle du véhicule. Dans certains cas, le véhicule sort de la route à des vitesses respectant toutes normes de sécurité, uniquement parce que le conducteur n'aura pas réagi à temps pour s'engager dans le virage. De telles situations peuvent être provoquées par un état défaillant du conducteur (endormissement, ébriété, distraction), mais également par une mauvaise visibilité sur le virage. En effet la présence de bâtiments, de végétation ou d'infrastructures diverses sur l'intérieur du virage peuvent constituer des masques à la visibilité et donc dégrader la perception qu'a le conducteur du virage.

2.3.2.5 Scénarios d'accidents et marqueurs

Dans le cas d'un virage, les accidents observés sont ceux correspondant aux figures 14 et 15 :

1. sortie par l'intérieur du virage. Ce type d'accident est en général lié à une inattention du conducteur, à sa mauvaise compréhension de la configuration du virage, voire à des situations plus complexes faisant intervenir des éléments tels que des obstacles sur la route.
2. sortie par l'extérieur du virage : une sortie de ce type est souvent due à une erreur d'inattention du conducteur, mais est particulièrement favorisée par une vitesse excessive en virage.

3. et 4. Sorties multiples : lorsque le conducteur perçoit une erreur bénigne, comme par exemple une trajectoire mordant légèrement sur le bas-côté, il peut parfois manifester des réactions excessives et entraîner des oscillations d'amplitude croissante de sa trajectoire, aboutissant à une sortie de route complète.

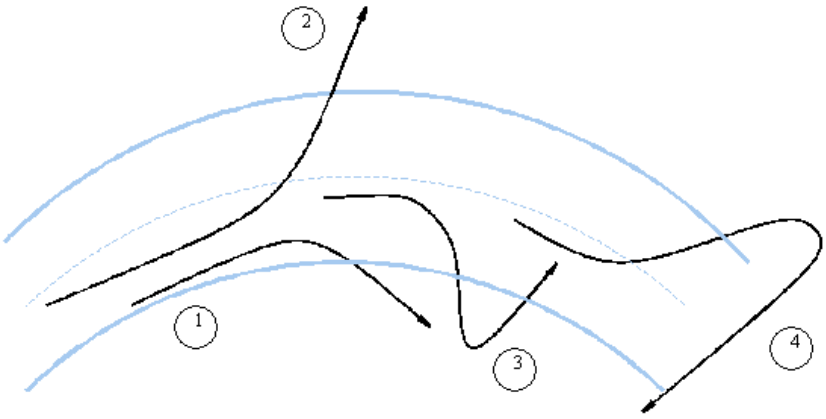


Figure 14 : Sorties de route observées sur virages à droite

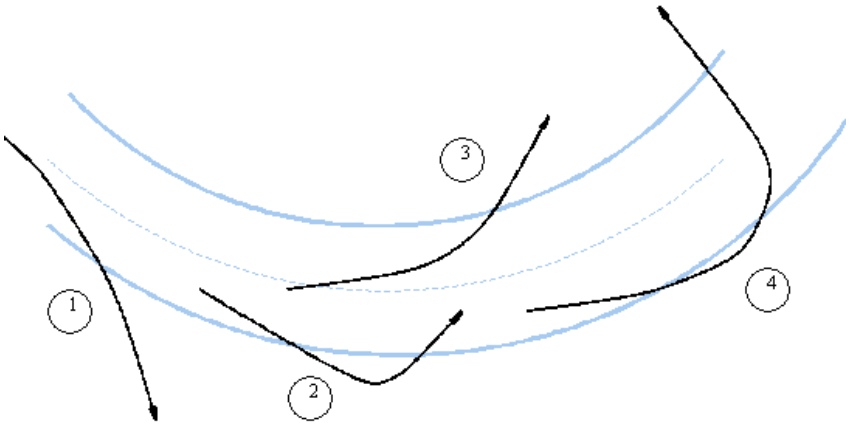


Figure 15 : Sorties de route observées sur virages à gauche

On peut donc observer des types d'accidents en virages bien différents, pouvant présenter des mécanismes complexes reposant en partie sur la commande effectuée par le conducteur. Dans la mesure où nos travaux n'envisagent pas la modélisation d'un comportement du conducteur ou même une observation de celui-ci, mais plutôt une évaluation extérieure de la situation de conduite en fonction des informations provenant du véhicule seul et de son environnement, les situations de sorties multiples seront écartées, et ne pourront être traités que dans le cadre de travaux plus étendus.
Les sorties par l'intérieur du virage sont eux aussi difficiles à anticiper si l'on ne dispose pas d'un modèle du comportement du conducteur, puisqu'ils reposent davantage sur une action excessive de celui-ci plutôt que sur une mauvaise dynamique du véhicule. Dans la suite de nos travaux, nous nous intéresserons donc uniquement au cas de sortie par l'extérieur du virage, qui peut être anticipé par l'observation d'une vitesse excessive à l'intérieur de ce virage, d'une trajectoire inadaptée ou d'une mauvaise visibilité.

Chapitre 3 : Perte de contrôle en virage

La connaissance que nous offrent les systèmes d'informations géographiques sur l'infrastructure nous pousse tout naturellement à nous intéresser au cas des pertes de contrôle en virage, puisque ces scénarios sont très intimement liés à la configuration géométrique de l'infrastructure. Ce chapitre sera consacré à l'étude de ce type particulier d'accidents. Dans un premier temps nous exposerons le résultat d'études accidentologiques en présentant leurs spécificités et les éléments accidentogènes qui leur sont propres. Suite à celles-ci, il nous a été nécessaire de pouvoir reconnaître des conditions accidentogènes dans une configuration routière donnée, et donc d'être capable d'anticiper la trajectoire de notre véhicule. Pour cela nous aurons recours à une représentation simplifiée standard des trajectoires de véhicules non holonomes, à laquelle nous assimilerons les trajectoires réelles de notre véhicule. Enfin à partir de ces trajectoires standards, nous déterminerons un critère de mesure de risque reposant pour l'essentiel sur les maxima de courbure acceptables pour une trajectoire donnée. Une représentation théorique des résultats attendus par cette approche seront présentés en fin de chapitre, la validation sur simulateur et sur données réelles étant l'objet du chapitre 5.

3.1 Rappel sur les accidents en virages

L'action de prendre un virage peut être considérée comme une tâche délicate à effectuer, étant donné qu'elle fait appel à la fois aux capacités de guidance et de contrôle du conducteur. Compte tenu des compétences moyennes observées chez les individus, certains virages peuvent être considérés comme plus difficiles que d'autres.

Le principal marqueur accidentologique d'un virage est assez naturellement sa courbure : plus celle-ci est importante, plus il sera nécessaire de réduire sa vitesse pour aborder ce virage, afin de limiter les risques de perte de contrôle.
Des phénomènes tels qu'une discontinuité dans la courbure ou une inversion du dévers de la route peuvent également perturber fortement la tâche de la conduite, mais il s'agit de données qui malheureusement ne figurent pas encore dans les bases de données cartographiques, et ne sont donc pas accessibles à notre système.

La visibilité sur virage est également un marqueur d'accident en virage, puisqu'elle influe directement sur la perception qu'a le conducteur du virage, et donc de sa compréhension de l'infrastructure et du choix d'un comportement adapté. Si un masquage empêche le conducteur de localiser un virage ou d'estimer correctement ses propriétés, les chances sont grandes qu'il abordera ce virage avec un profil de vitesse inadapté.

3.2 Le modèle dynamique du tricycle

Ce modèle ramène la représentation du véhicule à ses deux roues arrières et à une roue directrice avant. En plus de sa position et de son orientation (x, y, θ) , l'état du véhicule

comporte également l'angle de braquage ζ de la roue, définissant le centre de rotation du véhicule. Puisque dans ce modèle on considère que chaque roue roule sans glisser sur le sol, le centre de rotation du véhicule se trouve donc à l'intersection de l'axe des roues arrières et de celui de la roue directrice.

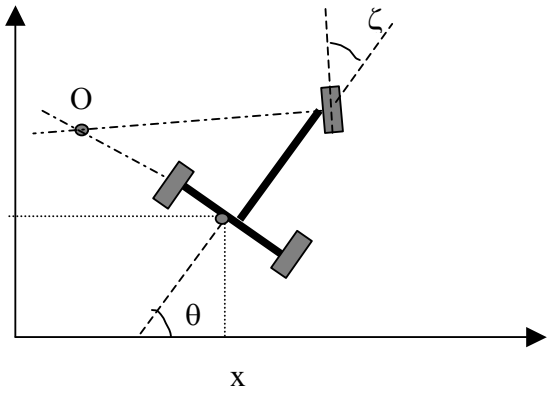


Figure 16 : Modèle tricycle

Le modèle dynamique du véhicule est alors :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{w} \\ \dot{\zeta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w\cos\zeta\cos\theta \\ w\cos\zeta\sin\theta \\ w\sin\zeta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} u1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u_2$$

Où u_1 et u_2 sont les entrées de commande du système.
w pouvant être considéré comme un paramètre de contrôle du système, on peut alors simplifier cette équation sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\zeta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta\cos\theta \\ \cos\zeta\sin\theta \\ \sin\zeta \\ 0 \end{pmatrix} w + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u_2$$

Enfin en admettant que l'on ne cherche pas à estimer l'angle de braquage ζ des roues, on peut conserver cette donnée comme un paramètre interne du système, auquel cas l'équation se simplifie encore en :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} v + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \varpi$$

On constate donc que toute la dynamique du véhicule peut se ramener à deux paramètres, l'un correspondant au déplacement longitudinal du véhicule, et le second au braquage de ses roues directrices. Remarquons au passage que cela correspond intuitivement aux deux moyens de commande d'un conducteur sur son véhicule : l'accélération et la commande du volant.

Certaines contraintes viennent en outre s'ajouter à ces commandes : chacune d'entre elles est bornée par des valeurs maximales de braquage et d'accélération, et le braquage des roues doit être une fonction C^1 du temps (c'est à dire de dérivée continue), de par la réalité mécanique du véhicule.

3.2.1 Modélisation des trajectoires

Le modèle tricycle modélise la non-holonomie du véhicule, c'est à dire les contraintes physiques qui limitent ses degrés de liberté. Seules certaines trajectoires pourront être considérées comme admissibles pour un tel véhicule ; la tâche de planification, qui consiste à déterminer une trajectoire admissible entre différentes contraintes telles que des conditions de départ et d'arrivée entre deux points, peut donc présenter certaines difficultés, de par la complexité du modèle. Afin de simplifier cette tâche, une approche courante consiste à utiliser uniquement des trajectoires constituées de différentes sections obéissant à des équations simples.

- courbes de Reeds et Shepp

les courbes de Reeds et Shepp sont un sous-ensembles de trajectoires constituées uniquement de lignes droites et d'arcs de cercle correspondant à un braquage maximale des roues directrices. La condition de connectivité des segments et des arcs est la continuité du cap du véhicule, de façon à ce que la trajectoire du véhicule soit C^1.

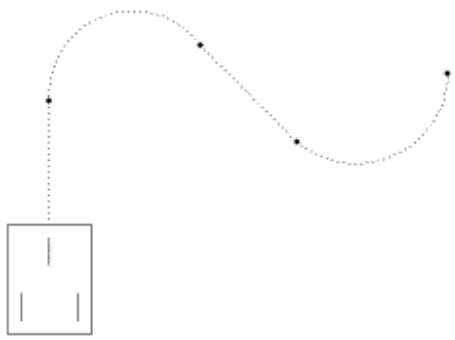


Figure 17 : trajectoire suivant Reeds et Shepp

Cette méthode de planification est très souvent utilisée de par sa simplicité, qui assure une charge de calcul assez limitée, et de par sa faculté à proposer une solution minimale entre deux configurations données, puisqu'elle effectue une commande maximale sur la courbure [Reeds 90]. Elles présentent cependant un inconvénient notable, celui de présenter des discontinuités de courbure au niveau des transitions entre les différentes sections. Dans les faits, sachant que le braquage des roues ne peut être qu'une fonction

continue du temps, il faudrait pour suivre une telle trajectoire que le véhicule s'immobilise à chaque transition entre deux sections, effectue son changement de braquage puis reparte. Ce comportement est envisageable pour des robots mobiles en conditions de laboratoire ou dans des applications particulières, mais est bien trop éloigné du cas d'un véhicule automobile effectuant un virage.

- courbes de Dubins

Afin de corriger les faiblesses de l'approche de Reeds et Shepp, il est donc nécessaire d'introduire des conditions supplémentaires sur la connectivité des différentes sections d'une trajectoire, et notamment prendre en compte la continuité de la courbure dans le temps. C'est ce qui a amené Dubins (Dubins 1957) à ajouter aux segments et arcs de cercle une troisième classe de section autorisée : les clothoïdes.
Les clothoïdes sont des courbes géométriques avec pour propriété d'avoir une courbure fonction linéaire de l'abscisse curviligne. Celle-ci s'écrit donc :

$$c(s) = k.s + c_0$$

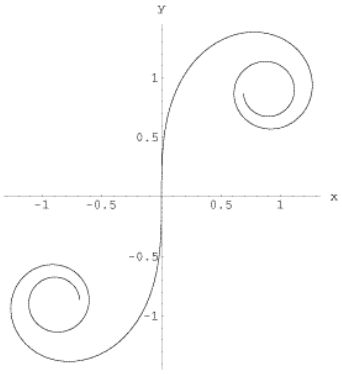
où s et c0 représentent respectivement l'abscisse curviligne et la courbure initiale de la trajectoire.

La tangente en chaque point est donc l'intégrale de cette valeur, soit :

$$\theta(s) = \frac{1}{2}k.s^2 + c_0.s + \theta_0$$

Ce qui donne en coordonnées cartésiennes :

$$\begin{cases} x(s) = x_0 + \int_0^s \cos(\theta(t))dt = x_0 + \int_0^s \cos(\frac{1}{2}k.t^2 + c_0.t + \theta_0)dt \\ y(s) = y_0 + \int_0^s \sin(\theta(t))dt = y_0 + \int_0^s \sin(\frac{1}{2}k.t^2 + c_0.t + \theta_0)dt \end{cases}$$



Ces profils de courbure continue peuvent donc servir à faire un lien entre les segments et les arcs de cercle des trajectoires de Reeds et Shepp afin de respecter le critère de continuité de la courbure en tout point, sans imposer d'arrêt au véhicule.

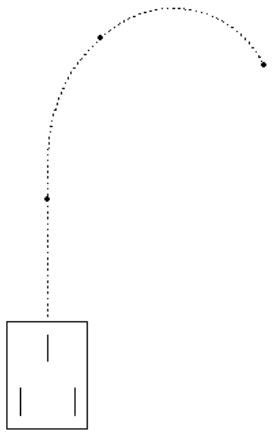


Figure 18 : trajectoire suivant une courbe de Dubins

- autres courbes

Les clothoïdes ne sont que les courbes les plus simples permettant de constituer des trajectoires admissibles en respectant les critères de continuité de courbure. Il existe bien d'autres solutions pour parvenir au même résultat, notamment en utilisant des portions de courbes polynomiales (Takahashi, Hongo and Ninomiya 1989), de splines (Nelson 1989), ou de courbes dont la courbure est une fonction polynomiale de degré 3 de l'abscisse curviligne ([Nagy 01]).

3.3 Les accidents en virages

3.3.1 arrivée sur virages simples

Les virages constituent une configuration pouvant générer des situations de danger, de par la contrainte qu'ils imposent au conducteur de suivre une trajectoire complexe et de la corriger dynamiquement durant tout le temps nécessaire à passer le virage.
Il semble évident qu'une vitesse excessive du véhicule au cours de cette manœuvre est un élément directement accidentogène. En effet pour une vitesse longitudinale v, un véhicule effectuant une giration subit une accélération latérale $\frac{V^2}{R}$ où R est le rayon de courbure de la trajectoire effectuée. Cette accélération étant ressentie par le véhicule sous la forme d'une force d'inertie, elle est susceptible de causer une perte d'adhérence du véhicule si elle est supérieure à la valeur d'adhérence de la route.
La valeur d'adhérence, exprimée le plus souvent en m/s², correspond en effet à la valeur d'accélération maximale en-dessous de laquelle le véhicule roule sans glisser. Elle dépend bien entendu de la qualité du revêtement et des conditions météorologiques, mais

comme ces informations sont difficilement accessibles, il est coutume de prendre une valeur moyenne de 3 m/s².
Lorsqu'un véhicule aborde un virage de rayon de courbure R à la vitesse V, on peut donc considérer qu'il y a danger si $\frac{V^2}{R}$ est supérieur à 3m/s² ; cependant dans le cas qui nous occupe, il semble plus judicieux d'anticiper le danger, plutôt que le détecter à l'entrée du virage. C'est à ce niveau qu'intervient la cartographie numérique et les informations sur l'infrastructure qu'elle contient : connaissant notre position courante sur la carte, il est possible d'anticiper les arrivées sur virages dont on peut connaître la courbure et la distance qui nous en sépare, et donc de prévenir la situation de danger.
Cette anticipation se fait par exploration des données cartographiques en avant de notre position ; cette description de la partie « aval » de la route est appelée « horizon électronique ».

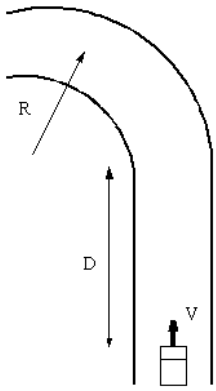


Figure 19 : approche simple du problème des virages

Considérons l'approche d'un virage de rayon de courbure R par notre véhicule circulant à la vitesse V. Même si cette vitesse ne correspond pas au critère de sécurité, c'est à dire si V²/R > 3m/s², il serait prématuré de considérer la situation comme dangereuse. En effet notre véhicule n'étant qu'en approche de virage, il lui est encore peut-être possible de décélérer afin d'aborder le virage dans des conditions de sécurité satisfaisantes ; il s'agit d'ailleurs d'un comportement de conduite tout à fait courant et sûr.
Dans le cas où un véhicule approche un virage à haute vitesse, le critère de dangerosité concernera donc la faculté du véhicule à décélérer pour aborder le virage dans de bonnes conditions.

Soit V_0 la vitesse courante, D la distance nous séparant de l'entrée du virage, et R le rayon de courbure de ce dernier. Nous allons chercher à calculer l'accélération a constante permettant d'atteindre la vitesse maximale tolérée à l'entrée du virage, et par la même l'intervalle de temps Δt séparant l'instant initial et l'instant d'arrivée sur l'intersection.

Soit V_1 la vitesse atteinte en entrée de virage, a étant constant,

$$V_1 = V_0 + a.\Delta t$$

Soit X(t) la position du véhicule au cours de l'approche,

$$X(t) = \frac{1}{2}a.t^2 + V_0.t + X_0$$

Sachant que $X(\Delta t) - X_0 = D$, le problème se ramène au système d'équations à deux inconnues :

$$\begin{cases} V_1 - V_0 = a.\Delta t \\ \frac{1}{2}a.\Delta t^2 + V_0.\Delta t - D = 0 \end{cases}$$

D'où

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{D}{V_1 + V_0} \\ a = \frac{V^2{}_1 - V_0^2}{D} \end{cases}$$

Donc les critères de sécurité sont respectés en entrée de virage si :

$$V_1 < \sqrt{adhérence.R}$$

$$soit$$

$$a < \frac{adhérence.R - V_0^2}{D}$$

Il est en outre possible d'affiner cette formule en intégrant aux équations le temps de réaction supposé du conducteur. Dans les rapports du NHTSA ([NHTSA00]), il est stipulé que cette valeur doit être au minimum prise à 1.5s, puisqu'il s'agit du temps minimum de réaction à une alarme observé chez 98% de la population.
De façon générale, soit t_r ce temps de réaction, l'équation de calcul de l'accélération devient :

$$a < \frac{adhérence.R - V_0{}^2}{D - t_r.V_0}$$

Nous considérons donc qu'il y a situation de danger potentiel lorsque cette accélération dépasse en valeur absolue une limite arbitraire ; dans la pratique, cette limite peut être prise aux alentours d'une valeur limite de confort, estimée à 3 m/s² chez la plupart des constructeurs (les lignes de conduite du NHTSA suggérant plutôt 1.5 m/s²).

Cependant dans notre approche nous ne nous plaçons pas dans une problématique de réponse à une alarme, mais de quantification continue d'un certain risque de façon continue au cours du déplacement du véhicule. Pour respecter cette approche, nous ne considèrerons pas le risque comme le passage par un seuil arbitraire sur le temps de réaction du conducteur, mais comme l'écart temporel séparant la configuration courante d'une configuration maximale autorisée.
Ainsi si nous considérons que les conditions décrites ci-dessus définissent les conditions maximales autorisées d'arrivée sur virage, nous pouvons définir une zone de décélération maximale dans la portion de route précédant l'entrée du virage, cette zone correspondant à une décélération de notre véhicule de sa vitesse courante V_0 à la vitesse d'entrée en virage $V_1 = V_{max\ autorisée}$

Le temps d'arrivée t_a sur l'entrée de cette zone de décélération maximale en considérant que le véhicule conserve la vitesse V_0 peut alors être interprétée plus intuitivement par « si le véhicule conserve sa vitesse actuelle, le conducteur dispose d'un temps t_a pour amorcer sa phase de décélération ».
Bien entendu il ne faut pas voir ce raisonnement comme une tentative de prédiction de la trajectoire du véhicule au cours de l'approche du virage, puisqu'il est très peu vraisemblable que le conducteur maintienne une vitesse constante. Il s'agit donc plus exactement d'une évaluation de l'adéquation de la vitesse courante à la configuration de l'infrastructure.

3.3.2 arrivée en virages, avec considération de trajectoires

La seule considération de la courbure de la route et de la vitesse du véhicule s'avère cependant insuffisante pour identifier la plupart des situations dangereuses en virages. En effet les relevés sur sites d'accidents ont montré qu'une majorité de sorties de routes en virages se font pour des vitesses n'excédant pas les limites imposées par la courbure de la route.

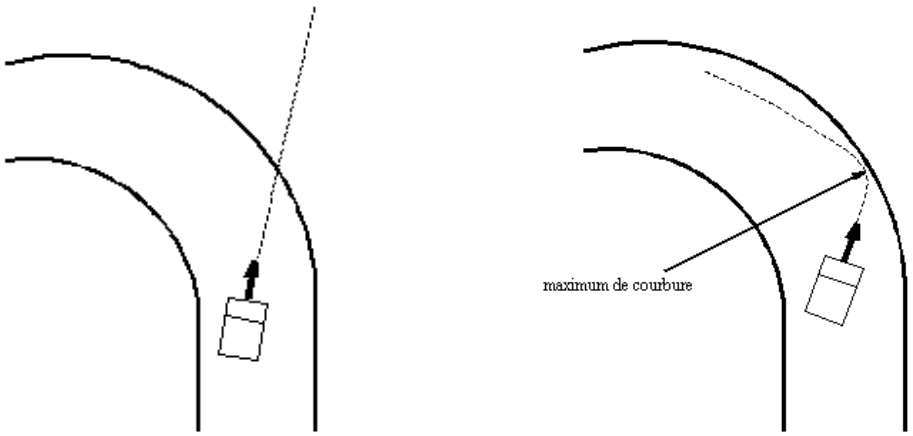


Figure 20 : Perte de contrôle par courbure locale excessive

Les scénarios le plus souvent observés font plutôt apparaître des pertes de vigilance du conducteur et des erreurs de guidance : le conducteur ne percevant pas le virage à temps ou ayant une mauvaise estimation de sa courbure aura tendance à sortir de la route par l'extérieur du virage, ou bien, voulant rattraper tardivement son erreur, il fera effectuer à son véhicule une trajectoire de courbure supérieure à celle de la route, et pour laquelle sa vitesse n'est pas adaptée. Il en résulte alors une perte de contrôle du véhicule et vraisemblablement une sortie de route.

Détermination du niveau de danger

Le problème se pose donc sous la forme suivante : soit un véhicule entrant avec une vitesse V_0, une courbure c_0 et un cap θ_0 donnés dans un virage de courbure c_v connue, comment évaluer les risques que la trajectoire empruntée par le véhicule présente localement une courbure excessive compte tenu de la vitesse du véhicule ?
Il faut avant tout être conscient que si une situation de danger est presque toujours possible quelles que soient les conditions de conduite, sa vraisemblance n'est que

rarement élevée, puisque le conducteur dispose la plupart du temps d'une marge de manœuvre suffisante pour choisir une trajectoire tout à fait sécuritaire. Il est donc exclu que notre système déclenche une alerte dès qu'il détecte une situation de danger potentiel . Afin qu'une possible situation de danger soit interprétée comme un risque réel, il faut que la marge de manœuvre laissée au conducteur soit trop réduite pour que l'on puisse lui faire entièrement confiance pour prendre les bonnes décisions. La détermination du niveau de risque reposera donc sur la détermination du "pire cas", c'est à dire la trajectoire limite autorisée au conducteur sans que celui-ci sorte de la route ni n'effectue une trajectoire de courbure supérieure au seuil autorisé.
Bien que cette approche puisse présenter des similitudes avec des travaux de trajectographie et de planification classiques ([Laumond98]), il est indispensable de bien différencier les motivations qui nous animent. En effet notre but n'est pas de déterminer une quelconque consigne qui pourrait être interprétée comme correspondant à une trajectoire souhaitée du véhicule. Dans notre approche, nous considérons à tout moment le conducteur libre de ses choix de trajectoires et prenons en compte la diversité possible de ces choix, afin de ne pas tirer de conclusions alarmistes dans une situation où le conducteur choisirait une stratégie de conduite imprévue mais correcte sur le plan sécuritaire.
Nous cherchons en revanche à identifier les situations où cette marge de manœuvre se réduit en raison des propriétés cinématiques du véhicule et de la configuration géométrique de l'infrastructure. Pour être plus précis, nous cherchons à établir dans chaque cas si la vitesse courante du véhicule n'est pas excessive pour autoriser le conducteur à effectuer sa trajectoire en virage dans de bonnes conditions.

Evaluation des trajectoires

Pour le cas qui nous occupe nous devons donc déterminer, compte tenu des conditions initiales de position, de vitesse et d'orientation du véhicule, si les trajectoires en virage qui en découlent sont susceptibles de présenter un danger. Le critère de danger repose toujours sur l'évaluation de l'accélération latérale subie par le véhicule au cours de sa trajectoire, cette accélération étant fonction de la vitesse du véhicule et cette fois de la courbure réelle de sa trajectoire, et non de celle du virage.
Il est donc nécessaire de modéliser la trajectoire effectuée par un véhicule dans une stratégie de rattrapage de trajectoire en virage.

3.3.3 Cas d'une trajectoire de Reeds et Shepp

Dans un premier temps et par souci de simplicité, nous allons considérer que le véhicule n'effectue que des lignes droites ou des arcs de cercle. Nous ne retiendrons pas la contrainte de continuité de courbure, ce qui correspond à une rotation instantanée des roues directrices.

La vitesse du véhicule étant donnée, nous pouvons en déduire la courbure maximale $C_{\max} = \frac{adhérence}{V^2}$ autorisée pour que le véhicule ne présente pas de risque de perte d'adhérence. La stratégie de rattrapage de trajectoire consiste donc à éviter la sortie de route au moyen d'une trajectoire circulaire de courbure inférieure à $C_{\max}$.

Soient C_0 la courbure de la trajectoire du véhicule en entrée de virage, et C_v la courbure du virage. Dans le cas limite la trajectoire circulaire de courbure $C_{\max}$ est tangente à la trajectoire courante du véhicule et au rebord extérieur du virage. La trajectoire limite emprunte donc l'arc de cercle de rayon $R_{\max} = \frac{1}{c_{\max}}$ tangent à ces deux limites, circulaires également. Le centre de ce cercle se trouve très facilement par un raisonnement géométrique : la contrainte de tangence aux deux cercles impose que le centre de l'arc de cercle de courbure $C_{\max}$ impose que son centre se trouve à l'intersection des cercles concentriques aux deux cercles extérieurs mais de rayon $R_v - R_{\max}$ et $R_0 - R_{\max}$. Ce raisonnement est résumé par la figure 21 : on peut en effet y observer la trajectoire courante du véhicule, définie par sa position initiale, sa vitesse et sa courbure instantanées, et le bord extérieur du virage. La trajectoire limite de correction est alors représentée par trois portions de cercle, l'une de courbure C_0, suivie d'un arc de cercle de courbure $C_{\max}$, pour finir par une portion de courbure C_v coïncidant avec le rebord même du virage.

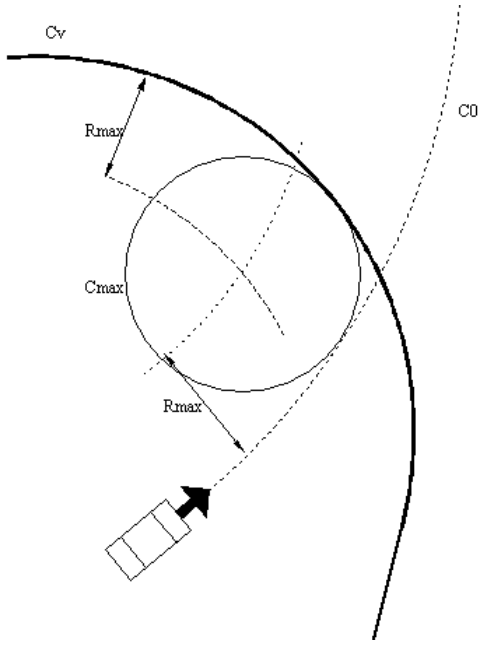


Figure 21 : Trajectoire de rattrapage

Le point de tangence entre la trajectoire courante du véhicule et le cercle de courbure $C_{\max}$ constitue donc la limite au delà de laquelle il n'est plus possible de corriger sa trajectoire en conservant la même vitesse sans dépasser le maximum de courbure autorisé. C'est donc la distance séparant le véhicule de ce point qui servira à quantifier le niveau de dangerosité de la trajectoire.
Plusieurs critères sont possibles pour exploiter cette information et l'interpréter sous forme de danger. Dans cette application, nous interpréterons cette donnée sous la forme de temps de réaction accordée au conducteur pour corriger sa trajectoire.

3.3.4 Cas d'une trajectoire de Dubins

Nous avons vu dans le paragraphe 2.2.1 que la modélisation de trajectoires sous la forme de courbes de Reeds et Shepp ne respecte pas le critère de continuité de courbure. Ce critère est cependant particulièrement important dans ce scénario ci, puisque c'est la courbure de la trajectoire qui détermine le niveau de dangerosité. Il est donc préférable d'adopter une modélisation plus réaliste des trajectoires, en utilisant des courbes de Dubins.

Lorsqu'un conducteur constate que son véhicule arrive sur un virage avec un cap et une courbure qui ne lui permettent pas de rester dans la voie, il n'a pas d'autre choix que d'augmenter la courbure de sa trajectoire afin de modifier rapidement son cap.
La première phase de sa trajectoire sera donc constitué d'une première clothoïde C_1 paramétrée par la courbure initiale de la trajectoire du véhicule, son orientation initiale θ_0 et la vitesse k_1 avec laquelle il fait évoluer la courbure de sa trajectoire :

$$C_1 \begin{cases} x_0 + \int \cos(\frac{1}{2} k_1 . t^2 + c_0 . t + \theta_0) dt \\ y_0 + \int \sin(\frac{1}{2} k_1 . t^2 + c_0 . t + \theta_0) dt \end{cases}$$

Suite à cette portion de trajectoire, le véhicule est passé de la position (x_0, y_0) à la position (x_1, y_1), comme le montre la figure 22.

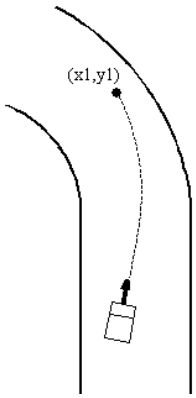


Figure 22 : Première étape de correction de trajectoire

Dans une deuxième étape, le conducteur est susceptible de conserver pendant un certain temps une courbure constante, effectuant alors un arc de cercle. La courbure de la trajectoire est alors nécessairement supérieure à celle du virage, sans quoi il serait impossible au véhicule de rester dans la voie (voir figure 23).

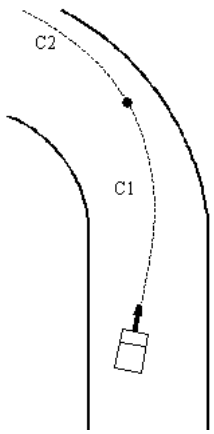


Figure 23 : Seconde étape de correction de trajectoire

Dans le cas où le véhicule décrit cet arc de cercle, la position du véhicule passe de (x_1, y_1) à (x_2, y_2).

Enfin dans un troisième temps, le conducteur doit nécessairement faire diminuer la courbure de sa trajectoire, afin de l'adapter à celle du virage et donc revenir à une situation stable. La troisième partie de la trajectoire sera donc constituée d'une seconde clothoïde C_3, paramétrée cette fois par la courbure de sortie de la première clothoïde, la vitesse k_3 d'évolution de la courbure, et les positions intermédiaires du véhicule au moment du changement de section de trajectoire.

$$C_3 \begin{cases} x_2 + \int \cos(\frac{1}{2} k_3.t^2 + c_1.t + \theta_2)dt \\ y_2 + \int \sin(\frac{1}{2} k_3.t^2 + c_1.t + \theta_2)dt \end{cases}$$

Au terme de cette troisième étape et si on se limite à un scénario simple, le véhicule aboutit à la fin de C_3 en un point (x_3, y_3) situé dans la voie et au niveau duquel la courbure de la trajectoire correspond à celle du virage. Dans les faits il peut arriver que la trajectoire du véhicule ne soit pas parfaitement corrigée au bout de ces seules étapes, et que plusieurs itérations du même comportement soient nécessaires.

Nous considérerons que cette trajectoire est admissible sur le plan sécuritaire si sa courbure ne dépasse à aucun moment la limite imposée par la vitesse du véhicule.

Afin de déterminer la "distance" qui sépare la configuration de notre véhicule de celle correspondant à ce pire cas, nous raisonnerons en raisonnant à partir du point de sortie de la trajectoire, et en remontant jusqu'à la position courante du véhicule.

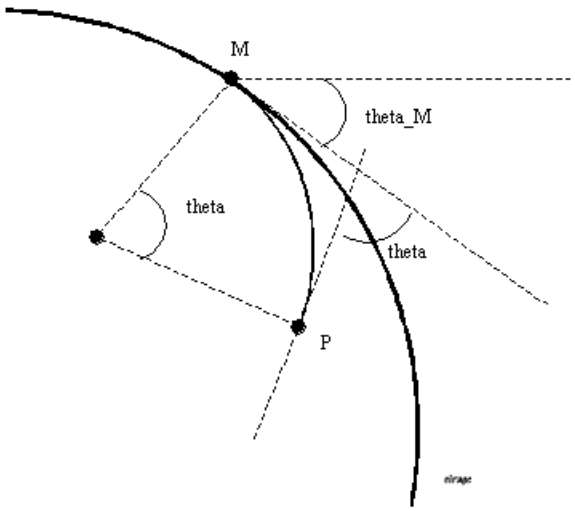


Figure 24 : Localisation du point limite P

Soit en effet le point de sortie M, situé sur le cercle correspondant au rebord extérieur du virage ; la position de ce point sur le cercle peut être paramétrée par l'angle θ_M que fait la tangente au cercle en ce point par rapport à un axe fixe de coordonnées (voir figure 24). La trajectoire limite de rattrapage est celle pour laquelle le véhicule arrive en M à la fin de la courbe C_2, C_2 étant un arc de cercle de courbure $C_{\max}$, dont les extrémités sont M et un point P à identifier.

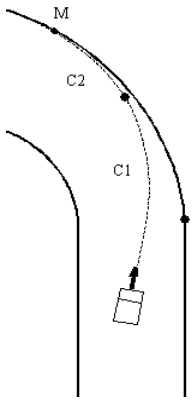


Figure 25 : Correction de trajectoire en deux étapes

La longueur de cet arc est encore inconnue à ce stade, paramétrons la par la valeur θ du secteur angulaire décrit au cours de cet arc de cercle (voir figure 24).
La tangente en P a pour angle

$$\theta_P = \theta_M + \theta$$

La position du point P est donnée par :

$$P = M + \begin{pmatrix} \cos\theta_M & -\sin\theta_M \\ \sin\theta_M & \cos\theta_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{\max}\sin\theta \\ R_{\max}(\cos\theta - 1) \end{pmatrix}$$

La portion de clothoïde C_1 correspondant à la première étape de la trajectoire du véhicule doit également rejoindre un le point P à un point Q de la trajectoire suivie par le véhicule en respectant les critères de continuité des tangentes et des courbures (voir figure 25).

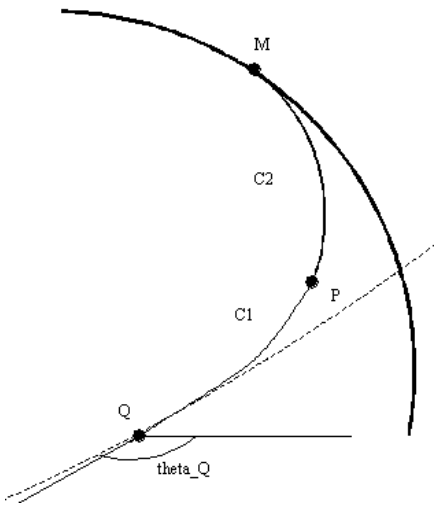


Figure 26 : Lieu du point limite P

Soit la clothoïde C_1 paramétrée par le coefficient k=$k_{\max}$, son équation est la suivante :

$$C_1 \begin{cases} x_P + \int \cos(-\frac{1}{2} k_{\max} .t^2 + c_{\max} .t + \theta_P) dt \\ y_P + \int \sin(-\frac{1}{2} k_{\max} .t^2 + c_{\max} .t + \theta_P) dt \end{cases}$$

Cette clothoïde doit être tangente à la trajectoire courante du véhicule en un point Q, tel que sa courbure en Q soit égale à c_0.

Comme le long de C_1, la courbure évolue suivant la loi $c = c_{\max} - ks$, on en déduit :

$$s_Q = \frac{c_{\max} - c_0}{k}$$

d'où

$$\theta_Q = -\frac{1}{2} k s_Q{}^2 + c_{\max} s_Q + \theta_P$$

$$\theta_Q = -\frac{1}{2} k \left(\frac{c_{\max} - c_0}{k} \right)^2 + c_{\max} \left(\frac{c_{\max} - c_0}{k} \right) + \theta_P$$

De plus les coordonnées du point Q sont les suivantes :

$$Q = \left| \begin{array}{l} x_P + \int_0^{s_Q} \cos(-\frac{1}{2}k.t^2 + c_{\max}.t + \theta_P)dt \\ y_P + \int_0^{s_Q} \sin(-\frac{1}{2}k.t^2 + c_{\max}.t + \theta_P)dt \end{array} \right.$$

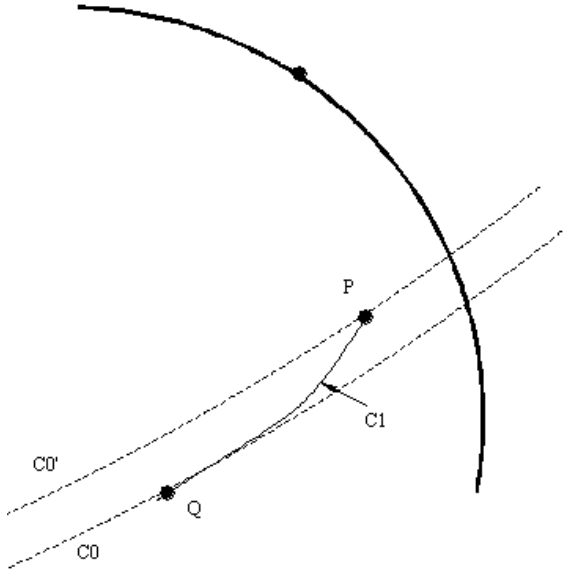


Figure 27 : portion de clothoïde de courbure évoluant entre courbure courante c_0 (point Q) et courbure maximale autorisée $c_{\max}$ (point P)

Trouver la trajectoire limite de correction de trajectoire revient donc à calculer les paramètres θ et θ_M telles que les courbes décrites ci-dessus vérifient les conditions suivantes :

- C_1 est tangent à la trajectoire courante du véhicule en Q
- C_1 est de courbure c_0 en Q et de courbure $c_{\max}$ en P
- C_2 est tangent au virage en M

Encore une fois la résolution analytique de ce problème semble complexe, mais sa résolution géométrique est en fait très simple.
Observons notamment que les paramètres θ et θ_M ne jouent que sur l'orientation de la clothoïde C_1, et non sur sa forme ou sa longueur, qui elles ne dépendent que des courbures c_0 et $c_{\max}$ connues. Pour un point Q quelconque parcourant le cercle de courbure c_0 correspondant à la trajectoire courante du véhicule, on sait que le point P correspondant à l'extrémité d'une clothoïde de type C_1 et ayant Q pour extrémité de moindre courbure parcourra un cercle de courbure $c_0' > c_0$ et de même centre que le cercle parcouru par Q.

Ces cercles sont définis par les conditions initiales du problème (ils ne dépendent que de la position et la vitesse du véhicule ainsi que de la courbure initiale de sa trajectoire).

Trouver la trajectoire de correction limite revient donc à positionner l'arc de cercle de courbure $c_{\max}$ de façon à ce qu'il soit à la fois tangent au virage en un point M, et intersecte le cercle C_0' en un point P avec un angle θ_P fixé.

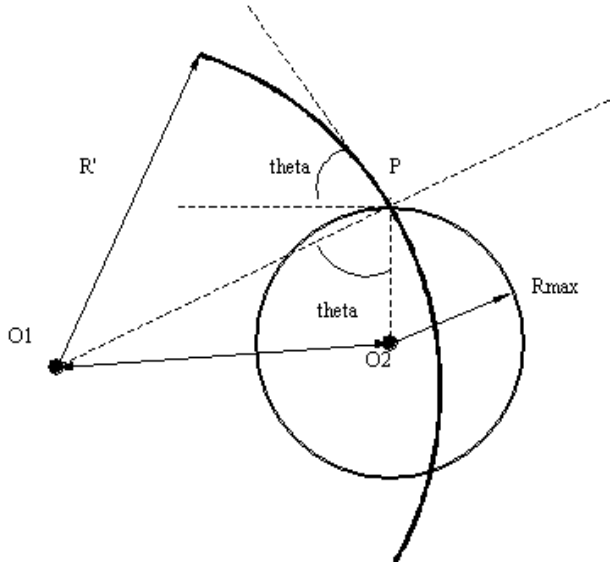


Figure 28 : Lieu du point P pour O2 quelconque

Par rapport au cas précédent où l'on modélisait la trajectoire sous forme de courbe de Reeds & Shepp, nous nous trouvons cette fois ci dans un cas général où l'intersection avec l'un des deux cercles directeurs n'est pas tangente. Cependant le raisonnement est globalement similaire : si nous observons la figure 28 qui représente le cercle recherché et son intersection d'angle θ_P avec le cercle C_0', nous constatons que lorsque P parcourt le cercle C_0', le centre O_2 du cercle cherché parcourt un cercle de rayon O_1O_2 que nous cherchons à évaluer. En appliquant le théorème d'Al Kashi au triangle PO_1O_2, on obtient la formule :

$$R_a{}^2 = O_1O_2{}^2 = R'^2 + R_{\max}{}^2 - 2R'R_{\max}\cos\theta$$

soit

$$R_a = \sqrt{R'^2 + R_{\max}{}^2 - 2R'R_{\max}\cos\theta}$$

Tout comme dans le cas précédent, le centre de la courbe C_2 s'obtient donc également par calcul d'intersection entre deux cercles, l'un de rayon $R_v - R_{\max}$ et concentrique au virage, et l'autre de rayon R_a et concentrique à la trajectoire initiale du véhicule, comme le résume la figure 29.

Comme dans le cas précédent, le critère retenu pour estimer le niveau de dangerosité de la scène est le temps séparant la position actuelle du véhicule du point Q, point de départ de la trajectoire limite de correction.

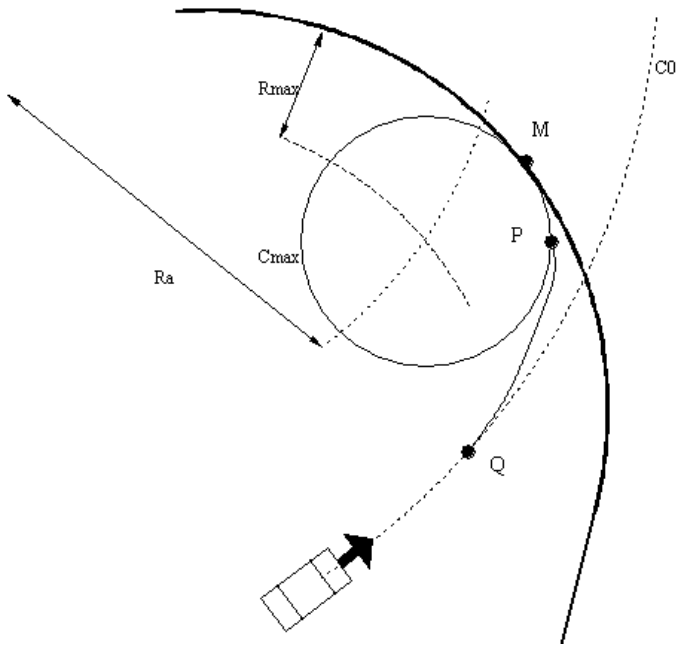


Figure 29 : Localisation du point de sortie

Connaissant la position et la vitesse courantes du véhicule, il est donc simple d'estimer par les critères géométriques explicités précédemment la position du point Q qui définit dans ce cas de figure le dernier point de réaction autorisé. Le temps de réaction autorisé est donc défini par le rapport de la distance nous séparant de ce point sur la vitesse courante de notre véhicule.

3.3.5 Représentation des résultats attendus

La méthode décrite précédemment pour estimer le danger à l'intérieur du virage repose sur la mesure du temps séparant le véhicule d'un point précis à partir duquel il ne lui sera plus possible de corriger sa trajectoire sans risquer soit une sortie de route, soit une accélération latérale trop importante.
Les paramètres entrant en jeu sont bien plus nombreux que dans le cas simple d'approche sur intersection. En effet interviennent directement dans la mesure du délai de réaction du conducteur :

- la position initiale du véhicule sur la voie
- son orientation par rapport à la voie
- sa vitesse
- la courbure du virage
- la courbure initiale de la trajectoire du véhicule.

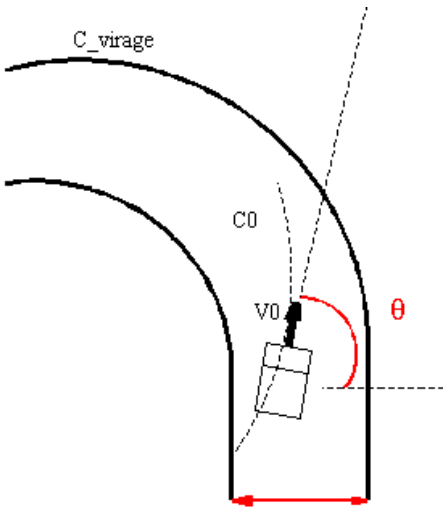


Figure 30 : Configuration initiale

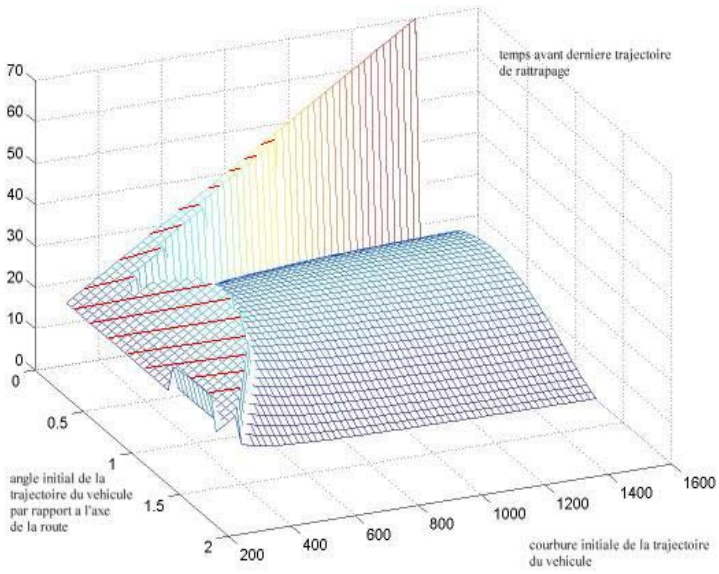


Figure 31 : temps de rattrapage en fonction de la courbure et de l'orientation initiale du véhicule (angle initial en radians et courbure en mètres)

La figure 31 illustre la dépendance du temps séparant le véhicule du point limite de changement de trajectoire, par rapport à l'orientation du véhicule. Pour un virage de rayon fixé, une vitesse d'approche et une position de départ sur la voie déterminée, on peut en effet observer les valeurs de ce temps limite pour différentes valeurs de l'orientation du véhicule et de la courbure de sa trajectoire.
Les parties hachurées sur le schéma correspondent aux zones non accessibles pour des raisons pratiques, notamment dans le cas de fortes courbures initiales qui impliqueraient que le véhicule ne pourrait pas rattraper sa trajectoire sur le rebord extérieur du virage : il s'agirait là en effet d'un cas de sortie par l'intérieur du virage, or nos équations ont été posées pour une sortie par l'extérieur en raison d'une trop forte vitesse.
La figure 32 est plus orientée sur la prise en compte de la géométrie du virage, et donc pour cela exprime la même valeur de temps, cette fois ci en fonction de la courbure du virage, et de celle de la courbure initiale de la trajectoire du véhicule.

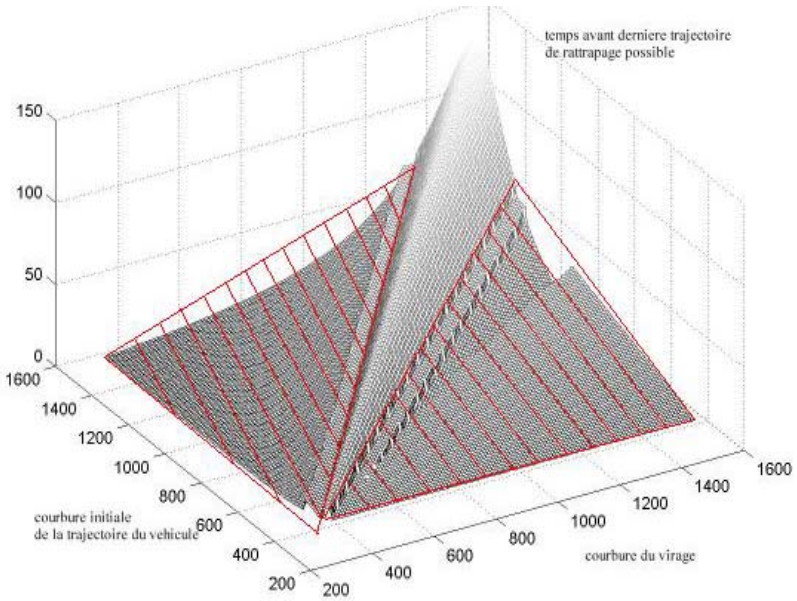


Figure 32 : temps de rattrapage en fonction de la courbure du virage et celle de la trajectoire du véhicule

On observe que les temps maximaux sont observés au voisinage de valeurs où ces deux courbures sont proches, ce qui est assez intuitif. Cependant ce maximum ne se trouve pas exactement sur le plan d'égalité des deux courbures, puisque sa position dépend également de l'orientation initiale du véhicule.
Cette fois encore la forme générale des équations présente des zones inaccessibles dans les conditions réelles d'expérimentation ; ces zones sont visualisées sur le schéma par les parties hachurées. Les discontinuités apparaissant sur la figure correspondent au passage à différentes stratégies de récupération, toutes étant inacceptables dans notre modèle de trajectoire (récupération par l'extérieur du virage, récupération après sortie de route, point de tangence situé derrière le véhicule, …).

Chapitre 4 : Arrivée sur intersection, anticipation de collisions entre véhicules

Considérer la seule infrastructure comme élément accidentogène principal est encore très limitatif. En effet la présence d'autres véhicules et leur comportement peut jouer un rôle très important dans les risques encourus par notre propre véhicule. Afin d'atteindre un niveau supérieur d'assistance au conducteur, il est donc nécessaire de prendre en compte ces éléments et de définir des critères de mesure de risque similaires à ceux définis dans le chapitre précédent pour les pertes de contrôle en virage.
Puisque nous nous attachons toujours à notre connaissance de l'infrastructure routière, nous considèrerons dans un premier temps le cas des arrivées sur intersections, puisqu'il s'agit de la configuration géométrique favorisant le plus la rencontre de véhicules et susceptible de leur inspirer des comportements complexes tels que déboîtements, ralentissements ou traversées. Dans le même esprit que pour les sorties de route, nous nous appuierons donc sur des données accidentologiques pour extraire les principaux paramètres accidentogènes de ce genre de situations. Une fois ceci fait nous proposerons dans un premier temps des heuristiques simples afin de traiter des scénarios bien spécifiques d'arrivées sur intersections, puis nous définirons un modèle plus général de représentation du risque de collision. La généralité de ce modèle devrait d'ailleurs nous permettre dans nos travaux futurs de nous affranchir de la limitation aux arrivées sur intersections, pour ne considérer que le risque de collision quelle que soit la configuration géométrique de l'intersection.

4.1 Arrivée sur véhicules s'apprêtant à tourner, une approche simple

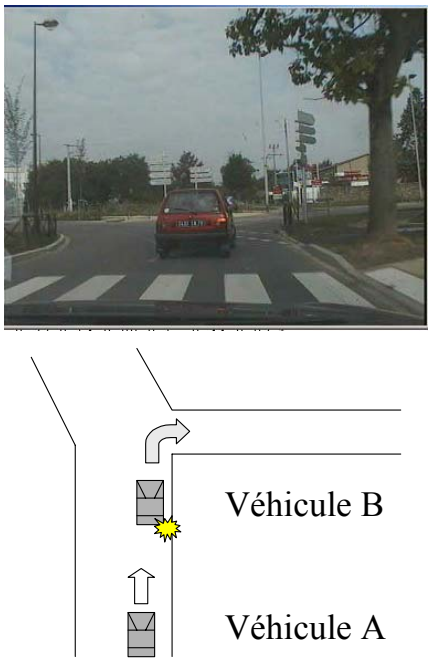


Figure 33 : suivi de véhicule sur intersection

Cette configuration est à la fois simple et courante : le suivi d'un véhicule approchant une intersection. Le scénario d'accident correspondant consiste en un ralentissement plus ou moins brutal du véhicule suivi, pouvant causer un choc fronto-arrière avec notre véhicule si notre profil de vitesse n'est pas adapté.

Dans ce cas, la situation dangereuse est immédiatement identifiable : il s'agit d'éviter une collision avec un obstacle mobile situé sur la route. Pour cela nous disposons déjà de dispositifs développés pour des applications d'ACC (Adaptive Cruise Control) et qui garantissent un temps de suivi minimum entre deux véhicules. Un tel dispositif n'a besoin que du radar pour fonctionner, puisque ce seul capteur peut retourner la position et la vitesse relative de la cible suivie.
Cependant nous pouvons également chercher à exploiter les informations dont nous disposons, et qui permettent de deviner les intentions du conducteur du véhicule suivi, et ainsi d'anticiper la situation de crise.
Dans ce cas précis, les intentions du conducteur se manifestent par l'activation d'un clignotant, voire de feux stop, que nous savons détecter en employant les algorithmes décrits dans le paragraphe III.C. Nous pouvons également prendre en compte la distance à l'intersection, fournie par le système de localisation, afin de relativiser l'importance de ces informations.

Connaissant la distance nous séparant de l'intersection, il est possible d'anticiper la décélération du véhicule cible. En effectuant un modèle simple de décélération constante pour arriver sur l'intersection à vitesse nulle, il est possible de définir son profil de vitesse tout au long de l'approche, et donc la décélération requise de notre propre véhicule pour éviter toute collision.
Lorsque cette décélération dépasse un seuil de confort, généralement pris de l'ordre de 3 m/s^2, on peut considérer qu'il y a un situation de risque.

La sortie du système dépend alors en notre interprétation des intentions du conducteur. En effet la traversée d'une intersection dans cette configuration ne présente aucun danger si le véhicule suivi se contente de traverser l'intersection sans ralentir. Le niveau de risque émis par le système ne prendra donc que trois états possible :

- un état "sécurité" si le critère de décélération sur le véhicule suivi reste en-dessous du seuil de confort.
- un état "doute" si ce critère dépasse le seuil de confort mais qu'aucune intention de tourner n'a été détectée ; dans cette configuration, il est encore envisageable que le véhicule traverse l'intersection à vitesse constante et donc ne présente aucun danger particulier.
- Un état "danger" si ce critère dépasse le seuil de confort et qu'une intention de tourner a été détectée sous la forme de clignotants ou de feux stop.

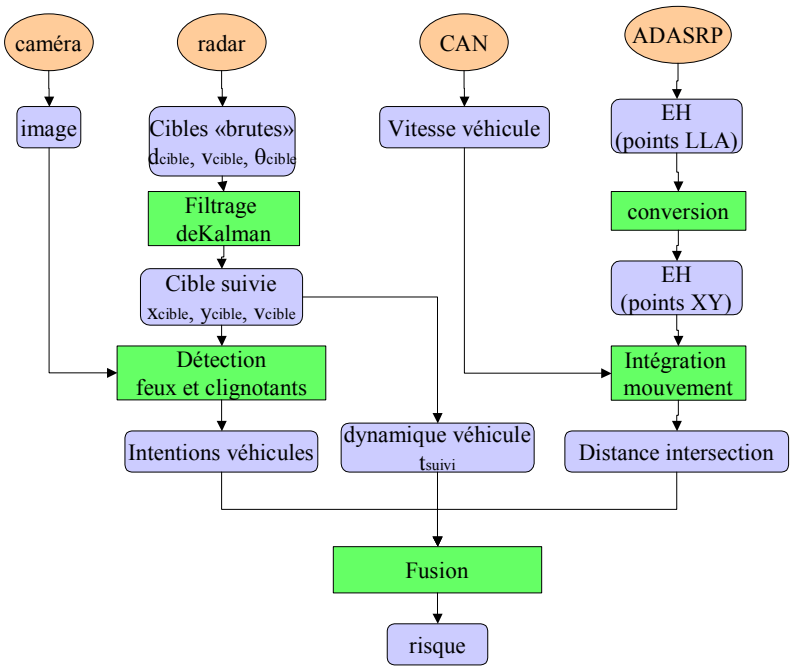


Figure 34 : Schéma récapitulatif du traitement des arrivées sur véhicule tournant

La figure 34 résume schématiquement le traitement de ce scénario simple. On constate que pour avoir accès aux différents critères accidentogènes, il est nécessaire de disposer de capteurs spécifiques et d'algorithmes de traitement appropriés, notamment en ce qui concerne la détection de signaux indiquant les intentions du conducteur du véhicule suivi. En outre afin de prendre en compte l'approche même de l'intersection, il est indispensable d'explorer la base de données cartographique en avant du véhicule, et non de se limiter aux informations locales à notre positionnement courant. Ces données sur l'aval de notre trajectoire, que nous nommerons horizon électronique (EH), sont également l'objet de traitement particuliers.
L'ensemble de ces traitements sera décrit plus en détails dans le chapitre 5.

4.2 Arrivée sur véhicule s'engageant latéralement sur une intersection

Ce scénario pose le problème de l'arrivée sur une intersection sur laquelle un véhicule est susceptible de s'engager, en provenant de la voie traversée par notre véhicule.

Figure 35 : arrivée sur véhicule de profil

Le principal risque dans ce scénario est bien entendu le risque de collision par cisaillement avec le véhicule s'engageant sur l'intersection. L'algorithme à mettre en place en priorité concerne donc la détection des véhicules abordant l'intersection, incluant l'estimation de leur position et de leur vitesse par rapport à notre voie de circulation.
Le niveau de risque peut également être tempéré par le niveau de visibilité sur l'intersection, puisque dans certaines conditions la non-détection d'un véhicule pourra être contrebalancée par la détection de masques à la visibilité, émettant l'hypothèse qu'un véhicule pourrait être présent mais non perceptible.

Les trois états de sortie de l'évaluateur de danger sont :
- état «sécurité » si aucun véhicule n'est détecté et que la visibilité sur l'intersection est jugée bonne
- état « doute » si un véhicule est détecté mais que la distance à l'intersection permet un arrêt sur l'intersection dans des conditions confortables, ou si aucun véhicule n'est détecté mais que la visibilité sur intersection est jugée mauvaise.
- état « danger » si un véhicule est détecté sur l'intersection et exige une décélération d'urgence.

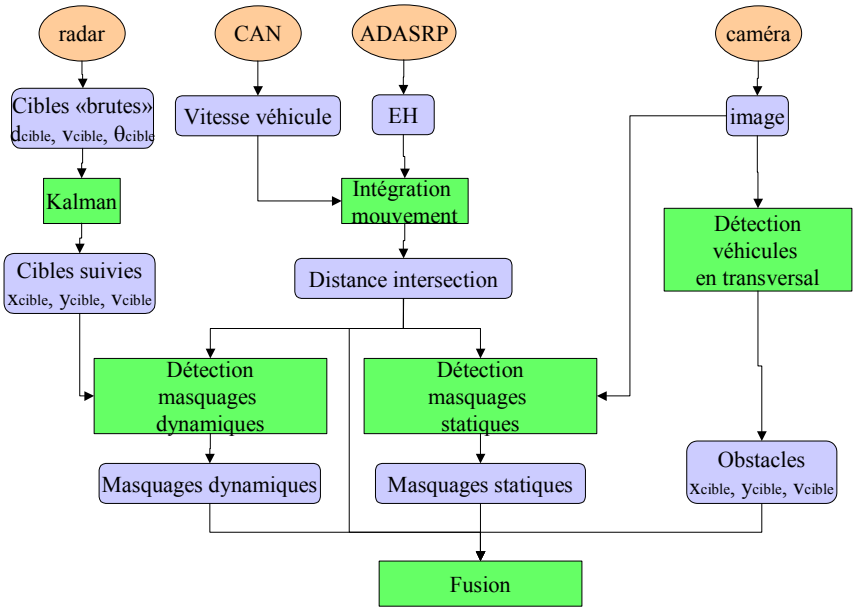


Figure 36 : schéma récapitulatif de la détection de véhicules de profil

De façon similaire au cas des véhicules tournant, la figure 36 synthétise les traitements effectués dans l'analyse de ce scénario. On constate donc que les trois traitements principaux concernent la détection des véhicules, celle de masquages statiques et celle de masquages dynamiques.
Les algorithmes développés dans ce but seront également décrits en détail dans le chapitre 5.

4.3 Détection de collisions dans le cas général

On peut constater que l'évitement de collisions entre véhicules constitue un problème en soi dans les situations d'accidents possibles.
Cependant, si l'on se place dans un cas plus général que le simple suivi d'un véhicule, le grand nombre de configurations et de comportements possibles rendent impossibles des raisonnements simples tels que ceux décrits précédemment. Il est donc nécessaire de créer un outil adapté permettant de généraliser la notion de risque de collision.

Les volumes de positions possibles.

L'approche choisie consiste à anticiper les trajectoires possibles des différents véhicules présents dans la scène, en tenant compte de leur dynamique et des comportements attendus des conducteurs. Mais afin d'obtenir une évaluation cohérente du danger, il est nécessaire de prendre en compte tous les comportements possibles des conducteurs, l'accident provenant parfois d'une manœuvre incongrue.

Considérons pour commencer un véhicule comme un objet ponctuel, dont le modèle de déplacement non-holonome est représenté par le modèle dit du tricycle comme décrit dans le paragraphe 3.2, ce véhicule présentant à l'instant t=0 une vitesse v, une orientation de référence et un angle de braquage inconnu a priori. Nous allons chercher à modéliser toutes les positions que pourrait occuper ce véhicule dans le temps ΔT à venir, afin de détecter d'éventuels risques de collision.

Une trajectoire possible, en considérant par exemple une accélération a et un angle de braquage constant de façon à suivre une courbure $c = \frac{1}{r}$, est l'arc de cercle d'équation :

$$M(a,r,t) = \begin{bmatrix} r \sin\left(\dfrac{a.t^2/2 + v_0 t}{r}\right) \\ r\left(1 - \cos\left(\dfrac{a.t^2/2 + v_0 t}{r}\right)\right) \\ t \end{bmatrix}$$

En considérant donc que la dynamique du véhicule est limitée par des valeurs maximales et minimales de l'accélération et de l'angle de braquage, on peut ainsi délimiter dans l'espace (x,y,t) un volume englobant toutes les positions que peut matériellement atteindre ce véhicule dans le délai ΔT. Cet espace est représenté dans la figure 27 par un volume dans le système de coordonnées défini par la position (x,y) du véhicule sur le plan de la route, ainsi que le temps t, le tout étant pris par rapport à une position et un instant de référence correspondant à la situation courante du véhicule.

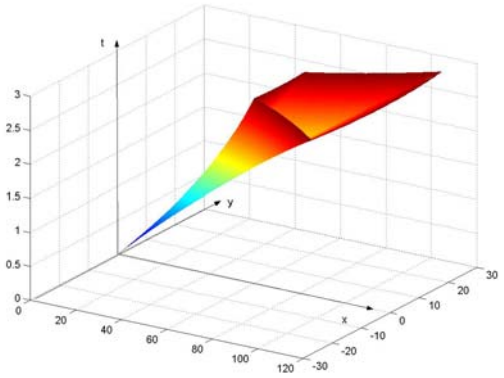


Figure 37 : Volume de positions possibles

Nous pouvons donc considérer que nous avons une première méthode, assez simple, de modéliser un risque de collision. En effet si pour chaque véhicule en présence dans une scène on évalue ce volume de positions possibles, une intersection géométrique entre deux de ces volumes signifierait que les véhicules correspondants sont susceptibles de se trouver au même point, au même moment. Ce qui est alors synonyme de collision.

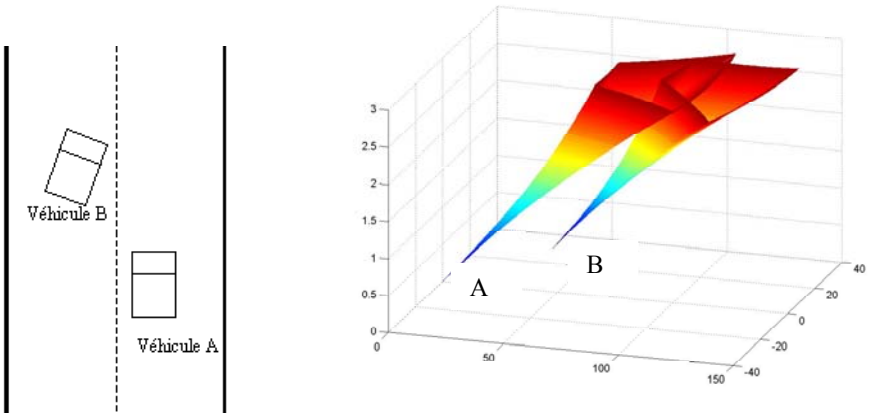


Figure 38 : Détection et quantification d'une collision possible

La figure 38 illustre un exemple de situation pouvant ainsi être traitée. En observant le scénario décrit dans la partie gauche de la figure, on peut constanter que le véhicule B est sur le point de croiser la trajectoire du véhicule A en s'insérant dans sa voie. La considération des volumes de positions possibles de chaque véhicule permet de délimiter les cas où les deux véhicules entreraient effectivement en collision ; l'intersection de ces volumes observés dans la partie droite de la figure laissent entendre qu'une collision aurait lieu si le véhicule A accélérait tandis que le véhicule B conserverait sa vitesse ou même ralentirait.

On peut voir en la taille de l'intersection entre ces deux volumes une première approche quantitative du risque de collision : en effet plus les configurations de collision possible sont nombreuses, plus le risque est grand. Si l'on extrait donc la fonction intégrant à chaque instant t les différentes positions à risques, rapportées au nombre total de positions possibles, on obtient le profil suivant :

$$\varphi_a(t) = \iint_{I_a x I_r} dx.dy$$

thus

$$\varphi_a(t) = \iint_{I_a x I_r} (\frac{\partial x}{\partial a} da + \frac{\partial x}{\partial r} dr).(\frac{\partial y}{\partial a} da + \frac{\partial y}{\partial r} dr)$$

Cette fonction $\varphi_a(t)$ nous fournit donc un approche intéressante de l'estimation du danger, lorsque celui-ci se limite à un risque de collision. En effet l'ensemble de ce risque est résumé par une fonction, donc un objet bidimensionnel. On constate donc que les volontés précédentes d'exprimer le risque d'accident sous la forme d'un simple nombre (probabilité ou niveau d'intensité) sont peu pertinentes, le risque étant ici mieux modélisé par des objets de dimension deux (cela dit d'autres modèles aboutissant à des objets de dimensions supérieures peuvent être envisagés). Il est possible d'extraire du résultat obtenu une seule valeur quantitative, en choisissant par exemple un seuil arbitraire sur le temps ou la valeur de f, mais on perdrait alors une partie importante de l'information.

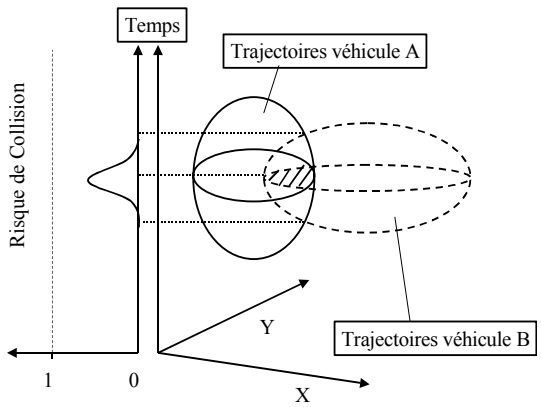


Figure 39 : représentation schématique du calcul de risque de collision

Nous en concluons donc que la sortie de notre système d'évaluation devra toujours prendre cette forme de courbe plane ; pour avoir une représentation plus intuitive de ces résultats, il suffit de considérer l'axe des abscisses comme le niveau d'urgence, et l'axe des ordonnées par le niveau de danger.

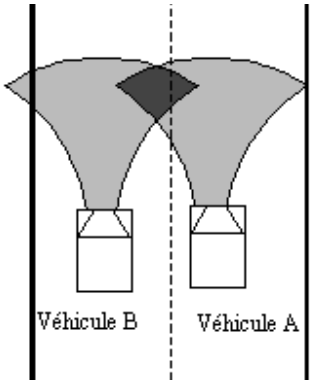


Figure 40 : contre-exemple pour ce critère de mesure de risque

Mais si cette approche est efficace pour détecter les situations de non danger, c'est à dire celles où toute collision est matériellement impossible, elle est cependant un peu trop générale pour déboucher sur une véritable évaluation de danger. En effet de nombreuses situations de conduite mettent en présence des véhicules pouvant matériellement entrer en collision, mais ayant peu de chances d'y parvenir. Si l'on considère par exemple deux véhicules roulant côte à côte sur une ligne droite, la collision est possible en admettant que les deux conducteurs décident de braquer l'un vers l'autre. Mais un tel comportement est très peu susceptible de survenir. On ne peut donc pas mettre cette situation de collision possible sur le même pied d'égalité que dans le cas de deux véhicules se croisant sur une intersection, par exemple.

Il est donc indispensable de tenir compte de la vraisemblance des différents comportements. En effet si l'on parvient à estimer les intentions les plus probables du

conducteur d'un véhicule, on peut aboutir à une pondération des positions possibles sous forme de densité de probabilité .

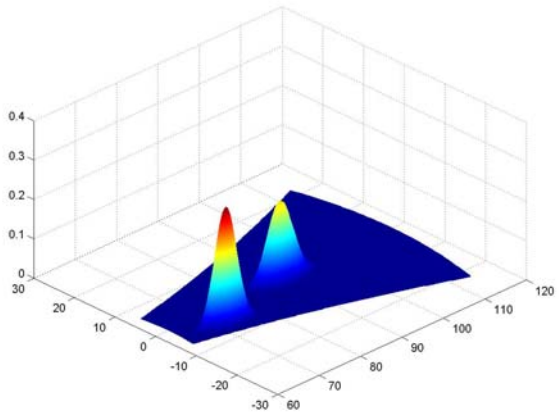


Figure 41 : exemple de pondération des positions possibles par une distribution de probabilités

Ainsi, la présence d'un point d'intersection entre deux volumes de positions possibles ne se verra pas attribuer la même importance, suivant que la probabilité de présence des véhicules en ce point soit plus ou moins forte. Pour chaque véhicule considéré, on cherchera donc à déterminer ses stratégies de déplacement les plus probables, en tenant compte pour cela de la dynamique perçue du véhicule, des indices donnés par le conducteur (feux et clignotants) ainsi que de la configuration de l'infrastructure (lignes droites, arrivées sur intersections, ou autres). Les trajectoires correspondant aux différentes stratégies ainsi identifiées constitueront autant de maxima de probabilité de présence dans l'espace (x,y,t), autour desquels se répartira une distribution de probabilité correspondant à une loi arbitrairement choisie : on pourra par exemple employer une distribution gaussienne de ces probabilités, ou dans un souci de simplicité recourir à une distribution linéaire.
La figure 41 représente par exemple à une date *t* fixée (par rapport à l'instant courant) la distribution de probabilité sur les coordonnées d'un véhicule susceptible de tourner à une intersection : les deux pics observés correspondent aux trajectoires envisagées, à savoir un ralentissement et une courbure de la trajectoire vers la droite pour l'hypothèse du véhicule tournant, et une vitesse constante et une courbure nulle pour l'hypothèse du véhicule traversant l'intersection.

4.3.1 Cas des arrivées sur intersections

Au cours de l'approche d'une intersection, chaque véhicule est l'objet de deux hypothèses concurrentes : dans la première le véhicule traverse l'intersection sans ralentir, dans la seconde il amorce une manœuvre pour tourner sur l'intersection. Suivant les différents résultats qu'auront retourné les algorithmes de détection des intentions des conducteurs, la fiabilité accordée à l'une ou l'autre des hypothèses sera plus ou moins forte.
Chacune de ces hypothèses génère donc une trajectoire type, que nous représenterons sous la forme d'arcs de cercle par souci de simplicité. En effet dans les cas présent la considération de continuité sur la courbure a peu d'importance, puisque ce qui nous

intéresse est la position géométrique des véhicules et non l'accélération latérale qu'ils peuvent subir. Les fonctions de probabilité de présence du véhicule sont donc réparties autour de ces trajectoires types, suivant une loi de distribution choisie arbitrairement, de façon à ce que tout maximum local de probabilité corresponde à une trajectoire type.

4.3.2 Prise en compte de la taille des véhicules

Jusqu'à présent nous avons conservé comme hypothèse simplificatrice que nous considérions les véhicules comme des objets ponctuels. Cette hypothèse avait pour but d'avoir une perception plus simple du problème qui nous occupe, sans tenir compte de la forme particulière des objets pris en compte. Il est cependant déraisonnable de s'en tenir à cette hypothèse, compte tenu de l'importance des dimensions des véhicules en comparaison des distances relativement faibles pouvant les séparer.
L'utilisation des densités de probabilités sur la présence des véhicules permet de prendre en compte la dimension des véhicules sans avoir à recalculer les volumes de position possibles. En effet pour représenter la taille d'un véhicule, il suffit de « dilater » chaque point d'un volume de position possible en répartissant la probabilité de présence du véhicule en ce point sur un voisinage de ce point de la taille du véhicule.

Chapitre 5 : La mesure du risque, expérimentation et validation

Les critères de mesure de risque dans les différentes situations choisies ayant été définis, il est maintenant temps de mettre ces algorithmes à l'épreuve. Cette tâche, bien qu'indispensable pour vérifier le bien fondé des raisonnements explicités dans les chapitres précédents, présente cependant certaines difficultés. En effet puisque l'objectif final est de définir un dispositif d'assistance au conducteur, il est nécessaire de pouvoir valider ces traitements dans des conditions de conduite réelles. Or si le Centre de Robotique dispose effectivement d'un prototype suffisamment instrumenté pour mettre en œuvre ce genre d'applications, il est hors de question de le mettre volontairement dans des conditions de danger réel. De plus, le grand nombre et la complexité des traitements nécessaires pour extraire de la scène toutes les informations nécessaires à l'application des algorithmes définis précédemment rendent difficile l'expérimentation « sur le vif » à l'intérieur même du véhicule. Il est donc nécessaire de se munir d'un environnement de test et de développement nous permettant des mises en situation complexes sans encourir le moindre risque physique, ainsi que de manier plusieurs jeux de données sans être dépendant des hasards du direct.
Une première solution simple pour valider les seuls algorithmes de mesure de risque a consisté à utiliser un simulateur de conduite automobile. Ce logiciel nous permet de nous affranchir dans un premier temps des différents traitements d'informations capteurs, et donc de bien dissocier les erreurs dues à chaque traitement.
Dans un second temps, nous nous placerons dans l'environnement de prototypage RT-maps qui nous permet de simuler en temps différé les différents capteurs du véhicule instrumenté, leurs données ayant été enregistrées, datées et synchronisées de façon à pouvoir être rejouées dans des conditions quasiment identiques à l'environnement du véhicule. La mise en situation de danger pourra être simulée en modifiant artificiellement la valeur de certaines données servant d'entrées de notre algorithme, notamment la vitesse de notre véhicule, en gardant bien à l'esprit que cette approche n'est pas une simulation complète d'une situation de danger, puisque les autres données, telles que le défilement des images ou les points GPS, correspondront toujours à la situation de conduite réelle.
A toutes ces données capteurs correspondront évidemment différents traitements élémentaires visant à en extraire les informations qui nous intéressent ; ces traitements seront également explicités dans le chapitre qui suit.

5.1 Validation sur simulateur :

Afin de pouvoir recréer simplement et sans danger des situations routières aussi particulières que la négociation de virages à haute vitesse ou la présence de plusieurs véhicules ayant un risque de collision important, nous avons dans un premier temps cherché à utiliser un simulateur purement logiciel. La simulation de courses automobiles étant un sujet couramment abordé par les développeurs open source, il existe un grand choix de tels simulateurs pouvant être aisément modifiés pour y intégrer des algorithmes d'interprétation.
Notre choix s'est d'abord porté sur le simulateur RARS (Robot Auto Racing Simulator), puis sur le simulateur RACER qui en est une évolution.

5.1.1 le programme RARS

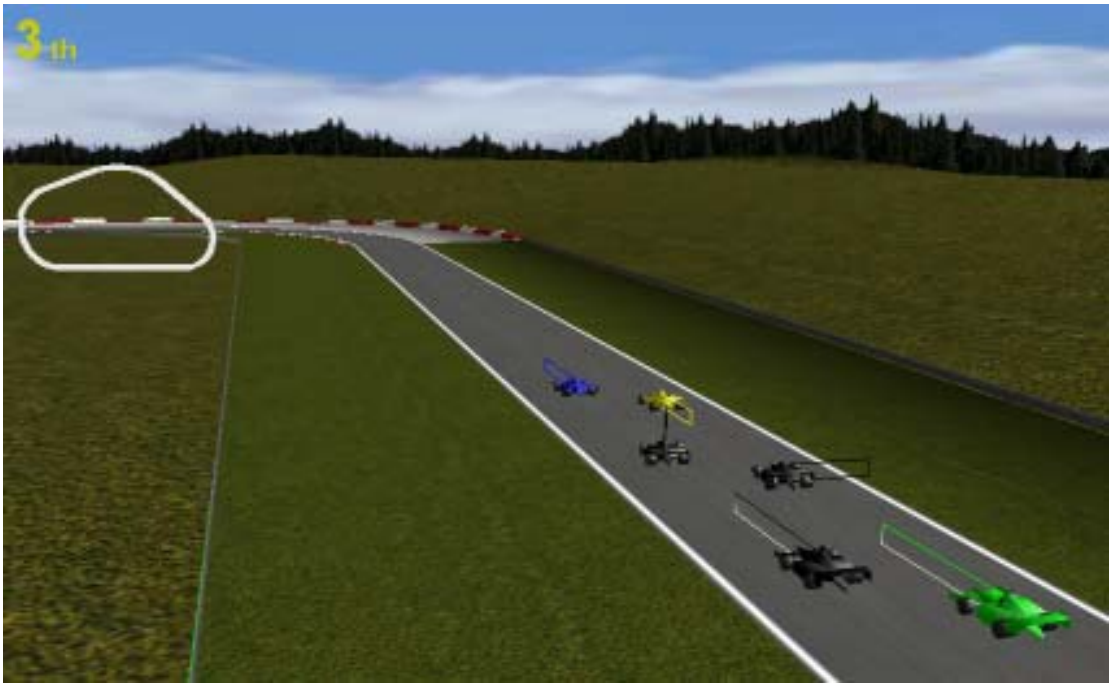


Figure 42 : Le simulateur RARS avec rendu OpenGL

Notre choix s'est rapidement porté sur le logiciel RARS (Robot Auto Racing Simulator), développé en 1995 par Mitchell E. Timin ([Timin 95]). Le but original de ce logiciel était de mettre à disposition de toute la communauté de chercheurs ou de développeurs amateurs un simulateur de circuit automobile permettant de confronter différents algorithmes d'intelligence artificielle, chaque véhicule mis en présence pouvant disposer de son propre moteur de décision afin de définir son comportement sur la piste. Le programme étant *open source*, librement diffusé et présentant une architecture très modulaire, il a à plusieurs occasions été réutilisé dans le cadre de divers travaux de recherche ([Coulom 02],[Nagy 01]) afin de réaliser des applications de simulations accessibles mais présentant un niveau minimum de réalisme.

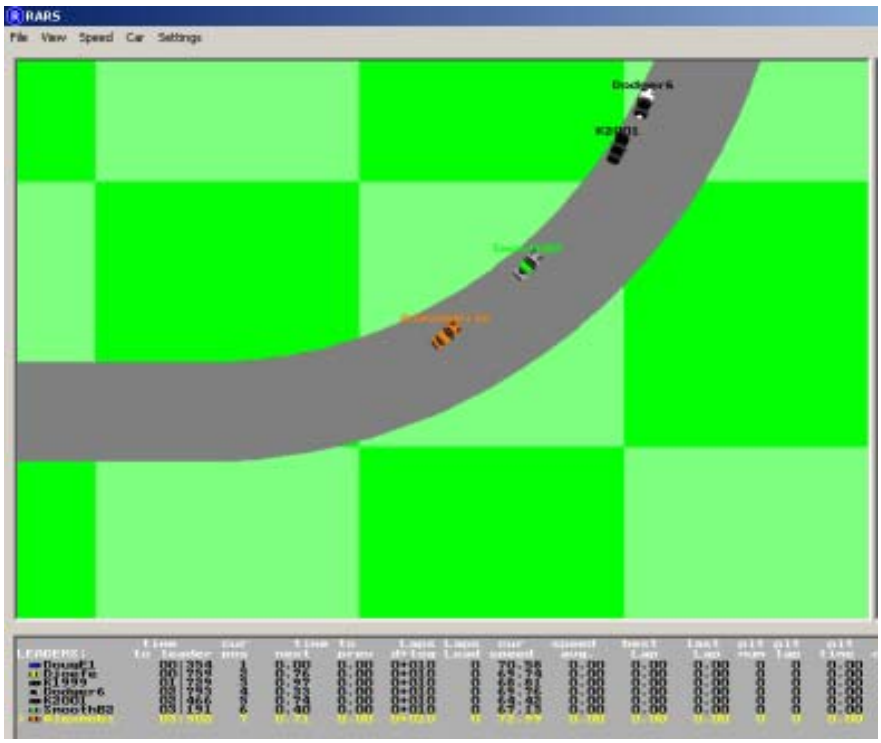


Figure 43 : le simulateur en rendu 2D

5.1.1.1 Le moteur physique de RARS.

En effet ce logiciel bien que simple obéit à une certaine modélisation des lois physiques régissant l'interaction entre les véhicules et leur environnement. On observera que ce modèle physique est encore sommaire, mais est déjà plus complet que le modèle simple de dynamique de véhicules qui nous a servi à définir les différents critères de danger dans les chapitres 2 et 3. Nous nous plaçons donc bien dans le cadre de la validation d'une modélisation simplifiée d'un système complexe, le moteur physique de RARS représentant dans le cas présent l'environnement réel.

Les véhicules sont dans la version actuelle toujours considérés comme des masses ponctuelles, et dépourvus d'une quelconque modélisation de leur suspension. En revanche, leur dynamique prend en compte un modèle de contact au sol intégrant une composante de glissement du véhicule dont l'importance dépend du type de revêtement au sol et de la dynamique du véhicule.

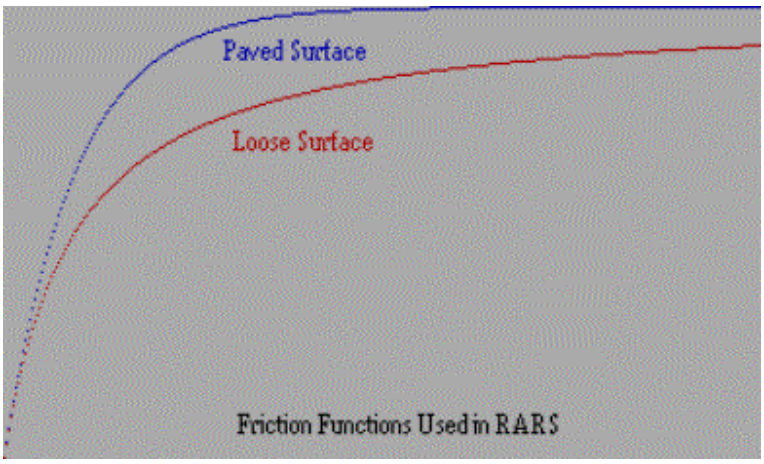


Figure 44 : Le modèle de friction du revêtement au sol en fonction de la vitesse du véhicule

Ce moteur physique intègre également un modèle de frottement fluide de l'air ainsi qu'une gestion de la masse du véhicule en fonction du carburant restant et la comptabilisation de dégâts occasionnés par des collisions ou des sorties de route, mais de tels aspects nous importent peu dans nos applications.

5.1.1.2 Le module qui nous intéresse : le conducteur.

La modélisation objet du logiciel introduit différents modules indépendants. Cependant afin de pouvoir mettre à l'épreuve les algorithmes de décision gérant le pilotage de chaque véhicule, la classe "conducteur" propre à chaque véhicule ne dispose que d'un minimum d'informations sur l'ensemble de la scène. Ces informations se limitent en effet à celles dont dispose un conducteur humain dans une situation similaire ; en plus des données sur la dynamique et le positionnement du véhicule piloté, ces informations intègrent également la position, l'orientation et la vitesse relative des véhicules situés dans le proche champ de vision du conducteur ainsi que la géométrie locale de la route.
La modification du simulateur consistera donc à intégrer à un module conducteur nos algorithmes d'évaluation des risques, dont les seules entrées seront la perception que le module conducteur aura de l'environnement. Ces traitements qui nous sont propres ne modifieront en rien la tâche de conduite du véhicule simulé, qui elle est toujours gérée par l'IA du simulateur. En revanche on pourra considérer nos résultats comme une évaluation permanente de la dangerosité de cette conduite.

5.1.2 Estimation de risque de perte de contrôle en virage

Les tests sur simulateurs ont été effectués sur un circuit simple de façon à pouvoir identifier très facilement les différents virages traversés sur les données recueillies. La piste retenue présente donc cinq virages comme le montre la figure 45, quatre d'entre eux étant des virages à droite et le virage 4 étant un virage à gauche.
Cette piste présente également la particularité de faire se succéder rapidement les trois virages de plus forte courbure.

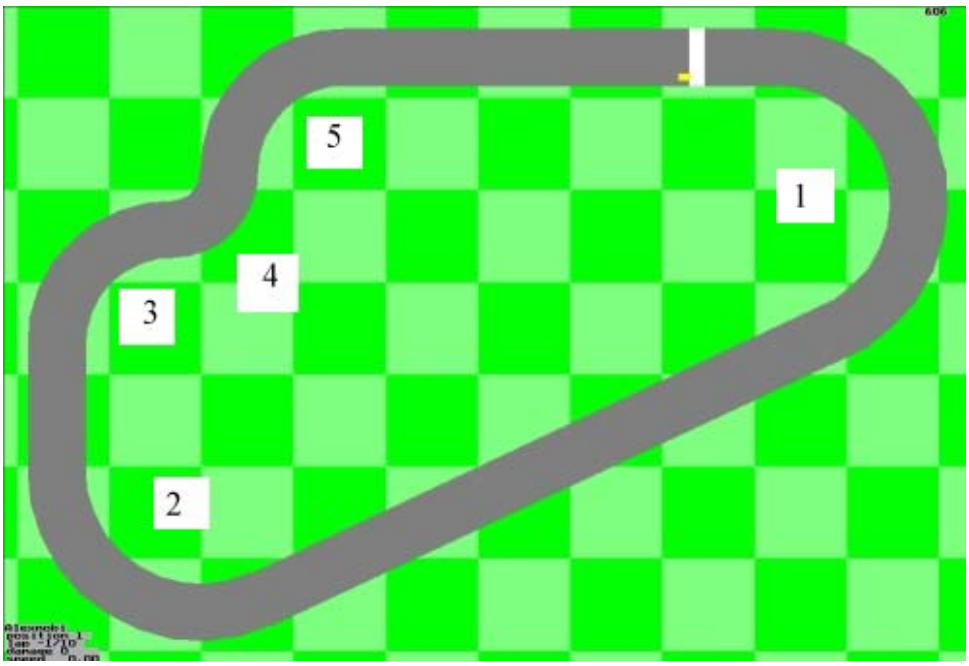


Figure 45 : Le circuit expérimental

Ce circuit sera donc parcouru par un unique véhicule pré-programmé, auquel nous avons intégré nos algorithmes de mesure de risque de sortie de virage. Ce critère, quantifié par le temps séparant le véhicule du dernier point à partir duquel il peut corriger sa trajectoire sans perdre l'adhérence au sol, ne modifiera pas la conduite même du véhicule, mais sera enregistré au fil du temps afin de reconstituer le profil de danger encouru pendant un tour de circuit.
La trajectoire suivie par le véhicule est représentée en blanc sur la figure 46. On remarquera la tendance de l'intelligence artificielle pilotant le véhicule à passer les virages à la corde, ce qui est gênant quand on cherche à détecter des sorties de route par l'extérieur des virages, mais heureusement la succession de trois virages nous permettra d'observer les comportement de l'algorithme dans des cas limites.

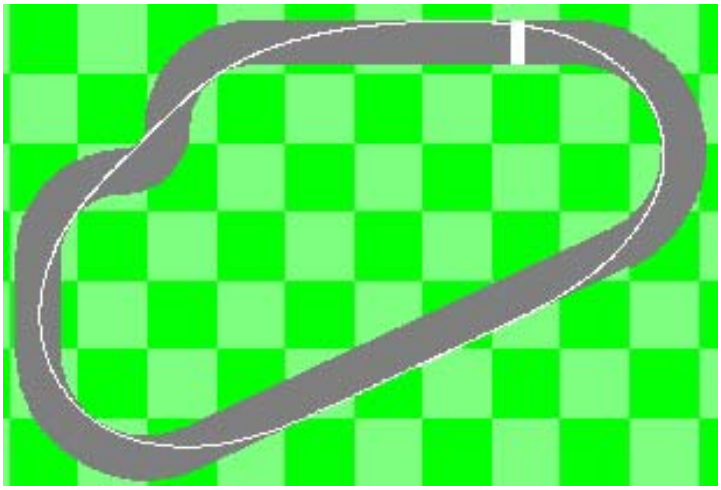


Figure 46 : la trajectoire du véhicule

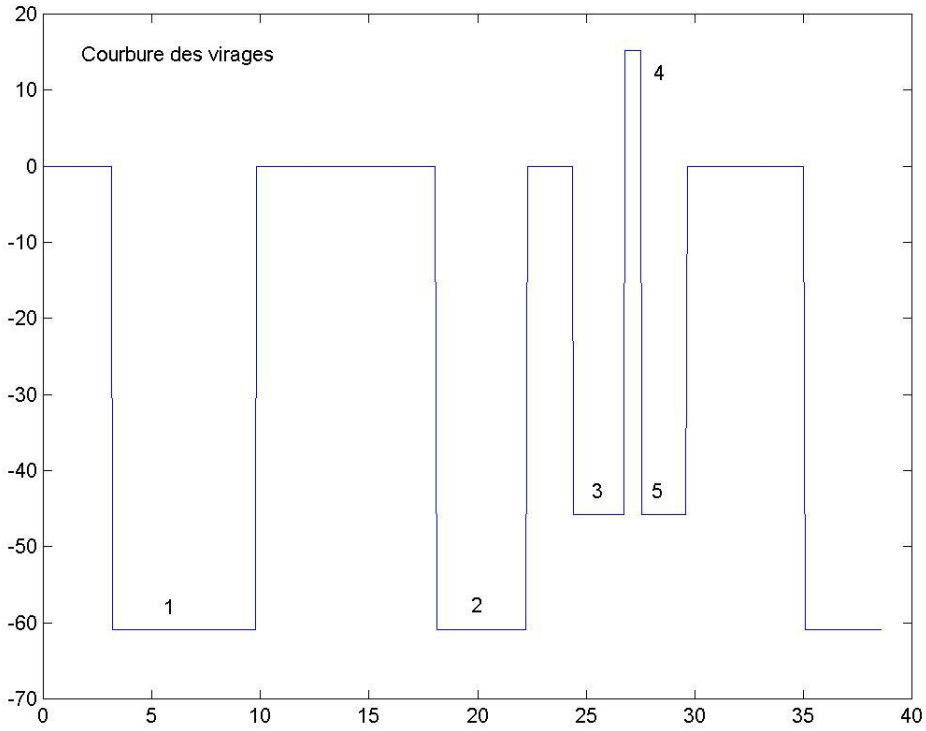


Figure 47 : courbure de la piste en fonction du temps

Les résultats sont donc visibles sur la figure 48, qui représente le temps de réaction en seconde autorisé au conducteur pour corriger sa trajectoire (ces données ont en fait été lissées par un filtre médian, la commande de la direction des véhicules se faisant à haute fréquence et occasionnant des oscillations des valeurs calculées autour des valeurs moyennes qui sont représentées dans cette figure). Notons que le niveau de risque n'est évalué dans ce cas qu'à l'intérieur des courbes, puisque notre algorithme décrit dans le chapitre 3 ne prend en compte que la courbure courante de la route et ne peut donc pas être appliqué en ligne droite.

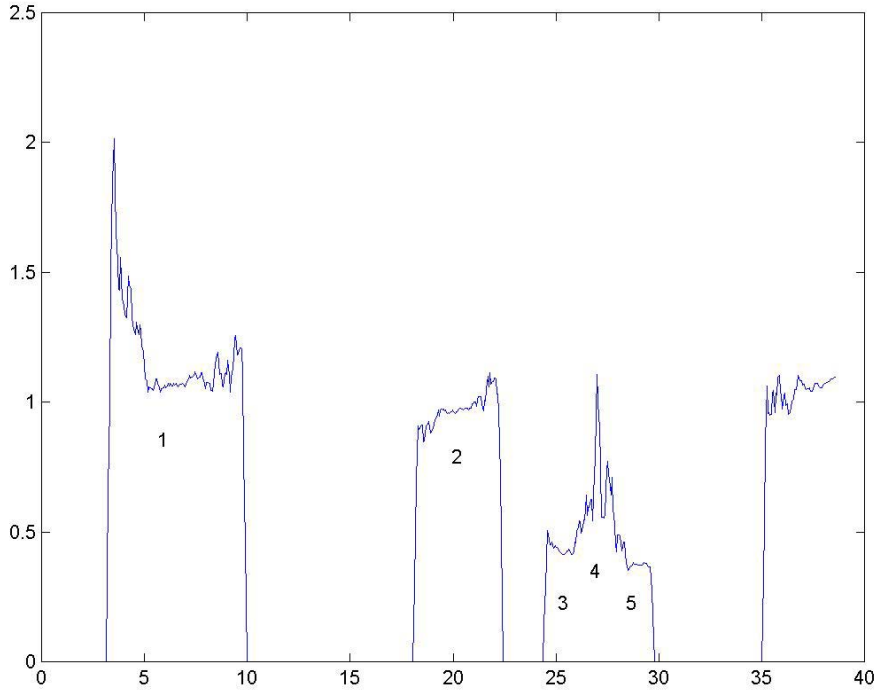


Figure 48 : temps de réaction (en secondes) maximal autorisé au conducteur, en fonction du temps

On constatera que pour des virages isolés et de faible courbure (donc de fort rayon de courbure), ce temps de réaction reste globalement constant et de l'ordre de la seconde. Cependant dans les virages 3 et 5, la présence d'un virage intermédiaire inverse et le critère de trajectoire forçant le véhicule à prendre la corde le pousse à suivre des trajectoires extrêmes assimilables à une sortie de route (s'il n'y avait pas eu une inversion de courbure de la piste). On peut alors observer que le temps autorisé au conducteur devient bien plus faible.

5.1.3 Estimation de risque de collision

Les tracés du risque de collision évoluant au fil du temps sont moins parlants que ceux des temps de récupération en virage, puisqu'il est nécessaire de représenter les différentes trajectoires de véhicules pour pouvoir les interpréter.
Cependant on peut constater sur les images ci-dessous que la prise en compte de la dynamique des véhicules permet bien d'identifier les risques de collision. Dans la première image, on constate en effet que le temps de réaction alloué au conducteur est relativement important (4.77 secondes), puisqu'il se contente de suivre le véhicule qui le précède et que le risque de collision est donc faible.

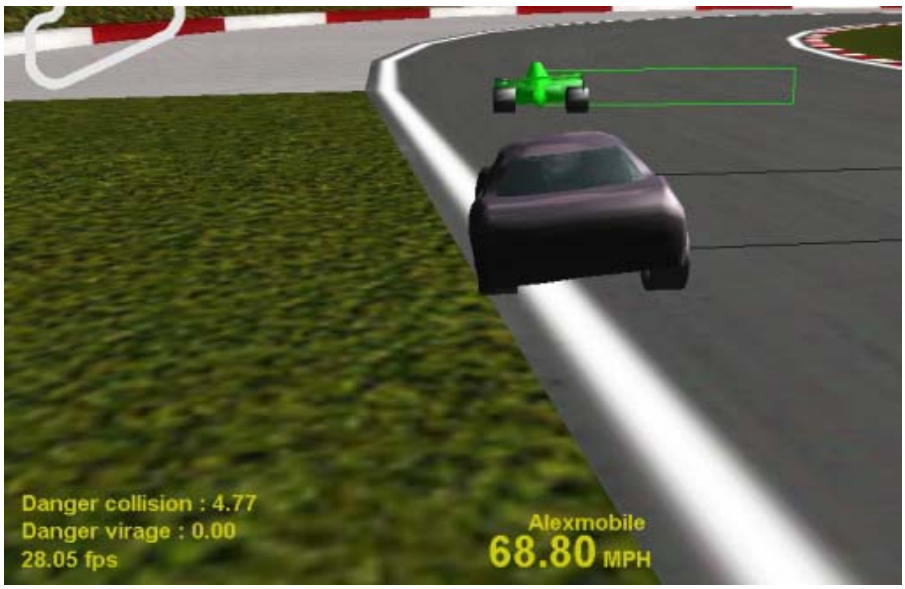


Figure 49 : Suivi de véhicule présentant peu de risques de collision : temps de réaction autorisé = 4.77s

Figure 50 : suivi de véhicule présentant un fort risque de collision : temps de réaction autorisé = 1.46s

En revanche dans le second cas le véhicule (jaune) situé sur la droite du véhicule manifeste l'intention de tourner vers la gauche et donc de croiser rapidement notre trajectoire. Ces intentions transmises à l'algorithme de détection de collision aboutissent à l'établissement d'un temps de réaction autorisé beaucoup plus court, ici de 1.46 secondes.

5.1.4 Le programme RACER

Le programme RARS présente une limitation importante : la conduite du véhicule étant prise en charge par le logiciel lui-même, il ne nous est pas possible de reproduire à volonté des scénarios de notre choix. Il était donc nécessaire de réaliser les expérimentations au moyen d'un simulateur permettant de piloter manuellement le véhicule virtuel.
Le programme RACER remplit parfaitement cette condition, et introduit en outre un moteur physique plus complexe et plus proche de la réalité. En effet les coefficients de friction entre les roues des véhicules et la route sont définis par les formules de Pacejka, utilisées généralement dans les simulateurs automobiles professionnels. Sur la figure 51, nous pouvons observer un exemple de comportement des forces de friction F_x et F_y en fonction de l'angle de braquage des roues.

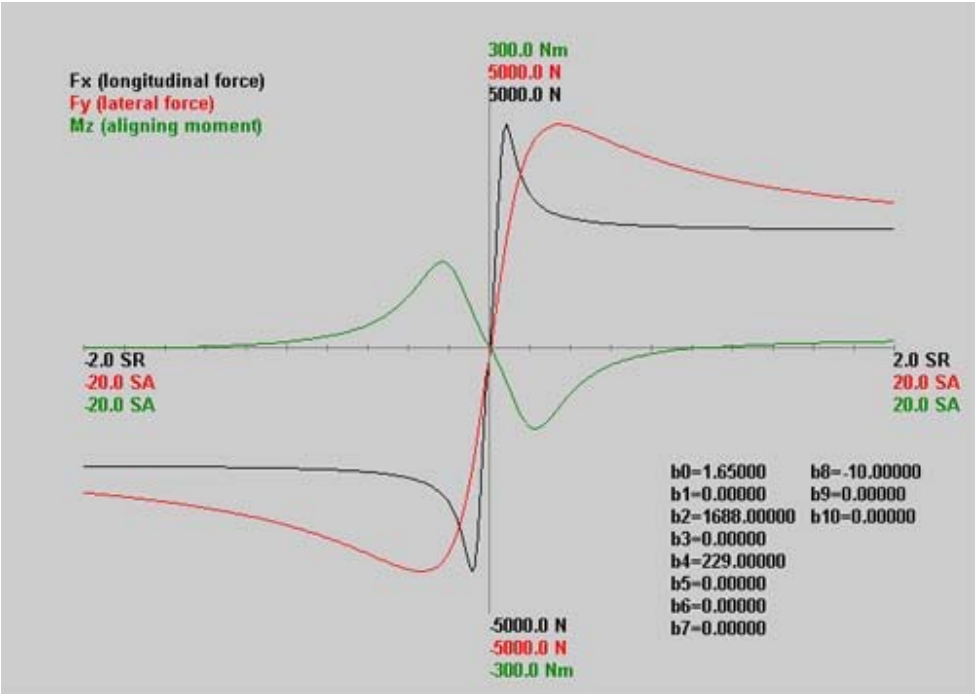


Figure 51 : Modèle de friction suivant les forumules de Pacejka

5.1.5 Estimation de risque de perte de contrôle en approche de virage

Les algorithmes d'estimation de risque ont été testés pour différents comportements du véhicule au cours de l'approche d'un virage. Les résultats observés sont illustrés par les figures 52 à 54.

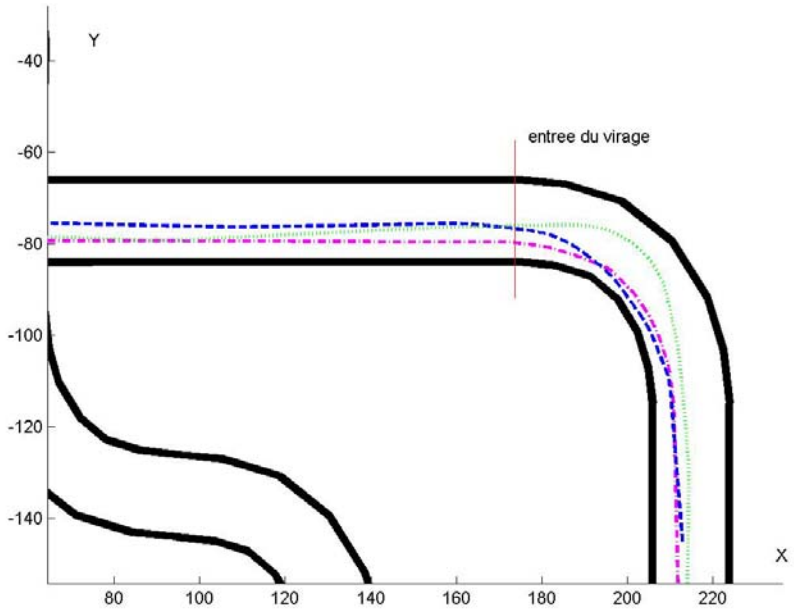


Figure 52 : Trajectoires effectuées dans des conditions variables

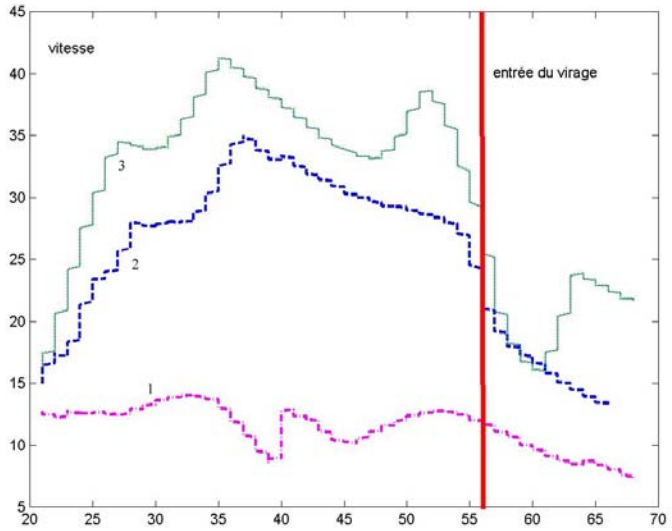


Figure 53 : Profil des vitesses pour chaque trajectoire suivie

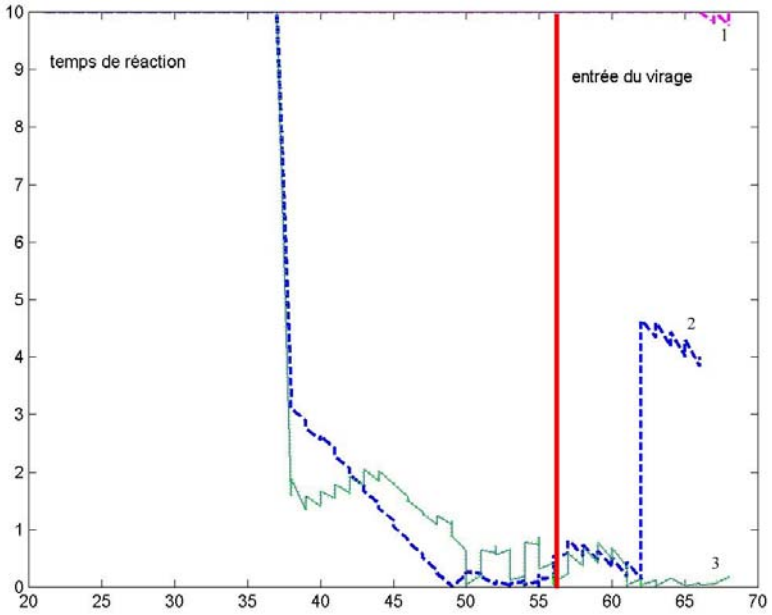


Figure 54 : Estimation du temps de réaction autorisé pour chaque scénario

On peut observer sur ces figures que pour des vitesses réduites (premier scénario), le temps de réaction autorisé est maximal, le niveau de risque est donc faible. En revanche, des profils de vitesse plus élevés font apparaître des zones dans lesquelles la réaction attendue du conducteur doit survenir très rapidement, faisant donc apparaître des situations de danger.

5.1.6 Estimation de risque de perte de contrôle à l'intérieur d'un virage

Tout comme pour le cas des approches de virages, l'intérêt de la simulation réside dans la possibilité de comparer les résultats fournis par les algorithmes pour une situation donnée abordée de plusieurs façons différentes. Les figures 55 à 57 illustrent ainsi un même virage traversé de trois façons différentes : le scénario 1 présente une trajectoire de faible courbure effectuée à vitesse moyenne, le scénario 2 présente une trajectoire de faible courbure à vitesse élevée et le scénario 3 une trajectoire de forte courbure à vitesse réduite.

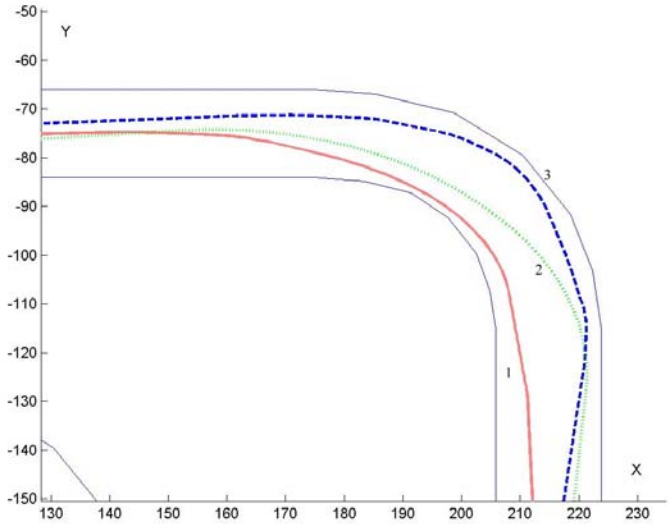


Figure 55 : Trajectoires empruntées dans les différents scénarios

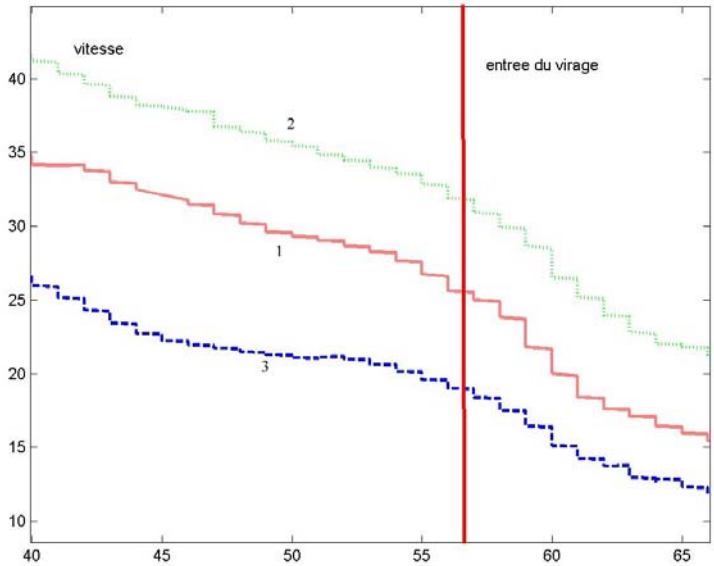


Figure 56 : Profil de vitesse au coursde chacun de ces scénarios

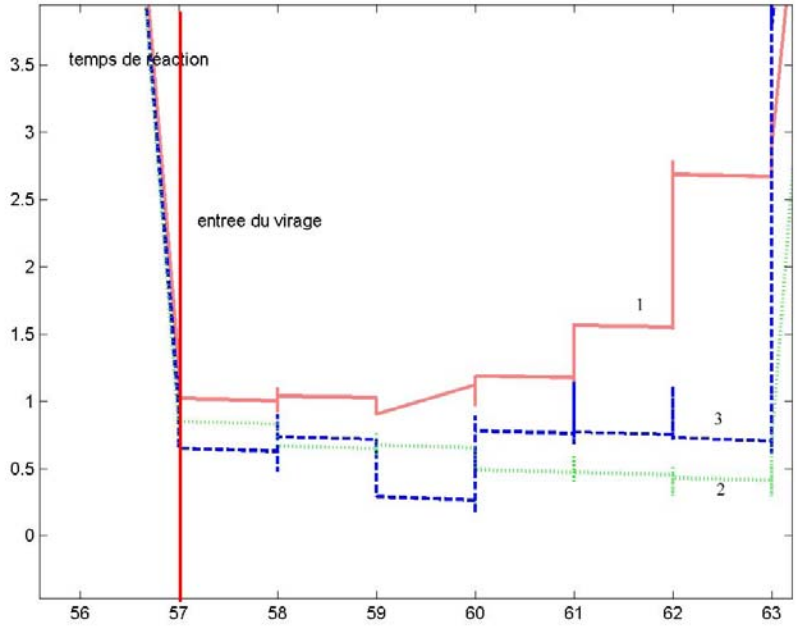


Figure 57 : temps de réaction autorisé pour chacun des scénarios

Dans le premier scénario, on peut observer que la trajectoire empruntée minimise la courbure et donc l'accélération latérale subie par le véhicule. Malgré un profil de vitesse relativement important, les temps de réaction autorisés restent élevés en comparaison des autres scénarios.
Dans le second cas, la vitesse du véhicule est bien plus faible que dans le premier scénario. En revanche la trajectoire du véhicule fait apparaître une réaction tardive du conducteur : le niveau de risque évalué apparaît alors plus important dans ce cas, malgré la faible vitesse du véhicule.
Enfin dans le troisième scénario, le véhicule emprune une trajectoire de courbure réduite, mais cette fois ci avec une vitesse élevée. Dans ce cas également, le niveau de risque peut s'avérer élevé.

5.2 Validation sur données réelles

Le simulateur RARS a pour avantage de mettre à disposition des différents algorithmes des données avec une parfaite précision, c'est à dire non entachées d'erreurs de mesures. Mais si cet aspect est effectivement utile pour valider certains traitements indépendamment des autres, il ne peut pas garantir une fonctionnement du système complet utilisé dans des conditions réelles de conduite. Afin de valider les travaux décrits précédemment, il est donc nécessaire de les appliquer à des données réelles acquises au moyen d'un véhicule instrumenté.

Pour des raisons pratiques, il est bien plus confortable et efficace de pouvoir enregistrer ces données et les exploiter à volonté en laboratoire. Un environnement de prototypage a été développé dans cette optique par les chercheurs du Centre de Robotique ; nommé RT-maps, ce logiciel permet en effet d'enregistrer des données datées et synchronisées et de les rejouer en laboratoire de façon à ce que l'ordre d'arrivée des données respecte celui ayant effectivement eu lieu au cours de l'enregistrement.
Le développement de cet environnement de prototypage a débouché sur la création de la société Intempora (http://www.intempora.com) qui prend en charge sa commercialisation.

5.2.1 L'instrumentation du véhicule

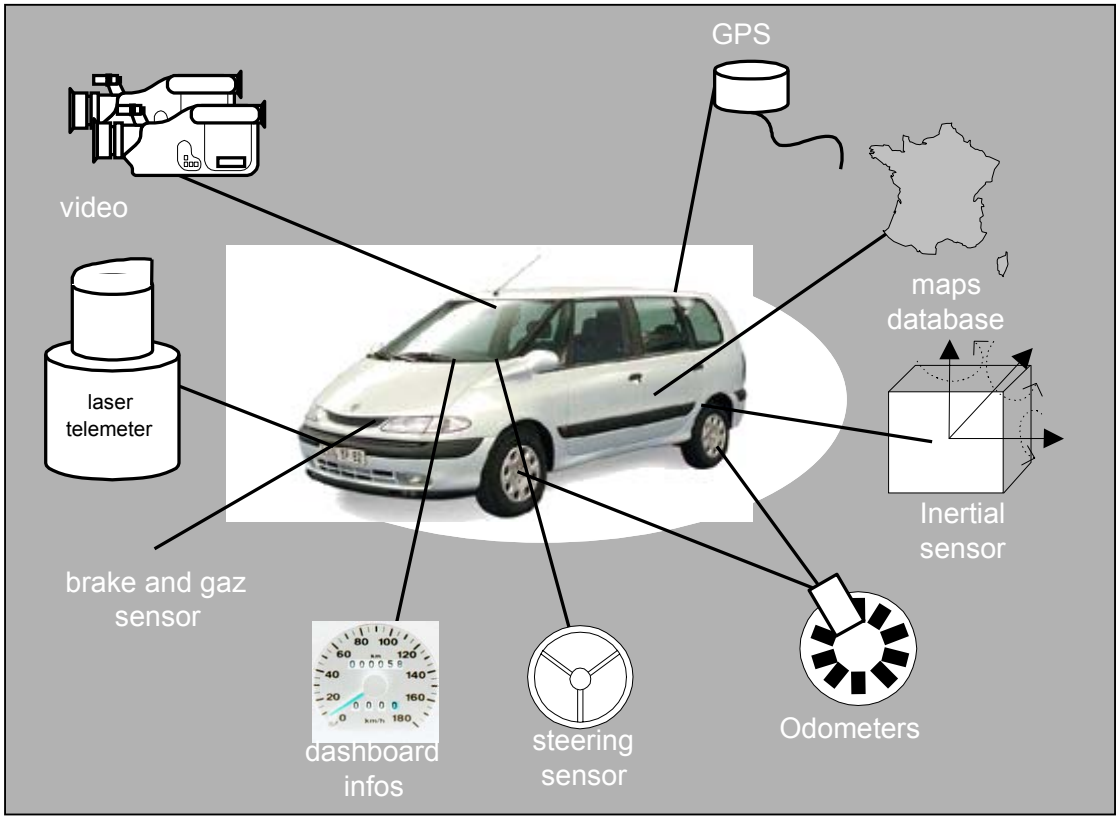


Figure 58 : Le véhicule instrumenté du Centre de Robotique

Le Centre de Robotique dispose d'un prototype basé sur une Renault Espace instrumentée. Les principaux capteurs de ce véhicule peuvent se distinguer suivant qu'ils soient extéroceptifs, c'est à dire qu'ils servent à percevoir l'environnement extérieur au véhicule, ou intéroceptifs si ils mesurent des données propres au véhicule seul.

Parmi les capteurs intéroceptifs figurent :
- des codeurs odométriques dont la fonction initiale est de retourner la vitesse du véhicule en vue de son affichage sur le tableau de bord. Ces capteurs offrent une résolution de l'ordre du mètre et délivrent leurs informations via le bus CAN natif du

véhicule. Sur ce bus circulent également toutes les informations internes au véhicule, telles que feux, clignotants, débit d'essence etc.

- Des codeurs ABS, initialement prévus pour mesurer la vitesse de chaque roue indépendamment des autres. Cette information est en temps normal utilisée par le calculateur ABS pour déterminer la modification à appliquer sur le freinage de chaque roue pour corriger les freinages d'urgence. Les câbles accédant au calculateur ont été dérivés par nos soient et les messages qui y circulent sont interprétés par le calculateur central au moyen d'un redresseur de signaux analogiques et d'une simple carte compteur.
- Une centrale inertielle, de marque Crossbow. Cette centrale mesure les accélérations en translation et en rotation suivant trois axes avec une très bonne précision relative, mais présente des dérives non négligeables sur des durées relativement longues.
- Un GPS différentiel AgGPS132 de marque Trimble. Bien que le récepteur GPS communique avec des satellites donc des éléments extérieurs au véhicule, on pourra l'assimiler à un capteur intéroceptif de par la nature des données qu'il retourne. La précision de ce positionnement absolu est de l'ordre du mètre lorsque le mode différentiel est activé et que le DOP garantit une bonne condition d'utilisation.

Les capteurs extéroceptifs sont eux au nombre de deux :

- une caméra numérique, de modèle Sony EVI 400/401, située au niveau du rétroviseur central et filmant la route en avant du véhicule à travers le pare-brise.
- Un télémètre laser de marque Ibeo, ayant pour particularité de pouvoir scanner l'environnement sur une ligne unique mais à 360° . Ce télémètre, placé à l'avant du véhicule au niveau du pare-choc, est orienté de façon à ce que son plan d'émission soit horizontal à la route. Cette configuration limite donc une partie du champ de vision de ce capteur, puisque le véhicule lui masque quasiment 180° de ce champ, mais permet de détecter assez facilement tout objet situé en avant du véhicule.

Dans le cadre du projet PARINA (Prévention Anticipée des Risques par la Navigation), nous avons également eu l'occasion d'effectuer des expériences sur un véhicule instrumenté de type Laguna 2, équipé de façon similaire à l'exception du télémètre, remplacé par un radar utilisé habituellement pour les applications d'ACC. L'avantage d'un tel appareil est sa mesure plus précise de la vitesse relative des différentes cibles, ainsi que les fonctions implémentées directement par le constructeur telles que le filtrage des cibles fixe et la labélisation des 8 cibles mobiles les plus vraisemblables. Son fonctionnement est en outre bien moins perturbé par des conditions météorologiques telles que pluie ou neige.
En contrepartie ce capteur dispose d'un champ de vision bien plus étroit, de l'ordre de 17°.

Toujours dans le cadre de ce projet, nous avons procédé à une étude accidentologique sur un grand nombre de reconstitutions d'accidents réalisés par le LAB (Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique), dans le but d'extraire les principaux indices permettant d'identifier une situation de danger potentiel. Ces indices ne sont cependant pas toujours aisément perceptibles dans l'environnement compte tenu de l'instrumentation de notre véhicule. Le tableau ci-dessous résume donc les principaux marqueurs identifiés dans ces scénarios (par convention, notre véhicule instrumenté est désigné par « véhicule A », le terme « véhicule B » désignant un autre véhicule présent

dans la scène), et indique pour chacun d'entre eux les capteurs pouvant s'avérer utiles à leur détection.

	Télémètre	**Vision**	**Navigation**	**Infos véhicule**
Véhicule B sur voie secondaire				
Véhicule B précédant le véhicule A				
Véhicule B arrivant en sens inverse				
Engagement du véhicule B				
Vitesse excessive du véhicule A				
Clignotant gauche du véhicule B				
Clignotant droit du véhicule B				
Dépassement				
Accélération Latérale				
Longue voie roulante précédant le virage				
Rapport de courbures successives entre 2/3 et 3/2				
Rayon mini				
Dévers inversé				
Basculement de dévers				
Véhicules arrivant en sens inverse				
Véhicules précédant le véhicule A				
Intersection en courbe				
Eblouissement, obscurité				
Profil en long : montée				

Masques				
Présence d'un véhicule entre A et B				
Faible contraste du véhicule B				
Pluie				
Jour/Nuit				
Visibilité sur virage < 300m				

5.2.2 Acquisition et exploitation de données : l'environnement RT-maps

Afin de valider les différents algorithmes et traitements développés au cours de ces travaux, des acquisitions de données ont été faites dans des conditions réelles de circulation. Pour cela nous avons enregistré les données provenant des différents capteurs du véhicule instrumenté lorsque celui-ci aborde différents emplacements choisis au préalable pour leur adéquation avec les scénarios traités.
Les données recueillies sont :

- les trames CAN du véhicule, intégrant notamment la vitesse véhicule et les cibles renvoyées par le radar. Ces trames sont enregistrées dans leur totalité sous un format spécifique aux modules CAN.
- Les données vidéo provenant de la caméra.
- Le positionnement GPS et les informations d'horizon électronique.

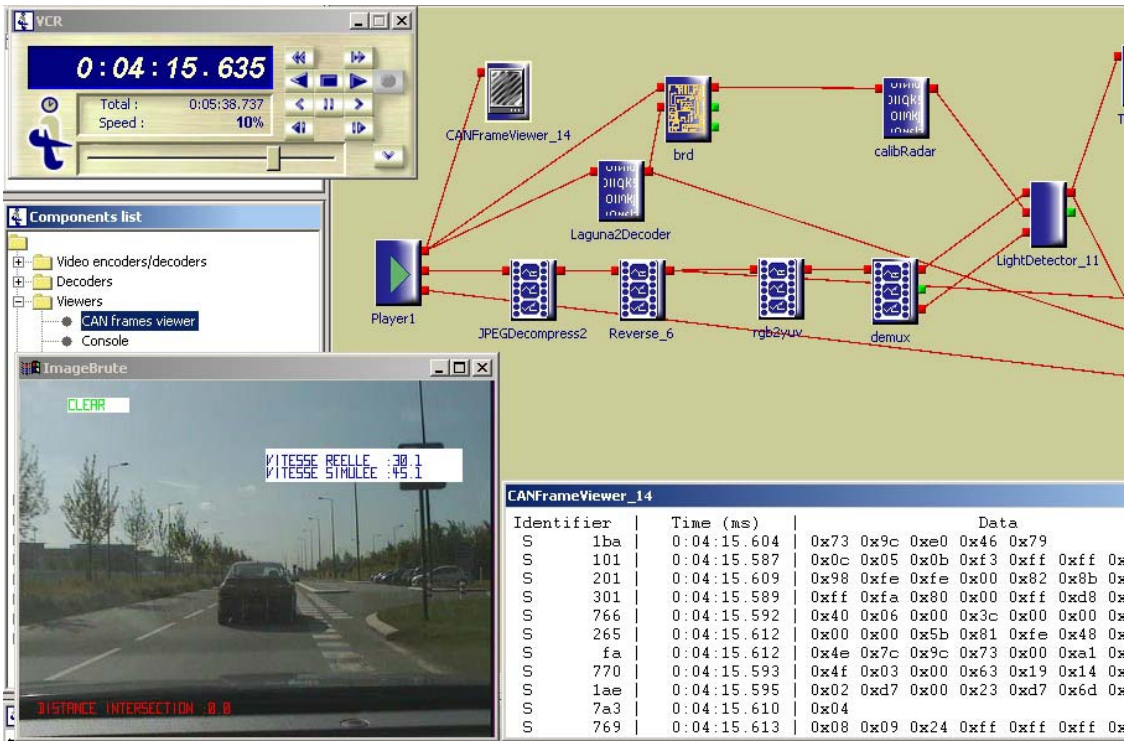


Figure 59 : L'environnement RT-Maps

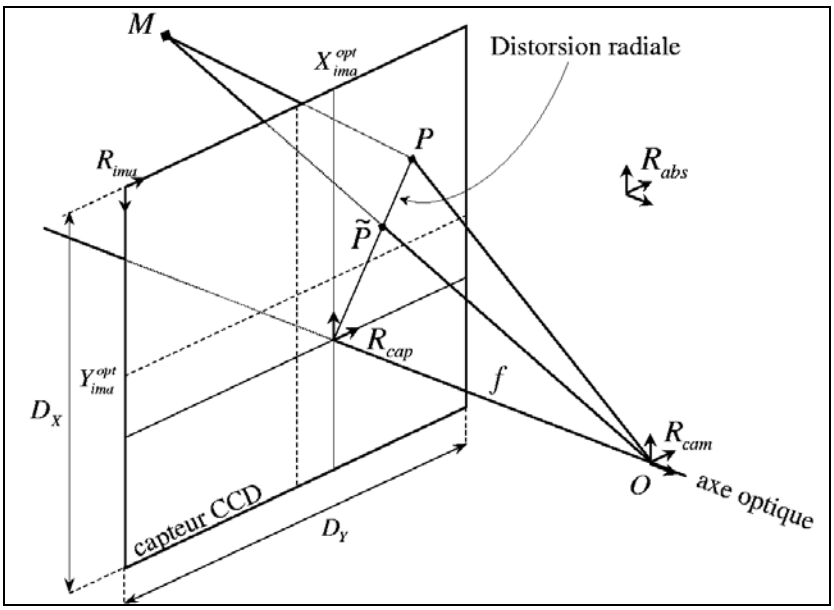
Ces acquisitions ont été réalisées au moyen de l'environnement de développement RT-Maps, dont la fonction principale est de gérer la synchronisation de différentes sources de données, que ce soit en lecture ou en écriture. Cet environnement a donc servi à la création de base de données contenant les enregistrements synchronisés des images de la caméra vidéo, des trames CAN du véhicule et des données GPS.
En mode de rejeu, l'environnement RT-Maps permet également le prototypage de traitements de données, permettant à l'utilisateur d'intégrer ses propres algorithmes sous la forme de modules de traitements présentant des entrées et des sorties de données standards. La gestion de ces modules et données est en outre rendue plus confortable par une interface graphique permettant de visualiser les connexions entre les différents modules de traitement, voire de les modifier dynamiquement.

5.2.3 Calibrage de la caméra

Avant même de procéder aux premiers traitements d'image, il est indispensable de connaître les conditions dans lesquelles ces images ont été enregistrées, et donc d'estimer les paramètres intrinsèques (focale, distorsions) et extrinsèques (position, inclinaisons) de la caméra.
La procédure de calibrage utilise la détection automatique d'indices visuels connus sur une mire. La recherche des paramètres s'appuie sur les correspondances trouvées entre les indices détectés dans l'image et les indices réels sur la mire. La méthode employée est inspirée des travaux de Tsai à laquelle nous avons ajouté la détermination de deux paramètres intrinsèques supplémentaires. Elle évalue donc, en deux étapes, les paramètres extrinsèques puis les paramètres intrinsèques. La détermination des paramètres est basée sur la minimisation de deux fonctions non linéaires reliant les couples d'indices correspondants (entre le monde réel et leur image à travers la caméra). La méthode d'optimisation non linéaire employée repose sur la linéarisation locale et l'itération.

5.2.3.1 Le modèle de caméra utilisé

Le modèle de caméra utilisé est un modèle de sténopé avec distorsion radiale du premier ordre. Le schéma ci-dessous illustre ce modèle.



Modèle de sténopé distorsion radiale.

Dans cette figure, M est un point de l'espace et P représente son image sur le capteur CCD. Le point O représente le centre du repère caméra. Le plan du capteur est perpendiculaire à l'axe optique. Le point $P^{\sim}$ est le projeté de M si on n'avait pas de distorsion, obtenu par projection centrale de centre O. Si le modèle utilisé ne prenait pas en compte la distorsion radiale (sténopé simple), le point P coïnciderait avec $P^{\sim}$. L'intersection entre l'axe optique et le capteur n'est pas nécessairement placée au centre de ce dernier.

Nous allons par la suite considérer quatre repères distincts. Le premier est le repère "absolu" dans lequel sont exprimés les points de l'espace. Le second correspond au repère spatial R_{cam}, lié à la caméra. Il est centré sur O, ses deux premiers axes suivent les directions principales de la trame du CCD et son troisième axe est dans la direction de l'axe optique (dans le sens inverse de l'observation). Les deux autres repères sont des repères plans, liés au capteur et dont les axes suivent les directions principales de la trame du CCD. Un premier repère "capteur" R_{cap} est centré sur l'intersection entre l'axe optique et le CCD. Le second est le repère image R_{ima} dont le deuxième axe est inversé. Son centre est placé dans le coin supérieur gauche du capteur. D'autre part, ses vecteurs de base ne sont pas normés de la même façon que ceux des autres repères et permettent de passer à des coordonnées exprimées en "pixels". En d'autres termes :

$$\left\|\vec{i}_{cap}\right\| = dx.\left\|\vec{i}_{ima}\right\|$$
$$\left\|\vec{j}_{cap}\right\| = dy.\left\|\vec{j}_{ima}\right\|$$

où dx et dy sont les dimensions d'une cellule du capteur CCD. Sur le schéma, D_x et D_y sont les dimensions du capteur. Si on note N_x et N_y les résolutions en largeur et en hauteur du capteur, on a : $dx = D_x/N_x$ et $dy = D_y/N_y$.

Les coordonnées d'un point M de l'espace exprimées dans le repère absolu seront notées $(X_{abs},Y_{abs},Z_{abs})$. Lorsqu'elles seront exprimées dans le repère caméra, nous les appellerons $(X_{cam},Y_{cam},Z_{cam})$. Les coordonnées de son projeté $P^{\sim}$ sur le plan capteur et par rapport à O

seront notées (X_{cap},Y_{cap}). (X_{dis},Y_{dis}) représenteront les coordonnées (toujours dans R_{cap}) du point *P* qui est le correspondant "distordu" du point $P^{\sim}$. Pour finir, ce même point *P* aura pour coordonnées (X_{ima},Y_{ima}) dans le repère image.

Les paramètres extrinsèques que nous cherchons à établir expriment la transformation qui permet de passer du repère absolu R_{abs} au repère caméra R_{cam}. Ils sont au nombre de six : (ψ, φ, θ) correspondent aux trois angles de Bryant à appliquer au repère absolu pour qu'il vienne se placer sur le repère caméra ; (T_X, T_Y, T_Z) est la position du centre du repère absolu exprimée dans le repère caméra.

Les paramètres intrinsèques comprennent la distance focale *f*, la position (X^{opt}_{ima}, Y^{opt}_{ima}) du centre du repère capteur R_{cap} exprimée dans le repère image R_{ima} et le coefficient de distorsion radiale au deuxième ordre *k*. Dans notre modèle, nous considérons également que le rapport de la hauteur *dx* d'un pixel sur sa largeur *dy*, que nous appellerons d_{yx}, est indéterminé et fait partie des paramètres intrinsèques à retrouver. En effet, dans une première implémentation de cet algorithme de calibrage, qui ne prenait pas en compte ce paramètre, il s'est avéré qu'une composante importante de l'erreur de calibrage provenait de la mauvaise estimation de ce rapport. Les données du constructeur ne sont visiblement pas suffisamment précises pour être utilisées directement. Dans cette deuxième implémentation, les données du constructeur concernant ce rapport ne sont utilisées que pour initialiser la valeur du paramètre qui sera plus précisément déterminé par optimisation. Si nous n'avons pas considéré séparément *dx* et *dy*, c'est parce que parmi les trois paramètres *dx*, *dy* et *f*, seuls deux sont indépendants.

Les équations qui permettent de passer des coordonnées d'un point "distordu" exprimées dans le repère image aux coordonnées de ce même point exprimées dans le repère capteur sont les suivantes :

$$X_{dis} = dx\,(X_{ima} - X^{opt}_{ima})$$
$$Y_{dis} = dy\,(Y_{ima} - Y^{opt}_{ima})$$

Les équations qui relient les coordonnées d'un point "distordu" avec celles de son correspondant "non distordu" dans le repère capteur sont les suivantes :

$$X_{cap} = X_{dis}\,(1 + k\,(X_{dis}^2 + Y_{dis}^2))$$
$$Y_{cap} = Y_{dis}\,(1 + k\,(X_{dis}^2 + Y_{dis}^2))$$

5.2.3.2 La procédure de calibrage et le mode opératoire

5.2.3.2.1 Le dispositif de calibrage:

Le dispositif qui nous a permis d'effectuer les calibrations de la caméra est une mire "en damier" composée de 20 x 14 carrés. La taille de chaque carré est de 4cm x 4cm (cf. figure 60).

Figure 60 : La mire de calibration

5.2.3.2.2 Principe de calibrage et mode opératoire:

A l'heure actuelle, le calibrage s'effectue "off-line" mais la procédure peut être intégrée au sein d'un module RTMAPS de façon à ce qu'elle soit utilisée en temps réel ou pas à la manière de RTMAPS.
Le calibrage de la caméra repose sur un principe simple:

1. l'extraction d'indices visuels dans l'image (ici, les coins des carrés),
2. le repérage de ces indices et leur positionnement (dans le repère image puis dans le repère caméra),
3. mise en correspondance de ces indices avec les amers 3D réels appartenant à la mire,
4. l'association des ces positions 3D avec les positions 2D des indices visuels extraits et ce, à travers les paramètres intrinsèques et extrinsèques; et enfin:
5. l'estimation des paramètres de calibrage.

Nous allons décrire rapidement chacune de ces 5 étapes dans l'Annexe dédiée au calibrage.

5.2.3.2.3 Les résultats de la calibration

La calibration a fourni les paramètres suivants pour la caméra utilisée pour les séquences de tests:

Paramètres intrinsèques :

- Focale :

$$\boxed{f = 5.4 \text{ mm}}$$

- Position du centre optique dans le repère image normalisé :

$$\boxed{X^{opt}_{ima} = 144 \text{ pixels}, \; Y^{opt}_{ima} = 192 \text{ pixels}}$$

- Taille du pixel CCD :
  $\boxed{d_x = d_y = 73.31 \text{ pixels}}$ → 1 mm CCD donne 73.31 pixels en X et en Y (le pixel est supposé carré)
- Distorsion radiale du 1er ordre : négligeable ! → $\boxed{k = 0}$

Paramètres extrinsèques :

- Hauteur de la caméra par rapport au repère odométrique (milieu de l'essieu arrière):
  Tz = 1.1 mètres
- Tangage de la caméra : $\psi = -2.3°$
- Inclinaison de la caméra : $\varphi = -1.22°$
- Lacet de la caméra (cap) : $\theta = 0°$

Translation du repère caméra par rapport au repère odométrie (exprimée dans le repère du véhicule, le repère odométrique) :

$T_x = 1.80$ m	$T_y = 0.13$ m	$T_z = 1.10$ m

5.2.4 Traitement de la perte de contrôle en virage

5.2.4.1 Horizon électronique

La tâche des logiciels de navigation consiste à explorer la carte afin d'extraire des informations sur l'infrastructure routière que notre véhicule s'apprête à traverser ; l'ensemble de ces informations est appelé horizon électronique.
Celui-ci se présente sous la forme d'une série de points, le premier correspondant à la position map-matchée du véhicule. Chacun de ces points est défini par sa longitude, sa latitude et la courbure locale de la route. L'horizon électronique peut également contenir toute autre information disponible dans la base de données cartographique, comme par exemple le nombre de branche des intersections, leur orientation ou le nombre de voies d'une route.

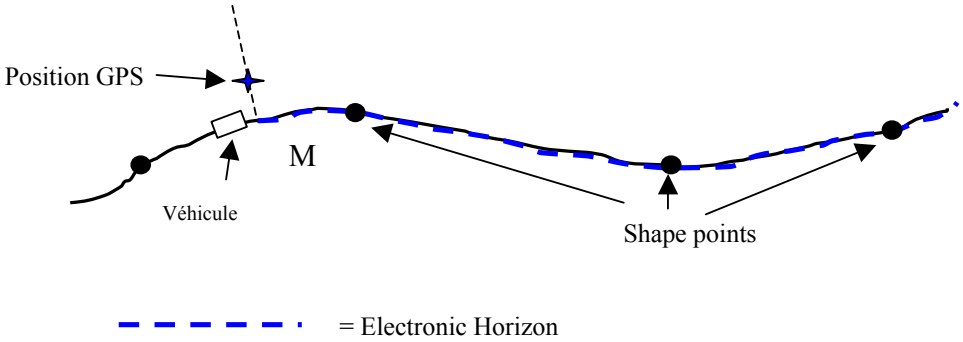


Figure 61 : horizon électronique

La longueur de cet horizon électronique est en général paramétrable. En utilisation sécuritaire, sa longueur doit être au minimum de 200m pour permettre une bonne anticipation de l'infrastructure. Cependant s'il se présente une intersection ou un embranchement à une distance inférieure à la longueur choisie de l'horizon électronique, le SIG se trouve devant un cas d'ambigüité puisqu'il ne peut affirmer avec certitude sur laquelle des différentes routes possibles le conducteur a l'intention de s'engager.
Certains SIG tels qu'ADASRP peuvent alors soit retourner l'ensemble des hypothèses possibles, soit sélectionner la plus vraisemblable en fonction de l'importance des différents axes. Quoi qu'il en soit puisque nos applications ne considèrent que l'approche sur de telles intersections, la justesse des hypothèses au-delà de la traversée de ces intersections nous importe peu.

5.2.4.2 Mise en correspondance entre l'horizon électronique et l'image

La forme d'arrivée de l'horizon électronique présente deux problèmes pour l'utilisation que nous souhaitons en faire : les points géométriques se présentent sous la forme « longitude, latitude » (système de coordonnées LLA) que l'on ne peut interpréter tels quels dans l'image, et la fréquence de mise à jour de ces données est bien plus lente que celle des images vidéo.
Dans un premier temps il est donc nécessaire de convertir les coordonnées LLA absolues en coordonnées métriques relatives (par rapport au véhicule). A chaque nouvelle arrivée d'horizon électronique, ces coordonnées sont donc converties en écarts métriques «DeltaPosition », en prenant pour origine le premier point de l'horizon, sur lequel le véhicule est censé se trouver.
En considérant ensuite que le véhicule se dirige dans la direction de la route, on effectue une rotation de façon à ce que les écarts de position soient mesurés suivant les axes du véhicule.
Afin de disposer de données mises à jour à la même fréquence que le signal vidéo, cet horizon dans le repère véhicule sera recalculé à chaque arrivée d'une nouvelle image en intégrant le déplacement du véhicule le long du segment courant. Le calcul pour y parvenir est simple, puisque, connaissant la vitesse courante du véhicule, il suffit de calculer la distance parcourue depuis la dernière image et de la soustraire à chacun des points de l'horizon dans le repère relatif.

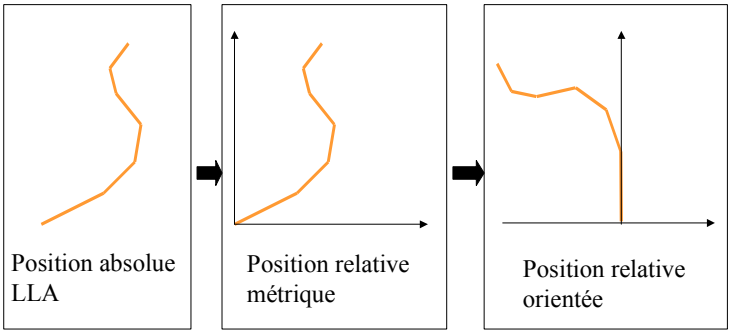


Figure 62 : Traitement de l'horizon électronique : conversion des segments de route dans le repère relatif au véhicule

Une fois cette opération effectuée, les différents points ainsi calculés dans le repère du véhicule sont projetés dans le plan image, en utilisant les paramètres de calibration de la caméra. On obtient ainsi la position dans l'image des différents segments de l'horizon ou de points particuliers tels que la position des intersections et des embranchements.

5.2.4.3 Détection de masquages statiques sur virages

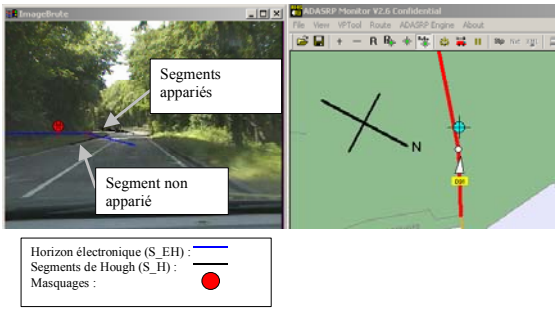
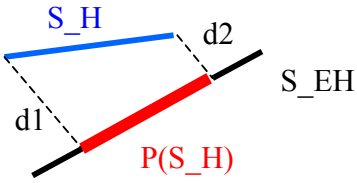


Figure 63 : Détection de masquages statiques par la végétation

La détection des masquages équivaut en fait à une non-détection des lignes de route (marquages, trottoirs, bas-côtés).
Pour cela on effectue dans un premier temps une rétroprojection de l'horizon électronique dans l'image. Les lignes obtenues donnent les directions dans lesquelles on s'attend à trouver des lignes de route. Chaque ligne définit donc une zone de recherche dans laquelle on effectue une recherche de segments par l'algorithme de Hough. Pour une fenêtre donnée, les traitements donnent donc une liste de segments que l'on cherchera à mettre en correspondance avec la direction principale recherchée. Les segments de



$$D = d(S_H, P(S_H)) = d1 + d2$$

Figure 64 : distance segment à segment

Hough retournés doivent respecter une longueur minimale (mesurée en pixels). Plusieurs segments sont ensuite fusionnés (regroupés) si les distances entre ces segments sont inférieures à un seuil maximal prédéfini mais paramétrable.
Le critère de mise en correspondance repose sur une mesure de distance entre les segments identifiés par Hough (S_H) et le segment obtenu par l'horizon électronique (S_EH). Pour chaque S_H, on définit sa pertinence face à la direction recherchée par la distance entre S_H et sa projection sur le S_EH. Une telle définition de ce critère permet de tenir compte des détections partielles de segments, et donc d'identifier un segment dont on n'aurait retrouvé qu'une petite portion dans l'image. Il permet également de donner un faible score à un segment qui se situerait dans une zone proche du segment de l'horizon électronique sans avoir la même orientation.

Des premiers résultats ayant mis en évidence une sensibilité aux pertes temporaires de détection des segments, un suivi temporel a été ajouté par la suite afin de filtrer les cas où l'algorithme de Hough ne retrouve pas sur une ou deux images les segments que l'on identifiait parfaitement dans les images précédentes. Pour cela un indice de fiabilité est attribué à chaque segment et se voir renforcé au fur et à mesure que ce segment est retrouvé dans l'image.

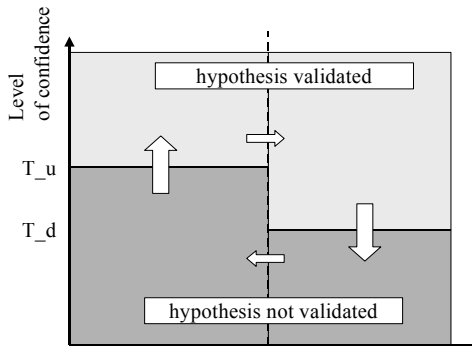


Figure 65 : Validation et invalidation d'hypothèses : seuillage par hystérésis

Lorsqu'un segment n'est plus identifié par Hough, sa fiabilité décroît mais peut rester suffisamment haute pendant quelques temps si le segment a été suffisamment longtemps confirmé. Ainsi plus un segment aura été confirmé, plus il aura acquis de « l'inertie », faisant en sorte qu'il ne sera considéré comme non détecté qu'après plusieurs images dans lesquelles il n'apparaîtrait pas. La figure 65 représente le mécanisme d'évolution des indices de fiabilité ; l'inertie de ce système peut s'ajuster en modifiant uniquement l'écart entre les seuils inférieurs et supérieurs (T_d et T_u).

5.2.4.4 Localisation du véhicule sur la voie

Pour détecter un risque de sortie de route, il est nécessaire dans un premier temps d'avoir une estimation de la position et de l'orientation du véhicule à l'intérieur de sa voie. Pour cela nous nous emploierons les images fournies par la caméra pour détecter les marquages au sol situés dans une zone proche de notre véhicule : après avoir défini une zone de recherche rectangulaire occupant le bas de l'image, nous pouvons effectuer une extraction de contours et application de la transformée de Hough (par une méthode identique à celle employée pour la détection de masquages). Ces traitements nous retournent donc les différentes portions de contours rectilignes situés dans cette zone, et en particulier ceux des marquages au sol recherchés.

En considérant que ces marquages sont parallèles et en admettant encore une fois l'hypothèse de route plane, il est donc possible d'extraire des coordonnées (p,θ) de ces segments de droite la position et l'orientation du véhicule par rapport à ces droites dans l'espace tridimensionnel, donc par rapport à la voie.
La base de donnée cartographique nous fournit en outre une description géométrique de la voie en avant du véhicule, toujours par application du système d'horizon électronique. En couplant ces informations avec celles de localisation du véhicule évaluées précédemment, il est donc possible de reconstituer l'ensemble de la situation.

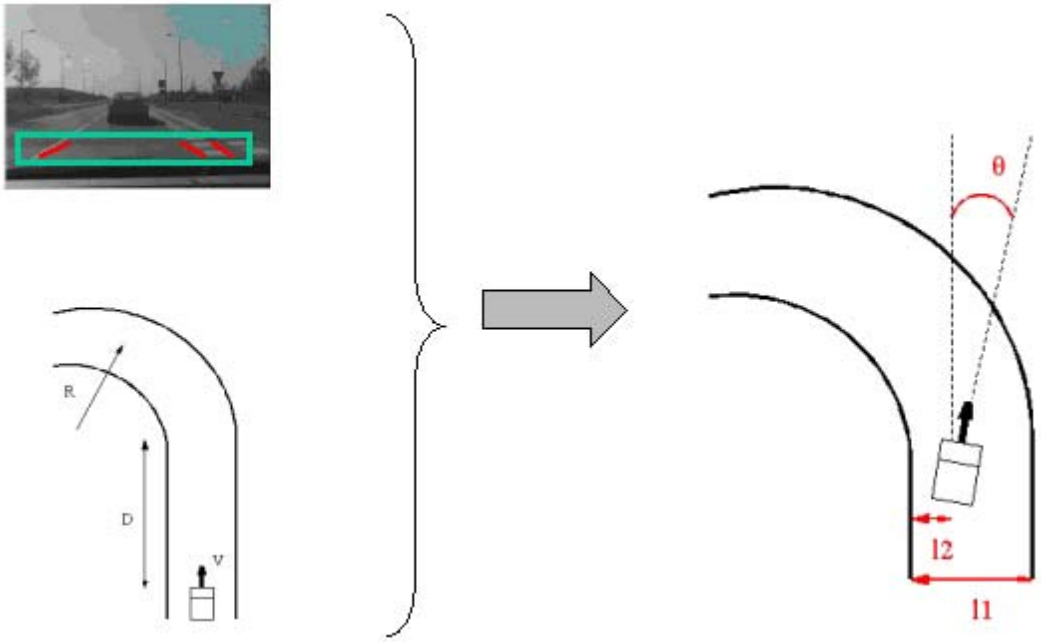


Figure 66 : Positionnement du véhicule sur la voie

Traitement simple des arrivées sur virages.

La méthode simple de traitement des virages ne prend en compte que la courbure du virage et notre vitesse d'arrivée sur celui-ci. Afin de simuler une situation de danger nous avons donc considéré la vitesse du véhicule avec un coefficient multiplicatif suffisant pour voir apparaître des situations de danger. La figure 67 montre une telle situation : au fur et à mesure que l'on s'approche de l'intersection à vive allure, la décélération requise pour entrer dans le virage à une vitesse raisonnable augmente.

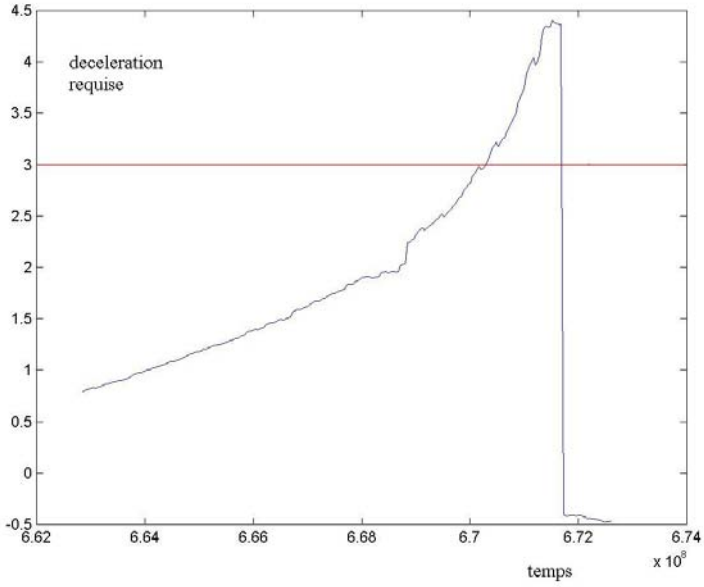


Figure 67 : décélération requise en arrivée sur virage

Lorsque cette accélération dépasse le seuil de 3m/s², la situation est considérée comme dangereuse. La discontinuité observée par la suite correspond à l'arrivée du véhicule sur le virage, le système prenant alors en compte le virage suivant et la décélération requise devient alors quasiment nulle.

5.2.5 Traitement du risque de collision en intersection

Tout comme dans le cas des traitements des virages sur données réelles, l'estimation du risque de collision demande un certain nombre de traitement spécifiques des données fournies par l'instrumentation du véhicule. Ces traitements concernent essentiellement la détection de véhicules dans la scène et l'estimation de leur position ainsi que de leur dynamique. Les capteurs susceptibles de parvenir à ce résultat se limitent aux capteurs télémétriques (radar ou lidar) ainsi qu'à la caméra.

5.2.5.1 Algorithmes de détection et suivi de véhicules

La détection de véhicules par différents capteurs extéroceptifs a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux dans le domaine des systèmes de transport intelligents.

5.2.5.1.1 Détection par radar

La détection par radar est actuellement la seule qui soit implémentée sur certains modèles d'automobiles vendus dans le commerce. Elle est en effet intégrée dans toutes les applications d'ACC (adaptive cruise control), consistant à réguler automatiquement la vitesse du véhicule en fonction de celle du véhicule le précédant.
Les radars utilisés pour de telles applications peuvent avoir une portée de l'ordre de 200m, et retournent la position en coordonnées polaires des véhicules détectés avec une précision de l'ordre de 0.1m ([Langer97]).
Les radars s'avèrent très efficaces dans des utilisations très spécifiques, cependant ils peuvent devenir peu efficaces pour détecter des objets de petite taille, ou risquant de sortir de leur cône restreint de détection.

5.2.5.1.2 Détection par télémètre laser

Le fonctionnement des télémètres lasers repose sur le même principe que celui du radar, à la différence que les ondes envoyées sont émises sous la forme de laser visibles ou infrarouges. Le récepteur peut ainsi établir une carte de temps de vol de ces lasers sur toute la zone de balayage, mais également une carte d'intensité des signaux récupérés.
Les méthodes d'interprétation de ces cartes sont nombreuses et ont été référencées par Hancock ([Hancock99]). La plupart reposent sur la détection de discontinuités dans ces cartes, servant de point de départ à des algorithmes de segmentation standard. Ces traitements peuvent également s'appuyer sur une modélisation standard de l'environnement, certains travaux recherchant la structure des bords de route

([Kirchner00]), d'autres prenant en compte des modèles standards de véhicules ([Dietmayer01]).

Les télémètres laser offrent de très bonnes performances, ayant pour principal avantage de disposer d'un angle de balayage très large pouvant aller jusqu'à 360°, et de proposer une très bonne précision de détection à longue distance. Cependant ces dispositifs sont encore très coûteux, et ne peuvent pas être utilisés en toutes conditions : ils peuvent être en particulier fortement perturbés par les conditions météorologiques, et certains obstacles au revêtement réfléchissant peu les ondes lumineuses peuvent s'avérer difficilement détectables.

5.2.5.1.3 Détection par vision mono-caméra

La détection de véhicules par traitement d'images reposent pour la plupart sur la recherche dans l'image de primitives caractéristiques de l'apparence d'un véhicule automobile. Afin d'interpréter ces structures comme un véhicule dont on souhaiterait connaître la position dans l'espace, il est en outre nécessaire d'ajouter une hypothèse sur l'environnement, qui consiste le plus souvent à choisir l'hypothèse de route plane.

- mesure d'entropie

Dans les travaux de Kalinke ([Kalinke98]), la segmentation de l'image repose sur une mesure de l'entropie des textures de l'image, ou sur l'utilisation de matrices de cooccurrences prenant en compte l'entropie, l'énergie, le contraste et la corrélation des images.
Cette méthode, bien que parfois coûteuses en temps de calcul, s'avère efficace pour la détection de véhicules en dépassement ou situés dans les voies proches de notre propre véhicule.

- Symétrie

Les véhicules automobiles ont tous comme propriété intéressante d'être symétriques suivant le plan sagittal (plan « coupant » verticalement le véhicule dans le sens de la longueur). Ainsi un véhicule vu de face ou de l'arrière présentera sur l'image une symétrie suivant un axe vertical. Cette propriété a été exploitée par Zielke et al. ([Zielke92]) et Broggi et al. ([Broggi00]). Cette méthode a l'avantage d'être simple et généralement peu coûteuse, notamment lorsqu'elle s'associe à d'autres détections de primitives permettant une pré-détection grossière des véhicules. Sa principale limite repose cependant sur l'hypothèse initiale de symétrie, puisque cette hypothèse sera d'autant plus fausse que l'axe du véhicule cible s'éloignera de l'axe de la caméra.

- ombres portées

Tout véhicule observé dans des conditions diurnes courantes présente une propriété intéressante : il présente une ombre portée au sol nettement plus sombre que l'ensemble de la route. La détection de cette ombre peut donc servir de moyen de localiser un éventuel véhicule. La méthode la plus souvent retenue pour cela consiste à explorer une fenêtre de l'image correspondant à une zone proche du véhicule, et permettant de mesurer la luminosité moyenne de la route. Un seuillage autour de cette valeur permettrait donc d'extraire de l'image les zones plus sombres et donc susceptibles d'appartenir à d'autres véhicules.

Les éléments plus sombres que la route pouvant être nombreux dans la scène, cette méthode risque d'émettre un grand nombre de fausses détections. Dans des travaux précédents ([Revue00]), une façon de réduire le nombre de ces fausses détections a consisté à gérer des hypothèses compétitives qui seront validées ou invalidées selon la cohérence de leur suivi sur plusieurs images.
En effet chaque zone sombre détectée dans l'image engendrera une hypothèse de véhicule à laquelle on attribuera un indice de fiabilité initialement peu élevé. A chaque nouvelle image, les hypothèses de véhicules seront mises à jour en utilisant les prédictions d'un filtre de Kalman. Selon que ces positions prédites soient compatibles ou non avec les nouvelles détections de zones sombres dans la nouvelle image, l'indice de fiabilité de l'hypothèse correspondante sera augmenté ou diminué, pouvant conclure à la validation, l'invalidation ou la suppression de cette hypothèse.

L'utilisation des ombres portées pour la détection de véhicules présente cependant des inconvénients assez évidents : cette méthode peut devenir complètement inefficace en cas de luminosité très faible, de conduite nocturne, ou au contraire de soleil rasant très fort pouvant causer des ombres portées bien plus grandes que le véhicule correspondant.

- Segment

Une primitive couramment employée pour la détection de véhicules (ou d'objets artificiels de façon générale) repose sur la détection de segments. La méthode la plus courante pour les localiser dans une image repose sur l'action couplée d'une extraction de contours et d'une transformation de Hough ([Betke96]).
La limitation de cette méthode provient de ce qu'elle peut facilement être bruitée par l'environnement, susceptible de présenter également des contours rectilignes.

- flot optique

La méthode du flot optique a pour but de déterminer à partir d'une séquence d'images un champ de vitesse des pixels, correspondant à un déplacement (absolu ou relatif) d'objets observés. Ce traitement consiste à considérer la fonction d'intensité I(x,y,t) dans la séquence d'images, et notamment ses dérivées partielles par rapport à x, y et t (x et y étant les coordonnées dans l'image, t le temps).

Les hypothèses faites quant à l'évolution de la luminosité dans l'image nous amènent à une équation de contrainte :

$$-\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v$$

Où u et v sont les composantes du champ de vitesse au point (x,y).

Il est ensuite nécessaire de définir une contrainte supplémentaire pour pouvoir isoler une solution (u,v) unique ; il existe pour cela plusieurs techniques, les plus courantes étant les techniques différentielles (Lucas et Kanade, Horn et Schunk, … une comparaison très complète des différentes méthodes de flot optique a été effectuée par Barron et al. [Barron94]).

La méthode de Lucas et Kanade consiste en une minimisation aux moindres carrés sur un groupe de pixels adjacents. Cela revient en solution approchée à résoudre le système :

$$\sum_{x,y} W(x,y) I_x I_y u + \sum_{x,y} W(x,y) I_y{}^2 v = -\sum_{x,y} W(x,y) I_y I_t$$
$$\sum_{x,y} W(x,y) I_x{}^2 u + \sum_{x,y} W(x,y) I_x I_y v = -\sum_{x,y} W(x,y) I_x I_t$$

Où W(x,y) est une fenêtre gaussienne sur le voisinage considéré.

Cette méthode a pour première particularité d'être extrêmement coûteuse en temps de calcul, en comparaison des autres méthodes de traitement d'images mono-caméra. En pratique, elle s'avère performante pour des objets présentant un fort déplacement dans l'image, et sera d'autant plus efficace que la taille de ces objets est importante. C'est la raison pour laquelle elle est parfois utilisée pour la détection de véhicules en dépassement ou effectuant des manœuvres de changement de ligne. En revanche, les résultats peuvent être bien moins satisfaisants pour la détection de véhicules présentant un faible mouvement relatif par rapport à notre propre véhicule, ce qui la rend peu adaptée à des applications de type ACC.

- comparaison image à image

La comparaison entre images successives a été utilisée par Betke et al. ([Betke96], [Betke98]) pour détecter le passage de véhicules effectuant des dépassements, ou étant dépassés. Ce passage continu d'obstacles sur les côtés du véhicule instrumenté causent en effet des variations de luminosité aisément détectables. Cette méthode ne peut cependant pas suffire à la seule détection des véhicules, puisque ce phénomène de variation de luminosité sera identique si l'on passe à proximité d'un élément d'infrastructure de grande taille (pilier de pont ou arbres par exemple).

5.2.5.1.4 Détection par stéréovision

La stéréovision consiste à observer une même scène avec plusieurs caméras (généralement deux) disposant chacune d'un angle de vue différent.
Le plus souvent, la disparité entre les images retournées par chaque caméra permet de reconstituer la distribution tridimensionnelle des différents objets observés, moyennant un calibrage précis des caméras. De telles méthodes sont décrites dans les travaux suivants : [Bensrhair01], [Burie96], [Franke00], [Hariyama00], [Knoeppel00], [Koller94], [Labayrade02], [Nishigaki00], [Ruichek00].

Cependant une autre approche consiste à définir une transformation homographique entre les images provenant des deux caméras, faisant en sorte que les points de la route d'une image se retrouvent projetés à l'identique sur l'image provenant de la seconde caméra. Ainsi en mettant en correspondance une image provenant d'une caméra et la transformée homographique d'une image provenant de la seconde, on pourra observer des disparités correspondant aux objets situés au-dessus (ou en-dessous) de la route. Des exemples de cette méthode peuvent être trouvés chez [Hariyama00], [Ishikawa], [Nguyen93], et [Bertozzi98].

5.2.5.1.5 Détection par fusion de données

Chaque méthode s'appuyant sur un seul type de capteur pouvant présenter ses limitations propres, il peut être tout de suite intéressant de confronter les sorties de plusieurs systèmes de détection différents ayant chacun ses spécificités. Les données ainsi fusionnées peuvent présenter un intérêt sous la forme de complémentarité ou de recoupement, donnant lieu à un enrichissement de l'information. On peut ainsi définir trois niveaux de fusion de données, le premier niveau concernant l'association de données complémentaires, le second la confrontation de données redondantes, et le troisième niveau concerne toutes les méthodes d'intelligence artificielle de plus haut niveau (voir [Dailey96]).

5.2.5.1.5.1 Quelques approches particulières de fusion de données

Les méthodes de fusion de données multi-capteurs peuvent prendre des formes très différentes. Ainsi dans [Jouannin99], une méthode reposant sur la théorie des possibilités fusionne les informations provenant des capteurs proprioceptifs du véhicule, d'un radar et d'une caméra, afin de positionner les obstacles dans la scène.
D'autres travaux utilisent la fusion de la télémétrie laser et de la vision afin de compenser les limitations de chaque capteur par les points forts de l'autre ([Shimomura01],[Stiller98],[Terakubo98]). En particulier le télémètre s'avère moins sensible aux conditions d'environnement que la caméra, mais ne dispose pas de la même rapidité d'acquisition.
Dans [Stiller98], une autre approche exploite davantage la complémentarité de la vision et de la télémétrie, en utilisant la première pour discriminer parmi les obstacles retournés par la seconde ceux qui se situent sur la route. Dans ce cas précis, la vision est uniquement utilisée pour détecter les lignes blanches de la route afin de bien délimiter celle-ci.
D'autres approches utilisent la fusion de données provenant d'un radar et d'une caméra ([Beauvais98], [Fang01], [Jouannin99],[Kato01]), voire même la triple fusion d'un radar, d'une caméra et d'un télémètre laser ([Becker00],[Gavrila01], [Langheim01], [Pontois98]).

5.2.5.1.5.2 Fusion de données par moteur d'inférence bayésien

Pour résoudre de façon plus générale le problème de la fusion de données multi-capteurs, des travaux ont été menés dans le but de mettre en œuvre une méthode de fusion qui puisse être indépendante du type de capteurs utilisés, et soit suffisamment modulable pour pouvoir intégrer différentes sources de données sans avoir à modifier l'approche générale.
La méthode utilisée consiste à utiliser le moteur d'inférence MAIS (Mines Automotive Inference System, développé au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris [Steux 01]). Celui-ci est un moteur d'inférence de réseau bayésien, qui a été réalisé tout particulièrement pour la fusion de données redondantes entre différents algorithmes de détection de véhicules. Ces algorithmes incluent une détection d'ombre des véhicules, une détection de symétrie, une détection de feux arrière et une détection par radar.

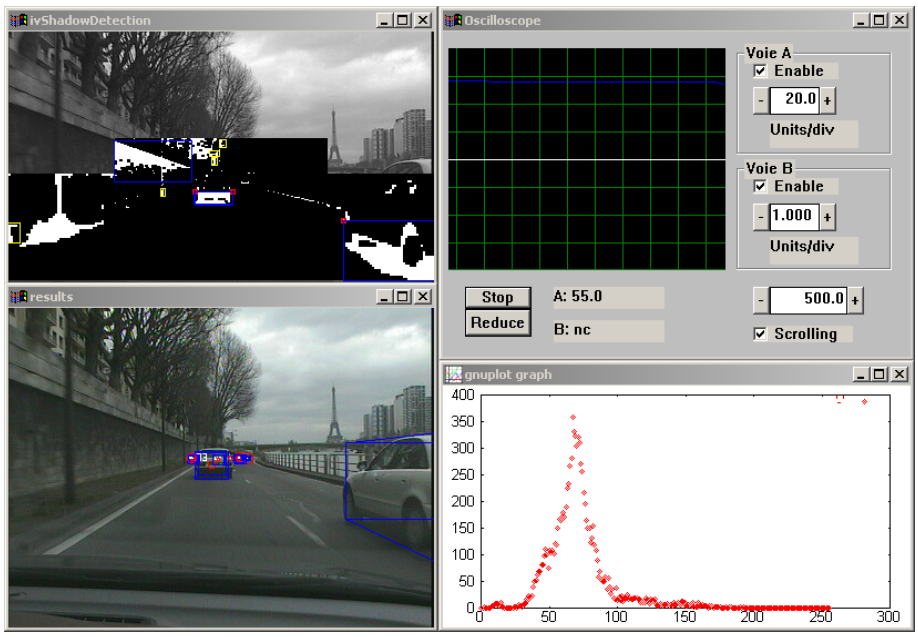


Figure 68 : Module de détection d'ombres

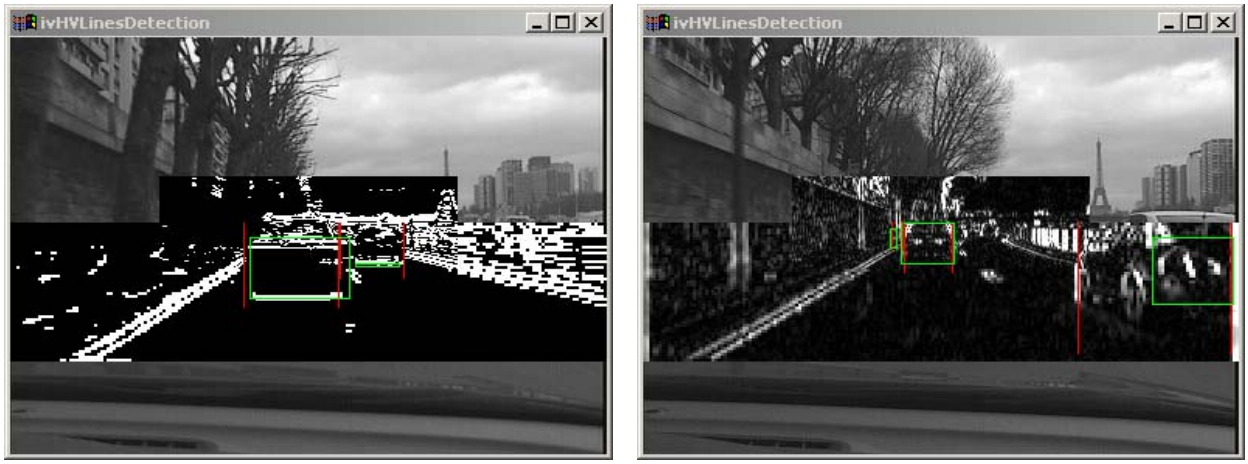


Figure 69 : module de détection de lignes horizontales et verticales

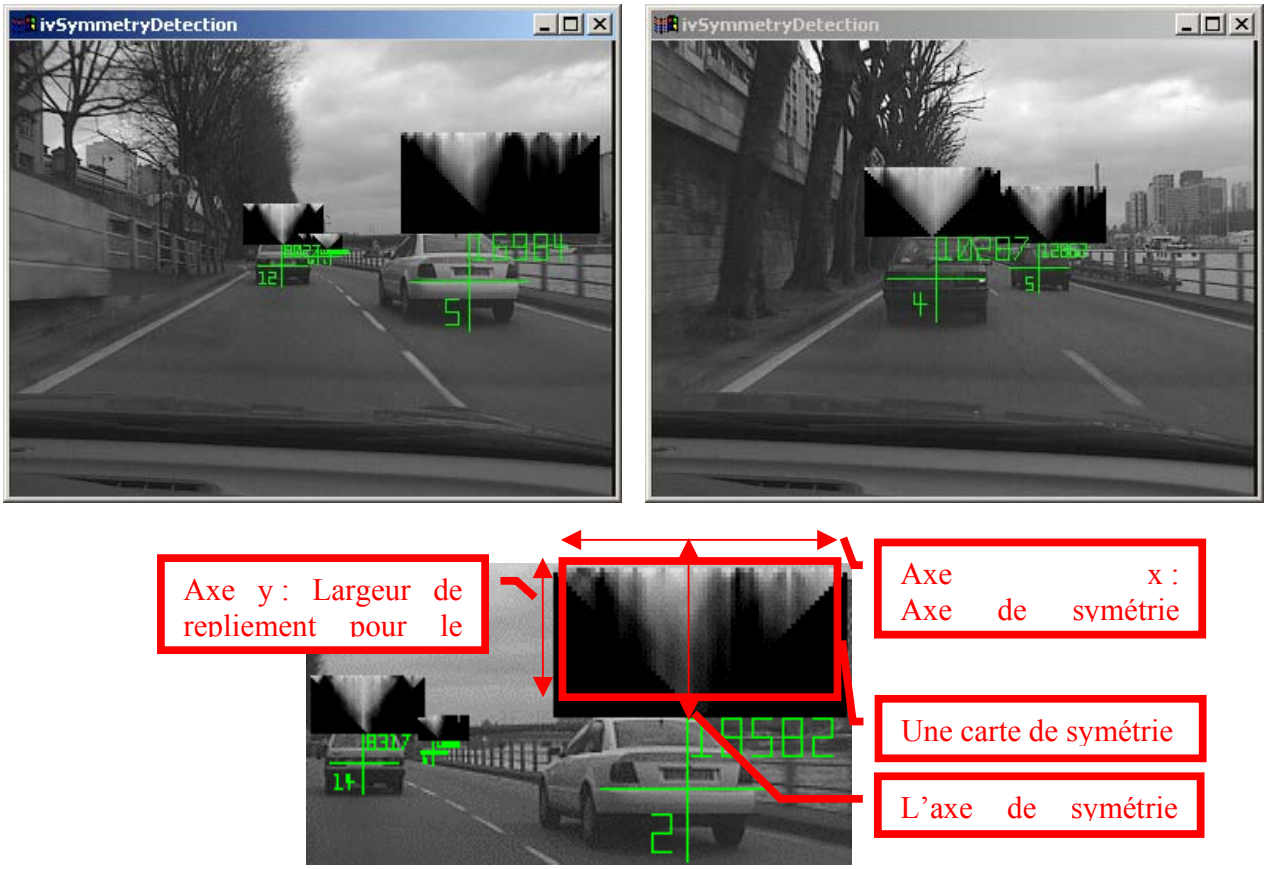


Figure 70 : module de détection de symétrie

Le moteur d'inférence MAIS présente la spécificité d'autoriser l'utilisateur à interrompre la procédure d'inférence lorsqu'il le souhaite : si l'utilisateur use de cette possibilité, le système lui renvoie alors un résultat approché. Cela autorise donc l'utilisation d'un réseau bayésien en temps limité, ce qui corrige une des limitations de cet outil pour les applications temps réel.

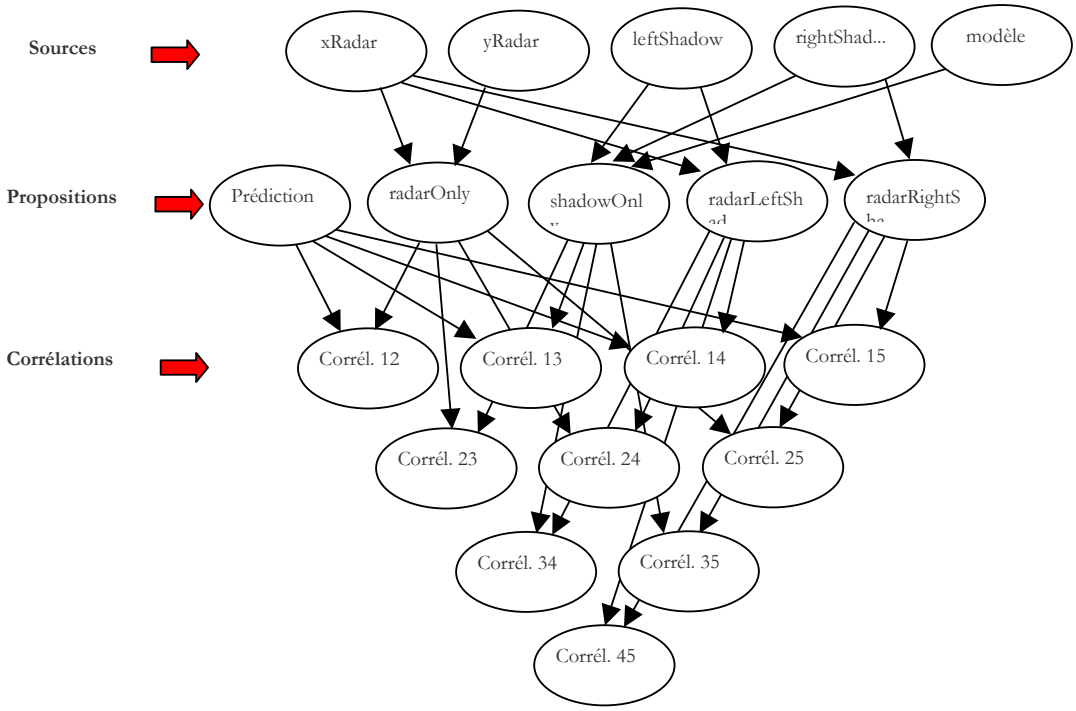


Figure 71 : Réseau bayésien employé pour la fusion de données

5.2.5.1.6 La méthode de détection utilisée

Dans les travaux faisant l'objet de cette thèse, nous nous sommes placés dans le cadre de scénarios bien définis. Ainsi si la méthode de fusion par réseaux bayésiens a pu être implémentée avec succès, il s'est avéré que dans tous les scénarios de suivi simple de véhicule, l'utilisation du seul radar ou d'une méthode détection d'ombres donnent des résultats tout à fait satisfaisants. Par souci d'économiser du temps de calcul, nous avons donc appliqué ces méthodes tant que les scénarios le permettaient.

5.2.5.2 Le cas particulier des véhicules vus de profil

La détection de véhicules arrivant latéralement sur une intersection est un problème très différent du cas, traité précédemment, des véhicules circulant dans le sens longitudinal.

En effet les véhicules arrivant latéralement ne sont pas visibles par le radar : leur vitesse relative étant relativement faible dans l'axe du radar, celui-ci les assimile à des éléments du décor et filtre donc leurs échos. De plus, un véhicule vu de côté ne présente pas les critères de symétrie, d'ombres ou de feux utilisés dans nos algorithmes de vision.

Première tentative : détection par flot optique.
Une première tentative de détection de ces véhicules visait à utiliser des méthodes de flot optique ([Barron 94]) afin d'extraire du champ de vitesse des différents pixels de l'image ceux dont le profil ne correspond pas au défilement du paysage, et de les interpréter comme des objets en déplacement.

Ces algorithmes expérimentés en d'autres circonstances peuvent donner des résultats satisfaisants pour détecter des objets en déplacement, lorsque ceux-ci se situent sur les côtés et proches du véhicule. Cependant dans le cas qui nous occupe, nous recherchons des cibles relativement éloignées et donc de taille apparente réduite. Le calcul du champ de vitesse à l'emplacement du véhicule est donc rendu plus difficile par la présence de l'environnement complexe et animé de son propre mouvement de défilement. A cela s'ajoutent d'autres perturbations telles que les variations de luminosité et les erreurs sur les paramètres estimés de la caméra, auxquelles de tels algorithmes sont très sensibles.

Une alternative : la discrimination suivant un modèle d'environnement.
Une seconde approche a alors consisté premièrement à se focaliser sur des points de l'image plus robustes aux perturbations, et à essayer d'attribuer les points observés à différentes configurations standards, plutôt que d'en chercher une localisation exacte. L'idée n'est plus de mesurer la vitesse en chaque pixel par flot optique, mais d'exploiter notre connaissance de la configuration de la route et de l'infrastructure en général pour définir dans la scène différentes classes d'objets, suivant leur positionnement géométrique, et de tenter d'attribuer les différents points d'intérêt à la classe la plus vraisemblable.

Pour définir ces points d'intérêt, nous avons choisi de nous intéresser aux contours des objets, puisqu'il s'agit là d'un élément relativement facile à extraire et qui s'est par le passé avéré robuste à beaucoup de perturbations. Un premier traitement extrait donc les contours des différents objets présents à l'image, par un filtrage morphologique de Sobel (puisque nous ne cherchons pas à segmenter des contours complets, les performances de l'extraction de contour importent peu, c'est pourquoi nous nous sommes limités à des filtres simples).
Géométriquement, chacun de ces points peut correspondre à n'importe quel point de l'espace situé sur la même « ligne de visée », reliant le centre optique de la caméra et l'élément de la matrice CCD correspondant à ce pixel.

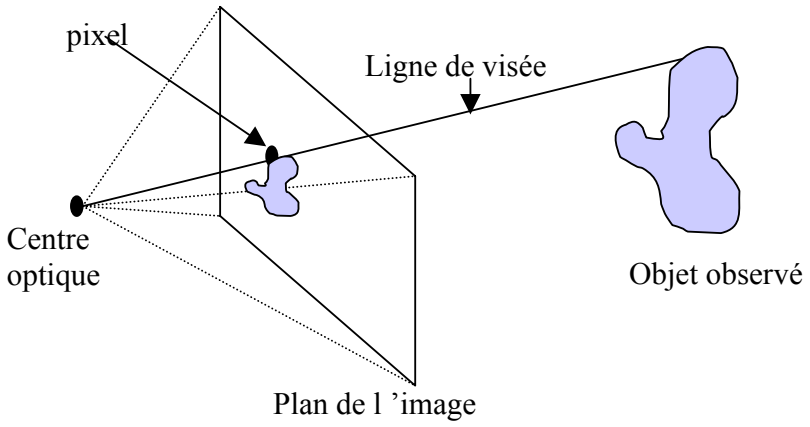


Figure 72 : Ligne de visée

L'étape suivante consiste à essayer d'attribuer chacun des points de contours à des zones de l'environnement que l'on aura définies au moyen de la cartographie. Ces zones peuvent se séparer en différents plans, l'un correspondant au plan horizontal de la route, le second au plan vertical des objets situés au niveau de l'intersection, et éventuellement d'autres plans verticaux correspondant aux côtés de la route (comme nos recherches se limiteront à la zone de l'intersection, la considération de ces plans n'est cependant pas utile dans notre cas).

Pour chaque point de contour considéré, on peut donc émettre deux hypothèses concurrentes : soit le point correspondant dans l'espace 3D est situé dans le plan de la route, soit il est situé dans le plan vertical de l'intersection. Afin de déterminer l'hypothèse la plus vraisemblable, nous chercherons à effectuer un suivi de ce point entre deux images successives. En effet un point de la route ne se déplace pas dans l'image de la même façon qu'un point situé au-dessus du sol.

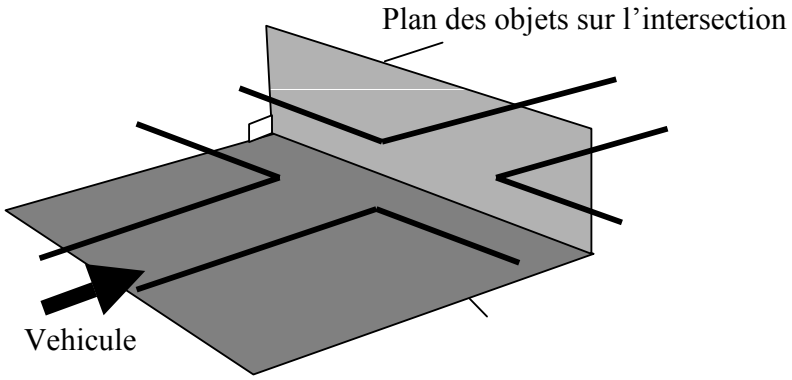


Figure 73 : Représentation simplifiée de l'environnement

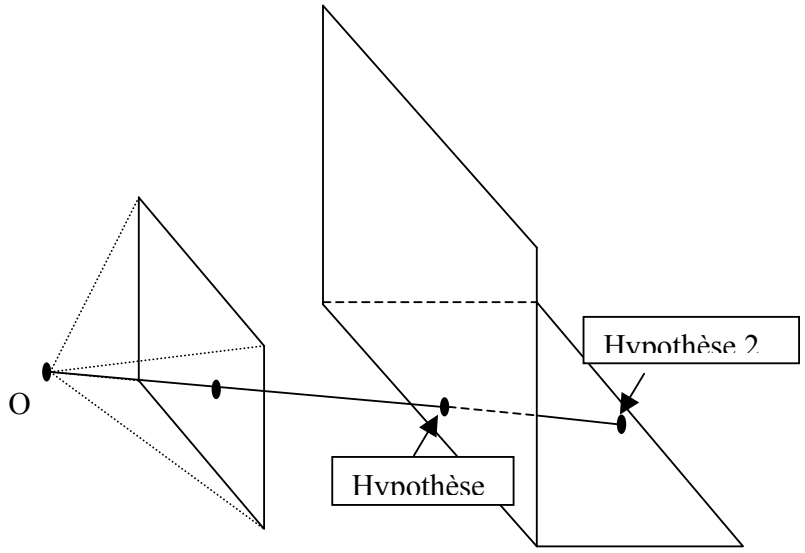


Figure 74 : création d'hypothèses

En chaque point considéré, on peut donc définir pour chaque hypothèse les coordonnées auxquelles on s'attend à le retrouver dans l'image suivante. En effectuant une corrélation simple entre le voisinage du point de départ (dans l'image originale, et non l'image contenant les contours) et le voisinage des points attendus, on peut ainsi déterminer laquelle des deux hypothèses est la plus vraisemblable, et donc attribuer chaque contour de l'image à un des plans de l'environnement. Chaque point attribué au plan horizontal sera donc écarté, puisque étant confondu avec la route il ne peut correspondre à un obstacle. Inversement tous les points attribués au plan vertical seront considérés comme faisant partie d'un obstacle potentiel.

Ce traitement ne fait que discerner parmi les objets dans la scène ceux se situant au niveau de l'intersection et n'appartenant pas à la route. De plus les hypothèses émises sur les différents points d'intérêt à l'écran supposent que les objets correspondants sont immobiles dans la scène. Dans les faits l'algorithme fonctionne toujours pour des véhicules se déplaçant à faible vitesse, mais cette approche ne peut certainement pas être appliquée à des objets se déplaçant rapidement.

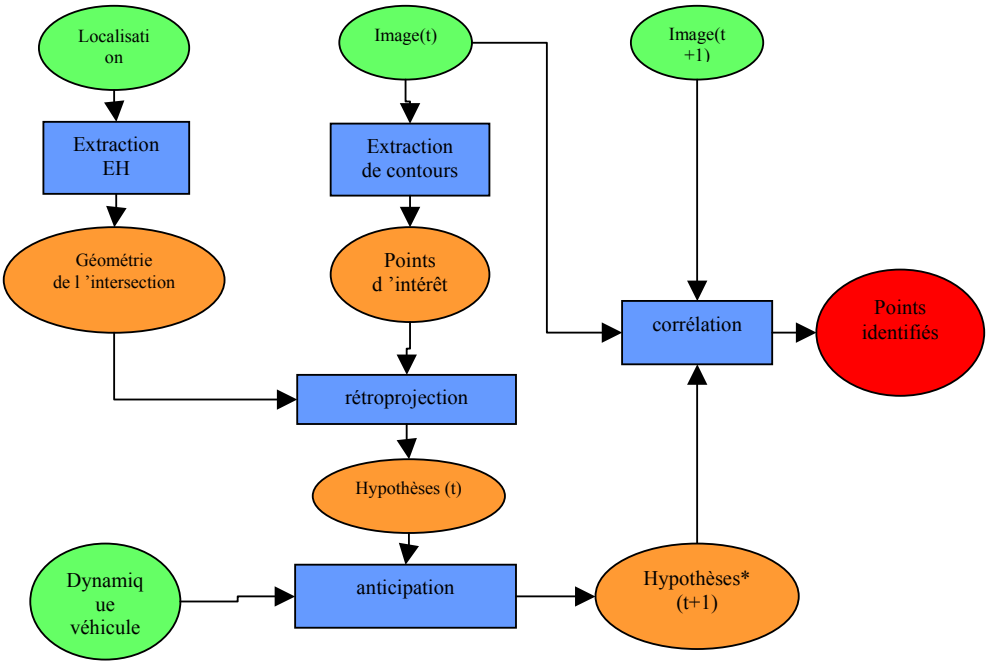
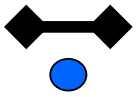


Figure 75 : Schéma récapitulatif de la détection de véhicules de profil

5.2.5.3 Algorithmes de détection de marqueurs accidentogènes

Les marqueurs ont été définis dans le chapitre d'accidentologie comme les éléments de l'environnement qui se sont avérés caractéristiques d'un scénario d'accident, et qu'il est nécessaire de pouvoir détecter afin d'identifier une éventuelle source de danger.

5.2.5.3.1 Détection de masquages statiques sur intersections



Portions visibles de l'EH

Portions masquées de l'EH

Figure 76 : détection de masquages statiques sur intersection

La détection de masquages sur intersection repose sur la même approche que les masquages en virage : la non-détection des lignes de route.
Les segments à rechercher ne sont pas cette fois ci ceux donnés par l'horizon électronique, mais ceux correspondant à la route traversant notre trajectoire au niveau de l'intersection, et ne figurant donc pas sur l'horizon électronique.

La première étape consiste à localiser le point où devrait se situer l'intersection dans l'image. Ce calcul revient à exploiter l'information « distance à la prochaine intersection » en suivant l'horizon électronique jusqu'à avoir parcouru cette distance. On en déduit donc l'écart de position entre l'intersection et le véhicule, ce qui nous permet de la localiser dans l'image par les mêmes calculs de rétroprojection que pour la rétroprojection de l'horizon électronique.

A partir de ce point, on peut donc définir des zones de recherche, en supposant que la route secondaire croise orthogonalement notre trajectoire. La recherche se fait alors de façon similaire à celle décrite pour les masquages statiques en virage.

5.2.5.4 Détection de masquages dynamiques sur intersection

La détection des masquages dynamiques de l'intersection par les autres véhicules est une application directe du suivi de véhicules et de la localisation d'intersection décrits précédemment. Ce traitement ne repose que sur des considérations géométriques, un véhicule étant considéré comme un masque dynamique que si la projection de son modèle 3D dans l'image masque la zone dans laquelle on a localisé une intersection.

On considère qu'il peut y avoir masquage dans deux configurations :

- masquage potentiel de véhicules lents :

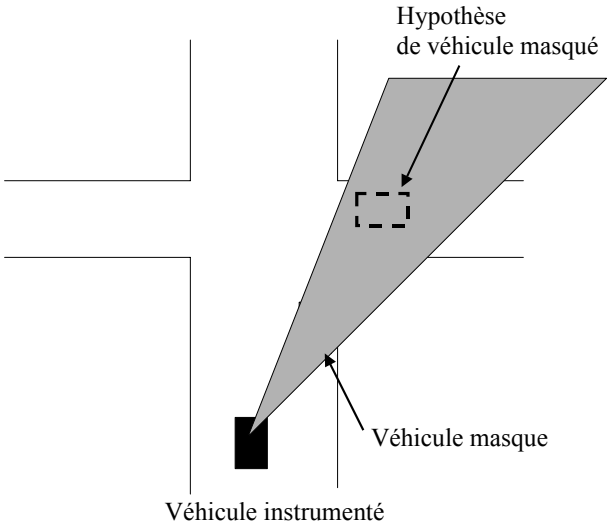


Figure 77 : masquage dynamique de véhicules arrêtés

Cette situation correspond au cas où le véhicule suivi nous masque la voie secondaire dans sa partie la plus proche de l'intersection. Il peut donc y avoir une situation de danger si un véhicule se trouve à l'arrêt ou à faible vitesse au niveau de l'intersection, et ne serait donc pas perçu par le conducteur.
On considère donc qu'il y a masquage si une surface correspondant à la longueur d'un véhicule se trouve à plus de 50% dans le «cône d'ombre» généré par le masque dynamique.

- masquage potentiel de véhicules rapides :

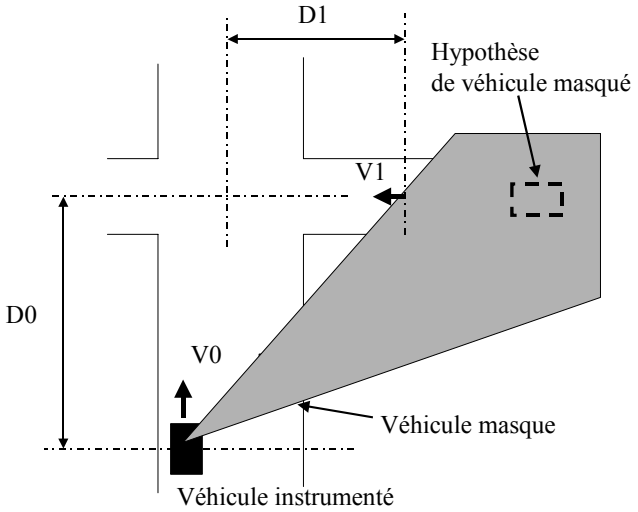


Figure 78 : masquage dynamique de véhicules en déplacement

cette situation correspond au cas où le véhicule suivi nous masquerait une portion de la route secondaire éloignée de l'intersection, dans laquelle un véhicule serait susceptible d'arriver à grande vitesse sur l'intersection.
Pour détecter un masquage, on commence par estimer la vitesse minimale V1 des éventuels véhicules situés dans la «zone d'ombre », en tenant compte de notre propre vitesse et de la distance qui nous sépare de l'intersection :

$$V_1 = V_0 \frac{D_1}{D_0}$$

Tout véhicule masqué n'est potentiellement dangereux que si sa vitesse est supérieure à V1. On considérera donc qu'il y a masquage lorsque V1 reste inférieur à une valeur cohérente (limite choisie de 90 km/h).

5.2.5.5 Détection de clignotants

Connaissant la position de chaque véhicule détecté et suivi, on peut en déduire l'espace occupé par ces véhicules dans l'image, en considérant un modèle moyen de véhicule. Nous obtenons ainsi une zone de recherche à laquelle nous pouvons nous restreindre pour identifier des indices propres aux véhicules, tels que les feux et clignotants.

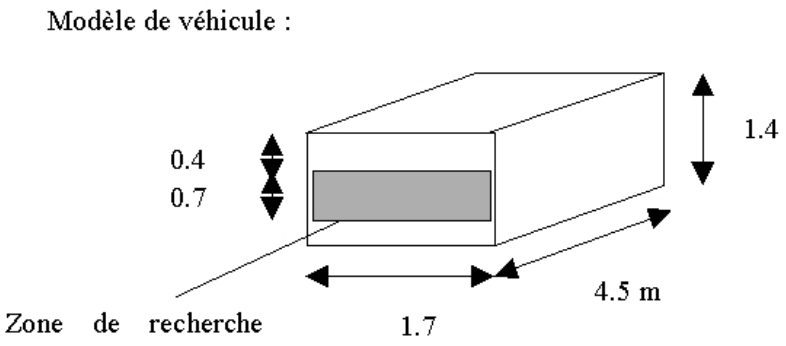


Figure 79 : Modèle de véhicule considéré

Pour détecter un clignotant on cherche avant tout à isoler les zones de plus forte luminosité : après avoir calculé l'histogramme des composantes Y et V de l'espace YUV dans la zone de recherche, et avoir seuillé cette zone à une proportion donnée de l'histogramme (95% dans les tests effectués), on obtient après labélisation les zones de plus forte luminosité du véhicule. Ces différentes régions sont ensuite sélectionnées en fonction de leur forme et de leur taille, un phare étant de forme rectangulaire (plus large que haut) et sa taille doit appartenir à une fourchette « raisonnable » en fonction de la distance qui nous sépare du véhicule. Cette fourchette a été prise expérimentalement entre 10cm et 30cm de large.

Chaque région correspondant à ces critères sera donc considérée comme une hypothèse de clignotant possible. A chaque nouvelle image, on compare donc ces régions aux différentes hypothèses en cours. Les régions ne correspondant à aucune hypothèse émise auparavant créent donc une nouvelle hypothèse à laquelle on attribue sa date de création. Les régions qui concordent avec une hypothèse précédente (c'est à dire qui ont un recouvrement suffisant : le critère retenu utilise une application simplifiée de la distance de Hausdorff sur les régions considérées, deux régions étant appariées si leur distance est inférieure à leur hauteur) renforcent la crédibilité de cette hypothèse, dont on ne modifie pas la date de création.

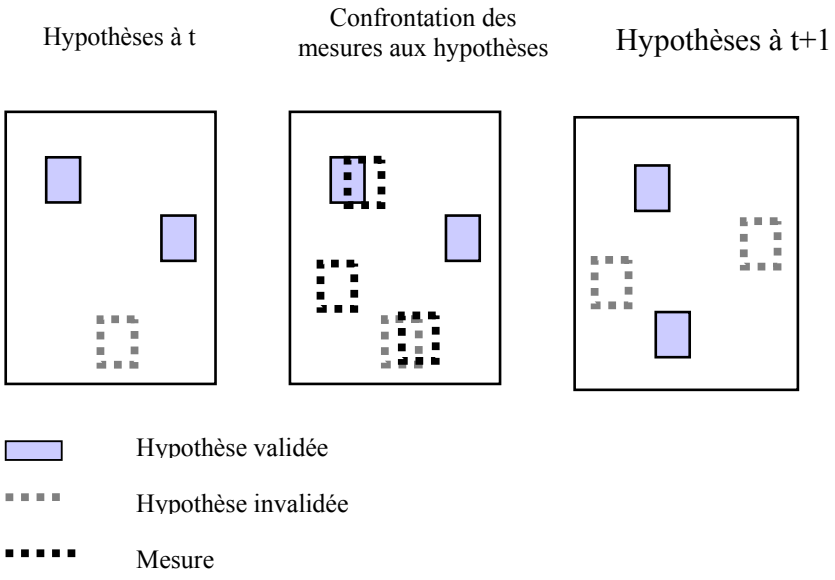


Figure 80 : suivi d'hypothèses avec évolution de taux de fiabilité

Un clignotant se définissant par l 'apparition puis la disparition d'un feu de signalisation, la détection est activée lorsqu'une des hypothèses de clignotants suivies n'est plus confirmée par les régions de forte luminosité extraites de l'image. Cela correspondrait dans cette hypothèse au passage du clignotant de l'état allumé à l'état éteint. En considérant la date de création de l'hypothèse, on peut en déduire la durée pendant laquelle cette région a été lumineuse et donc combien de temps le supposé clignotant est resté allumé. Si ce temps est trop court (inférieur à 500 ms) ou trop long (supérieur à 2000 ms), on considère qu'il ne correspond pas à la fréquence d'un clignotant et que l'hypothèse est fausse. Dans le cas contraire, on en déduit l'activation d'un clignotant, dont la position dans la zone de recherche définit la direction dans laquelle le véhicule a l'intention de tourner.

Figure 81 : Détection de clignotant

On peut observer que la seule détection de zones lumineuses de taille et de forme adéquate ne suffit pas, les fausses détections dues aux petits reflets et aux objets divers étant nombreuses. La mesure de la durée d'existence des régions est donc bien justifiée.

5.2.5.6 Détection de feux stop

La détection des feux stop ressemble en grande partie à celle des clignotants, du moins pour la première partie : les phases de seuillage sur la composante Y, labélisation et sélection des régions est identique.
La similitude s'arrête là cependant, puisque les feux stop ne nécessitent pas de suivi temporel particulier, il est donc inutile de les suivre dans l'image. Une fois que toutes les régions pouvant correspondre à un feu stop ont été identifiées, on se contente de tenter de les apparier. Si deux feux sont détectés à la même hauteur dans la zone de recherche correspondant à un véhicule suivi, on considère que les feux stop de ce véhicule sont allumés.

Figure 82 : détection de feux stop

Un traitement complémentaire au précédent consiste à exploiter la couleur rouge des feux stop pour une validation supplémentaire : on effectue le même traitement que celui décrit ci-dessus, mais sur la composante V. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour renforcer ceux du traitement de la composante Y, mais ne sauraient être utilisés seuls puisqu'il arrive trop fréquemment que des feux stop éteints soient également détectés par cette méthode.

Lorsqu'ils sont allumés, les feux stop des véhicules sont très facilement détectables. Les seuls éléments pouvant s'avérer perturbants sont les reflets importants ou les objets de couleur rouge, suivant la composante Y ou V traitée, mais une utilisation combinée des deux traitements et l'utilisation des appariements résolvent la plupart des ambiguïtés.
Tout comme pour les clignotants, la discrimination des feux n'est cependant possible que pour des véhicules suffisamment proches : lorsqu'ils sont trop éloignés, la taille des feux dans l'image est trop petite pour être discriminée du bruit dans l'image.

La détection des feux stop a fonctionné dans les scénarios pour lesquels le véhicule suivi se trouvait suffisamment proche du nôtre. La couleur rouge du véhicule n'est pas un élément perturbateur, la détection ayant même été parfois plus aisée avec ce véhicule puisque sa couleur globalement plus sombre (l'autre véhicule utilisé était blanc) faisait ressortir plus facilement la luminosité des feux.

5.2.6 Résultats sur scénarios en données réelles

5.2.6.1 Arrivée sur véhicules tournant

La principale difficulté dans ce cas consiste à détecter les intentions du conducteur du véhicule nous précédant. En effet les autres paramètres tels que la distance à l'intersection ou notre propre dynamique sont assez facilement accessibles. Dans de bonnes conditions de traitement, le scénario se déroule comme décrit par les images ci-dessous :

1. la distance à la prochaine intersection est connue et le véhicule devant nous est détecté, mais tous les critères de sécurité sont respectés et la situation est donc sûre.
2. Au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'intersection, les critères de décélération ne sont plus nécessairement respectés. Cependant comme le véhicule nous précédant ne manifeste aucune intention de tourner, il est encore impossible de déterminer de façon certaine la présence d'un risque.
3. Le conducteur actionne son clignotant pour la première fois. Comme notre algorithme reconnaît un clignotant sur sa durée d'activation, ce clignotant n'est pas encore identifié comme tel, mais cette zone a été isolée, datée et est suivie dans les images suivante.
4. Lorsque le clignotant s'éteint pour la première fois, l'algorithme l'identifie comme un signe que le conducteur du véhicule a l'intention de tourner. Comme le critère de vitesse n'est toujours pas respecté, le système passe en état d'alerte.
5. En complément de la détection du clignotant (ou comme alternative), la détection des feux stop actionnés aboutit à la même conclusion.

5.2.6.2 Arrivée sur véhicules en latéral

1. arrivée sur intersection : le véhicule à l'arrêt sur l'intersection n'est pas encore détecté.
2. Détection du véhicule sur l'intersection : si le temps d'arrivée de notre propre véhicule est plus court que la durée estimée d'une manœuvre sur l'intersection, le système passe en état de doute. Mais le véhicule n'ayant marqué aucune intention de s'engager sur l'intersection, la situation de danger n'est pas encore validée.
3. voir 2.
4. le véhicule s'engage sur la voie : le système passe en état d'alerte.

5.3 Synthèse et perspectives sur la mise en application de nos algorithmes

Les critères retenus pour estimer le risque au cours de la conduite semblent donc donner des résultats cohérents, ce qui concorde avec le côté intuitif de ces critères. On observera cependant que la mise en application de ces critères dans des conditions réelles d'application nécessitent d'effectuer de nombreux traitements d'analyse de données dont les résultats finaux dépendront directement.
Dans le cadre de cette thèse ainsi que dans celui du projet PARINA (Prévention Anticipée des Risques par la Navigation) effectué en partenariat avec le constructeur Renault, nous avons donc mis en place des traitements complets pour une approche simple du problème. En considérant des scénarios très structurés tels que «arrivée sur véhicule s'apprêtant à tourner », « arrivée trop rapide sur virage » et « arrivée sur véhicule de profil arrêté à une intersection », nous avons pu mettre au point les différents algorithmes de traitement nécessaires à l'extraction des données accidentogènes. Le raisonnement haut niveau estimant le risque dans ces situations est alors simple, ne présentant que trois états de sortie, mais est simple à interpréter.
En contrepartie, l'approche plus complète des pertes de contrôle à l'intérieur de virages ou d'estimation de risques de collisions dans le cas général nous fournit une information bien plus riche, intégrant à la fois une notion d'intensité et d'urgence du risque. Cependant cette information est plus difficilement interprétable telle quelle par un opérateur humain.

Une évolution logique de ces travaux serait dans un premier temps d'améliorer localement les différents traitements de données indépendants, tels que détection de véhicules, détection de feux et clignotants etc. L'architecture très modulaire de nos traitements, ainsi que celle de l'environnement de prototypage RT-maps, rendent ces améliorations indépendantes de l'approche générale d'estimation de risques.
Les critères de risque pourront eux être affinés en intégrant une représentation plus fidèle du comportement du conducteur. Dans la modélisation des positions possibles des véhicules, il serait ainsi souhaitable de substituer aux hypothèses de trajectoires en arc de cercle des trajectoires standards observées chez les conducteurs réels. De même pour le problème de sortie en virage, il serait préférable de considérer une stratégie de braquage

correspondant à un comportement observé, plutôt que de considérer uniquement un braquage des roues de vitesse maximale.

Enfin on pourra envisager une approche plus générale du critère de sortie en virage, en prenant en considération des manœuvres plus complexes. En effet nous nous sommes limités pour l'instant au cas de sortie de route par sous-virage, en considérant qu'une trajectoire de rattrapage par fort braquage serait une correction admissible. Or dans de nombreux scénarios d'accidents, le conducteur perd le contrôle de son véhicule après cette première correction, en raison d'oscillations de sa trajectoire dues à son action désordonnée sur le volant. En effet dans le modèle que nous avons adopté, la trajectoire de correction se termine par un cercle de courbure maximale. Or si cette section permet effectivement de corriger la position et le cap du véhicule, elle n'en corrige pas la courbure qui doit encore être corrigée dans une seconde phase.
La modélisation de Dubins pourrait dans ce cas nous permettre de définir une trajectoire de consigne dont la section finale ne serait plus un cercle de courbure maximale, mais une clothoïde de courbure décroissante de façon à ce que le véhicule corrige à la fois son cap et la courbure de sa trajectoire. Une telle configuration supprimerait ainsi les risques d'oscillations de trajectoires ; cependant cette trajectoire idéale ne peut plus être considérée comme le cas limite acceptable, et serait donc plus adaptée à des applications de consignes, voire de contrôle automatique, plutôt que d'estimation de risques.

Conclusion

Afin de réduire drastiquement les accidents de la route, il est nécessaire de concevoir de nouveaux systèmes d'aide à la conduite capable à la fois d'accroître les capacités intrinsèques des véhicules mais aussi d'offrir des moyens de prévention des risques. A l'heure actuelle, peu de systèmes embarqués sont employés afin d'aider les conducteurs à prévenir les risques d'accidents et ces systèmes agissent pour des risques immédiats. Parmi ces systèmes, nous trouvons les régulateurs de vitesse ou encore les systèmes ABS. Mais comme nous l'avons vu au cours de cette étude, il est nécessaire d'anticiper des risques lointains ou potentiels si nous voulons éviter de tomber dans des situations accidentogènes. Or, nous avons vu qu'une situation à risque implique de nombreux paramètres et facteurs d'origines hétérogènes provenant ou causés de l'un des trois acteurs clés de la conduite: l'infrastructure, le véhicule et le conducteur. Etant très difficile de modifier le comportement et les capacités de tout conducteur et de modifier ses habitudes et réflexes pendant la conduite, il est donc nécessaire d'imaginer un moyen d'étendre sa perception et de renforcer et fiabiliser sa prise de décision pendant la conduite. Pour mener à bien cette tâche, il est nécessaire de procurer le conducteur de toutes les informations nécessaires sur son profile de conduite actuel et sur l'environnement proche ou à venir. Les capteurs embarqués utilisés jusqu'à présent permettaient la détection de cibles proches ou bien la route et ses marquages; d'autres capteurs internes retournent l'état du véhicule. Afin d'obtenir des informations complètes sur l'environnement, il est nécessaire de recueillir des données géométriques et sémantiques sur celui-ci. Or, ce type de base de données existe sous la forme de cartes de navigation. Jusqu'ici, ces cartes servaient comme outils "gadgets" permettant de renseigner le conducteur afin d'améliorer son confort: proposition d'itinéraires optimaux, recherche d'installations ou de lieux de divertissement, demande d'informations et réalisation de réservation, … Dans ce projet, nous avons voulu exploiter ce type de bases de données spécialisées afin de fournir au conducteur le maximum d'informations sur l'environnement. Nous avons aussi conçu un système informatique capable de recueillir et de traiter des données multicapteur. La sortie d'un tel système est un indice ou notification d'un risque d'accident imminent ainsi que le type de ce risque.

Le chemin que nous avons emprunté pour modéliser cette notion de risque repose essentiellement sur l'évolution dynamique de l'état du véhicule au cours de son approche d'une infrastructure "à risque". Un accent particulier a été porté sur l'anticipation, cela afin de disposer d'une évaluation de la scène suffisamment tôt avant le risque réel d'accident et que cette information soit effectivement exploitable, soit par retour de signalisation vers le conducteur, soit par l'activation de dispositifs de sécurité.

En raison de la nouveauté de ce sujet par rapport aux travaux habituellement effectués au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines, l'approche proposée est encore très générale et fonctionne actuellement avec des traitements relativement simples. L'intérêt du projet repose en effet davantage sur l'articulation générale des différents traitements entre eux, plutôt que sur la mise au point de traitement individuels performants. Cependant il est tout à fait possible de substituer aux traitements simples utilisés ici d'autres traitements plus poussés et plus performants, notamment pour ce qui est de la localisation sur carte numérique, ou de la détection de véhicules.
Une autre évolution de ce dispositif pourrait viser à inclure le conducteur dans la boucle de traitement. On a en effet constaté dans les études accidentologiques que de nombreux facteurs accidentogènes proviennent du conducteur même, et il pourrait être utile de les

détecter à son niveau afin d'affiner l'estimation de la dangerosité d'une situation. Mais le conducteur peut également intervenir au niveau de la sortie du système, dans la mesure où les conclusions du dispositif d'évaluation de danger peuvent lui être soumises par le biais d'une interface homme-machine appropriée, et donc influer directement sur un changement de dynamique du véhicule. Le projet "cindynomètre", en cours de développement dans au Centre de Robotique, constitue une exploration plus poussée dans cette direction : en intégrant les cindyniques, ou sciences du danger, dans la considération générale de la tâche de conduite, il est envisagé d'avoir une approche beaucoup plus globale de la notion de risque et d'accident, afin d'obtenir un modèle complet des interactions entre le conducteur, le véhicule et l'infrastructure.

Bibliographie

[Barron 87] J.L. Barron, S.S. Beauchemin, *the computation of optical flow*, University of Western Ontario, Ontario (Canada), 1987.

[Barron 94] J.L. Barron, D.J. Fleet, S.S. Beauchemin, *Performance in Optical Flow Techniques*, International Journal of Computer Vision, 1994

[Beauvais98] Beauvais M., Lakshmanan S., *CLARK : A Heterogeneous Sensor Fusion Method for Finding Lanes and Obstacles*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium1998, IV 1998, Stuttgart, Germany, October 28-30, 1998.

[Bensrhair01] A. Bensrhair, M. Bertozzi, A. Broggi, P. Miché, S. Mousset, G. Toulminet – *"A cooperative approach to vision-based vehicle detection"*, ITSC aa, 2001.

[Bernstein 98] Bernstein D, Kornhauser A*, Map Matching for personal navigation assistant*, 77th Annual Meeting, the transport research board, jan 11-15, Washington DC, 1998

[Berthelon 92] C. Berthelon, D. Mestre, R. Taramino, *Anticipation d'une collision au cours d'un déplacement curviligne : niveau d'expertise et traitement de l'information visuelle*, INRETS, novembre 1992.

[Bertozzi98] M. Bertozzi, A. Broggi - *"GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection"*, IEEE Transaction on image processing, Vol. 7, N°1, January 1998.

[Bertozzi 00] M. Bertozzi, A.Broggi, A.Fascioli, S. Nichele, Università di Parma*, Stereo Vision Based Vehicle Detection*, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2000

[Bétaille 00] Bétaille D., Bonnifait Ph, *Road Maintenance Vehicles Location using DGPS, map-matching and dead-reckoning : experimental results of a smoothed EKF*. IAIN World Congressin association with the US ION annual meeting, San Diego pp 409-416, june 2000

[Betke 98] M. Betke, H. Nguyen, *Highway Scene Analysis from a Moving Vehicle under Reduced Visibility Conditions*, Boston College, Chestnut Hill (USA), 1998.

[Betke 96] M.Betke, E. Haritaoglu, L.S. Davis. *Multiple Vehicle Detection and Tracking in Hard Real Time*. Institute for Advanced Computer Studies, University of Maryland,USA , 1996

[Brenac 94] T. Brenac, *Accidents en carrefour sur routes nationales : modélisation du nombre d'accidents prédictible sur un carrefour et exemples d'applications*, INRETS, août 1994.

[Broggi00a] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C. G. L. Bianco, and A. Piazzi. *Visual perception of obstacles and vehicles for platonning*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1(3):164--176, 2000.

[Burie96] J.-C. Burie, J.-G. Postaire – *"Enhancement of the road safety with a stereovision system based on linear cameras",* IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Tokyo, Japan, September 19-20, 1996.

[Coulom 02] R. Coulom, *Apprentissage par renforcement utilisant des réseaux de neurones, avec des applications au contrôle moteur*, INPG, Grenoble, juin 2002

[Dailey 96] D. Dailey, P. Harn, P-J. Lin, *ITS Data Fusion*, Washington State Transportation Center, University of Washington, Seattle 1996.

[Damville 99] A. Damville, C. Mautuit, T. Perron, C. Thomas*, Défaillance des conducteurs en fonction de l'infrastructure routière au travers des Etudes Détaillées d'Accidents*, Assises Européennes de Psychologie Appliquée aux Transports, juin 1999

[Dickmanns 92] E.D. Dickmanns, B.D. Myslieweiz, *Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition*, in *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, n.2, pp. 199-213.

[Dickmanns 94] F. Thomanek, E. D. Dickmanns, and D. Dickmanns, "Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance," in *Procs. IEEE Intelligent Vehicles Symposium'94*, (Paris), pp. 231–236, Oct. 1994.

[Dietmayer01] Dietmayer K., Sparbert J., Streller D., *Model Based Object Classification and Object Tracking in Traffic Scenes from Range Images*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, IV 2001, National Institute of Informatics, Tokyo, Japon, Juin 3-6, 2001.

[Dubins 57] Dubins L.E., *On curves of minimal length with a constraints with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents*, American Journal of Mathematics, Vol 79, pp 497-516, 1957

[Ellouze 96] M. Ellouze, *Détection des obstacles par vision*, ENSMP, Paris, 1996

[El Najjar 01] Maan E. El Najjar, Philippe Bonnifait, *Sélection de segments sur un réseau routier pour la localisation d'une automobile*, Université Technologique de Compiègne

[Elslande 97] P. Van Elslande, L. Alberton, C. Nachtergaele, G. Blanchet, *Scénarios-types de production de "l'erreur humaine" dans l'accident de la route : problématique et analyse qualitative*, INRETS, juin 1997

[Fang01] Fang Y., Masaki I., Horn B., *Distance Range Based Segmentation in Intelligent Transportation Systems : Fusion of Radar and binocular Stereo*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, IV2001, National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, June 3-6, 2001.

[Fleury 88] D. Fleury, F. Fernandez, C. Lepesant, D. Lechner, *Analyse typologique des manoeuvres d'urgence en intersection*, INRETS, mars 1988.

[Fleury 93] S. Fleury, P. Souères, J.-P. Laumond, R. Chatila, *Primitives for smoothing paths of mobile robots*, In Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, volume 1, pages 832-839, Atlanta, GA (US), Mai 1993

[Fleury 98] D. Fleury, M.C. Montel, A. Grenier, C. Dionisio, D. Martini, *Gestion de la ville et sécurité routière en France : Pratiques et perspectives*, INRETS, Juin 1998

[Fontaine 94] H. Fontaine, Y. Gourlet, *Sécurité des véhicules et de leurs conducteurs,* INRETS, février 1994.

[Fraichard 91] T. Fraichard, C. Laugier, *Smooth trajectory planning for a car-like vehicle in a structured world*, INRIA Rhônes-Alpes, 1991

[Franke00] U. Franke, A. Joos – *"Real-time stereo vision for urban traffic scene understanding",* IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Dearborn, USA, October 3-5, 2000.

[Gaudry 00] M. Gaudry, K. Vernier, *Effets du tracé et de l'état des routes sur la vitesse et la sécurité*, INRETS, mars 2000

[Hancock99] Hancock John A., *Laser Intensity-Based Obstacle Detection and Tracking*, Thèse de Carnegie Mellon university, The Robotics Institute, Pittsburg, Pennsylvania, January 1999.

[Hariyama00] M. Hariyama, T. Takeuchi, M. Kameyama – *« Reliable stero matching for highly-safe intelligent vehicles and its VLSI implementation »,* IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Dearborn, USA, October 3-5, 2000.

[Hough 62] P. V. C. Hough, *Methods and means for recognizing complex patterns*, U.S. Patent 3 069 654, Dec 1962.

[IGN 99] *Transformation entre systèmes géodésiques*, IGN, 1999

[Ishikawa] N. Ishikawa, K. Fujinami, K. Sasaki, T. Otsuka – *"In-vehicle rear collision warning system using sensor fusion"*, ?

[Jouannin99] Jouannin S., *Association et fusion de données : application au suivi et à la localisation d'obstacles par radar à bord d'un véhicule routier intelligent*, Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 1999.

[Kalinke98] T. Kalinke, C. Tzomakas, and W. v. Seelen. *A texture-based object detection and an adaptive model-based Classification*, In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, volume 1, pages 143--148, Stuttgart, Germany, October 1998.

[Kanade 87] T. Kanade, 3D Vision for an Autonomous Vehicle, in *Proceeding of international workshop on industrial applications of machine vision and machine intelligence*, 1987.

[Kato01] Kato T., Ninomiya Y., Masaki I., *An Obstacle Detection Method by Fusion of Radar and Motion Stereo*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, IV 2001, National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, June 3-6, 2001.

[Kirchner00] Kirchner A., Ameling C., *Integrated Obstacle and Road Tracking using a Laser Scanner*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, IV 2000, Dearborn,USA, Octobre 3-5, 2000.

[Kim 96] Kim J.S., Lee, J.H., Kang, T.H., Lee, W.Y. and Kim Y.G*., Node based map matching algorithm for car navigation system*. Proceedings of the 29th ISATA Symposium, Florence, Vol 10, pp 121-126, 1996

[Knoeppel00] C. Knoeppel, A. Schanz, B. Michaelis, *"Robust vehicle detection at large distance using low resolution camera",* IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Dearborn, USA, October 3-5, 2000.

[Koller94] D. Koller, T. Luong, J. Malik – *« Binocular stereopsis and lane marker flow for vehicle navigation: lateral and longitudinal control »,* Technical report UCB/CSD-94-804, March 1994.

[Kuroda98] Kuroda H., Kuragaki S., Minowa T., Nakamura K., An Adaptive Cruise Control System Using A Millimeter Wave Radar, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 1998, IV 1998, Stuttgart, Germany, October 28-30, 1998.

[Labayrade02] R. Labayrade, D. Aubert, J.P. Tarel, *« Real time obstacle detection in stereo vision on non flat road geometry through V-disparity representation »,* IV2002, juin 2002.

[Langer97]Langer D., An Integrated MMW Radar System for Outdoor Navigation, Thèse de Carnegie Mellon university, The Robotics Institute, Pittsburg, Pennsylvania, 1997.

[Laumond 98] Laumond J.-P., *Nonholonomic motion planning for mobile robots*, LAAS Report 98211, 1998

[Lechner 86] D. Lechner, G. Malaterre, D. Fleury, *La reconstitution cinématique des accidents*, INRETS, décembre 1986.

[Lee99] B.C. Lee, *A Study on the Correction of Positioning Accuracy of Car Navigation System and Map-matching algorithm*, Cadland Technical Report, Seoul, 1999.

[Marola 89] G. Marola*, Using Symmetry for Detecting and Locating Objects in a Picture*, *Computer Vision Graphics and Image Processing*, vol. 46, pp. 179–195, Mai 1989.

[Michel 99] J-E Michel, *Accidents en virage, rapport interne LAB CEESAR* INRETS, avril 1999

[Mizzi 91] J.-P. Mizzi, *Reconstitution de la cinématique spatiale d'un véhicule lors d'un essai de choc*, INRETS, novembre 1991.

[Nagy 01] Nagy,B.and Kelly,A.*,Trajectory Generation for Car-Like Robots Using Cubic Curvature Polynomials*,in 'Field and Service Robots 2001 ', 2001

[Nelson 89] Nelson,W.,*Continuous curvature paths for autonmous vehicles*,in 'IEEE Int. Conf.on Robotics and Automation ',Vol.3,pp.1260 –1264, 1989

[Nguyen93] H.G. Nguyen, O. Chararas, F. Pabot - *"Obstacle recognition and tracking algorithms: implementation onboard the vehicle and experiments",* Congreso Mondial IRF, Madrid, 1993.

[NHTSA00] J. Pierowicz, E. Jocoy, M. Lloyd, A. Bittner, B. Pirson, *Intersection Collision avoidance using ITS countermeasures, Final Report : Performance Guidelines*, National Highway Traffic Security Administration, US Department of Transportation, 2000.

[NHTSA99] D. Pomerleau, T. Jochem, C. Thorpe, P. Batavia, D. Pape, J. Hadden, N. Mac Millan, N. Brown, J. Everson, *Run-off-road Collision Avoidance using IVHS Countermeasures*, National Highway Traffic Security Administration, US Department of Transportation, 1999.

[Nishigaki00] M. Nishigaki, M. Saka, T. Aoki, H. Yuhara, M. Kawai – *« Fail output algorithm of vision sensing »,* IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Dearborn, USA, October 3-5, 2000.

[Pace 95] S. Pace, *The global positioning system, assessing national policies*, RAND, 1995 (http://www.rand.org/publications/MR/MR614/).

[Parent01] Parent M., Crisostomo M., *Collision Avoidance for Automated Urban Vehicles*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, IV 2001, National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, June 3-6, 2001.

[Pyeatt 98] L. Pyeatt, A. Howe, *Decision Tree Function Approximation in reinforcement Learning*, Texas Tech University Lubbock, Texas, 1998

[Ramet 87] M. Ramet, G. Vallet, *Typologie des accidents du trafic routier à partir de 5459 dossiers*, INRETS, août 1987.

[Reeds 90] Reeds,J.and Shepp,L*., Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards* ,Paci .c Journal of Mathematics 145 ,367 –393, 1990

[Revue 00] A. Revue, *Détection et suivi de véhicules par vision monoculaire*, Journées jeunes chercheurs en Robotique, Février 2000, Bourges

[Revue 02] A. Revue, F. Nashashibi, C. Laurgeau, *Multisensor Danger Assessment : Case of a Crossroad Approach*, IV2002, Versailles, France, 2002.

[Ruichek00] Y. Ruichek, H. Issa, J.-G. Postaire – *"Genetic approach for obstacle detection using linear stereo vision",* IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Dearborn, USA, October 3-5, 2000.

[Scheuer 96] A. Scheuer, T. Fraichard,*Planning continuous-curvature paths for car-like robots*, INRIA Rhônes-Alpes, 1996

[Setra 01] *Typologies d'accidents en intersections sur routes interurbaines*, SETRA, janvier 2001

[Setra 92] *Sécurité des routes et des rues*, SETRA, 1992

[Setra 99] *Accidents par sortie de chaussée*, rapport d'étude SETRA, 1999

[Shimomura01] Shimomura N., Fujimoto K., Oki T., Muro H., *An Algorithm for Distinguishing the types of Objects on the Road Using Laser Radar and Vision*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, IV 2001, National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, June 3-6, 2001.

[Shin 99] M.C. Shin, D. Goldgof, K.W. Bowyer, University of South Florida, *Comparison of Edge Detectors using an Object Recognition Task*, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 1999

[Steux 01] B. Steux, rtMaps, *A software framework for prototyping real-time embedded systems, application to the automatic detection of vehicles by Radar and Vision data fusion*, PhD thesis, ENSMP, 2001

[Stiller98] Stiller C., Hipp J., Rössig C., Ewald A., *Multisensor Obstacle Detection and Tracking*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 1998, IV 1998, Stuttgart, Germany, October 28-30, 1998.

[Takahashi 89] Takahashi,A.,Hongo,T.and Ninomiya,Y., *Local path planning and control for AGV in positioning*, in 'IEEE Int.Conf.Intelligent Robots and Systems ', pp.392 –395., 1989

[Tanzi 98] T. Tanzi, *Système spatial temps réel d'aide à la décision, application aux risques autoroutiers*, INSA Lyon, 1998

[Taylor 00] Taylor G., Blewitt Geoffrey, *Road Reduction Filtering using GPS, 3th AGILE Conference on Geographic Information Science*, Helsinki, Finland, May 25-27, 2000

[Terakubo98] Terakubo S., Morii M., Kashihara T., *Development of a Road Obstacle Sensor Combining ImageProcessing and a Laser Radar* , Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 1998, IV1998, Stuttgart, Germany, October 28-30, 1998.

[Timin 95] Mitchell E. Timin. *The robot auto racing simulator*, 1995 http://rars.sourceforge.net/.

[Tsai 87] Tsai, *A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses*, IEEE Journal of Robotics and Automation, volume 3, N°4, pages 323-344, 1987.

[Vogt 98] A. Vogt, J.G. Bared, *Accident models for two-lane rural roads : segments and intersections*, Tuner Fairbank Highway Research Center, Georgetown, 1998

[Yerpez 92] J. Yerpez, F. Fernandez, J. Michel, C.Nachtergaele, *Accidentologie des routes départementales : insécurité et aménagement*, INRETS, septembre 1992

[Yerpez 98] Yerpez, Fernandez, *Caractéristiques routières et sécurité : reconnaissance de la contribution des facteurs route dans la genèse des accidents*, INRETS, 1998

[Zhao 97] Zhao Yilin, *Intelligent Transportation Systems : Vehicle Location and Navigation Systems*. By Artech House, April 1997, ISBN 0-89006-861-5

[Zielke92] T. Zielke, M. Brauckmann, and W. von Seelen. *Intensity and edgebased symmetry detection applied to carfollowing*, 1992.

[Zifeng 98] Zifeng, Odetics Inc*, A Shadow Rejection Algorithm for Vehicle Presence Detection*, IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, 1998

Annexes

ANNEXE A

Calibrage de la caméra

Dans ce qui suit, nous allons exposer brièvement les 5 étapes de calibrage de la caméra. Cette annexe complète la partie du rapport dédié à la description du calibrage; cependant, nous ne nous intéresserons dans cette annexe qu'aux côtés algorithmiques et théoriques.

A1. Extraction des indices dans la mire

Les traitements d'images nécessaires à l'extraction des indices utilisés ne seront pas expliqués en détail. Ce sont des algorithmes classiques fréquemment employés en vision par ordinateur. Nous nous contenterons donc de donner le principe de chacun ainsi que leur enchaînement. Les informations que nous allons extraire sont les coins des carrés de la mire apparaissant dans l'image. Ces coins seront obtenus en calculant les intersections des droites extraites dans l'image plutôt que d'utiliser un détecteur de coins classique. La mesure qu'on en fera sera donc très stable et précise.

La mire présente des carrés noirs sur fond blanc. La première opération consiste donc à supprimer de l'image l'information colorimétrique en la transformant en image d'intensité, puis en image binaire. Ce traitement permet de réduire la quantité de données à traiter et de faire ressortir l'information pertinente en supprimant les données superflues. L'algorithme utilisé attribue à chaque pixel une valeur d'intensité correspondant à la moyenne des trois composantes de couleur contenues dans l'image initiale.

Cette image d'intensité est ensuite transformée en image binaire par seuillage global adaptatif. La valeur du seuil utilisé est obtenue en faisant l'hypothèse que l'image analysée est intrinsèquement bimodale, c'est à dire uniquement composée d'un fond et d'une forme (ce qui est le cas d'une grande partie de notre image, occupée par la mire).

Il existe de nombreux algorithmes de détermination automatique d'un seuil global permettant de "binariser" une image de niveaux de gris. Les plus répandus s'appuient sur une étude, plus ou moins complexe, de l'histogramme de l'image initiale (nombre de pixels pour chaque niveau de gris). Si l'image est bimodale, l'histogramme doit présenter deux pôles distincts répartis autour des deux valeurs moyennes des niveaux de gris correspondant au fond et à la forme. Le seuil optimal est alors le niveau de gris permettant de séparer au mieux ces deux composantes de l'image, c'est-à-dire le seuil minimisant le nombre de pixels assignés à la mauvaise catégorie.

On utilise ici l'algorithme de Ridler et Trussel que les auteurs utilisent en première étape d'une méthode itérative plus performante mais plus complexe.

L'algorithme complet a été implémenté, mais seule la première étape est utilisée (Figure 83). En effet, étant donné la nature des images à seuiller (principalement noir et blanc), la deuxième étape, relativement coûteuse, n'améliorait pas de manière significative les résultats obtenus.

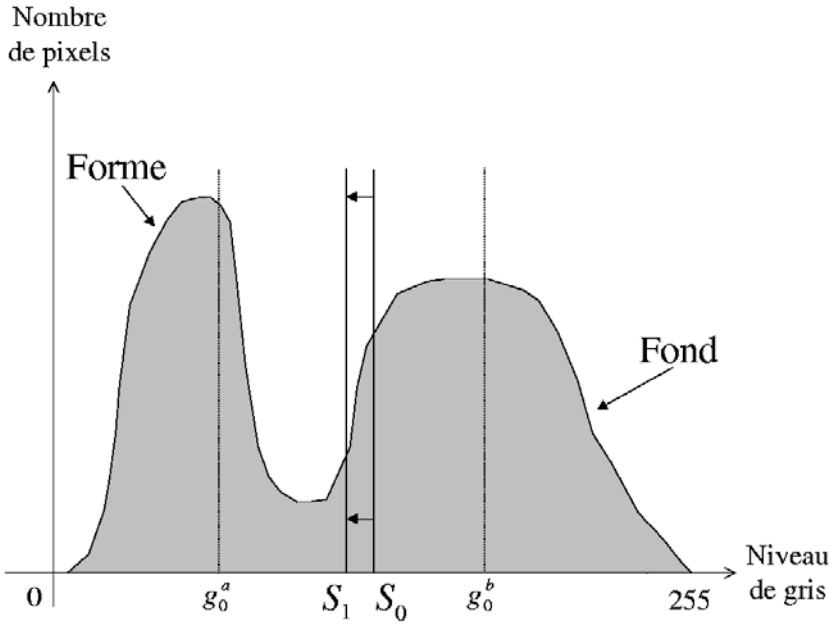


Figure 83 : Seuillage d'une image bimodale

Au départ, on choisit arbitrairement un seuil s_i pour diviser l'histogramme en deux (par exemple le milieu de l'intervalle des niveaux de gris). On calcule alors le niveau de gris moyen de chacune des deux parties, que l'on notera g^a_i et g^b_i. La moyenne entre ces deux valeurs $(g^a_i + g^b_i)/2$ sera ensuite utilisée comme seuil de séparation de l'histogramme pour l'itération suivante (s_{i+1}). On réitère ce processus jusqu'à ce qu'une solution stable soit obtenue. Cette valeur constitue alors le seuil retenu. Pour information, le principe du reste de la méthode est de rechercher une valeur de niveau de gris minimisant le recouvrement de deux distributions normales approximant les "sous-histogrammes" qui apparaissent de part et d'autre du seuil actuel. Ceci est aussi répété jusqu'à stabilisation.

L'image binaire obtenue va être utilisée pour rechercher les composantes connexes noires susceptibles de correspondre aux carrés de la mire. Un algorithme classique d'étiquetage permet de séparer ces composantes connexes dans l'image binaire. Son principe est de parcourir l'image une première fois pour attribuer aux pixels noirs directement connexes (du point de vu du parcours) un label particulier. Au cours du parcours, il peut arriver que deux régions de pixels connexes de labels différents s'avèrent, finalement, appartenir à la même composante connexe. Dans ce cas, on garde simplement une trace des différents labels correspondants à une même composante connexe. A la fin du parcours, on attribue alors à chaque groupe de labels (associés à une même composante connexe) une étiquette définitive. Il ne reste plus qu'à effectuer un deuxième passage pour remplacer chaque numéro de label par le numéro d'étiquette qui lui correspond.

A2. Le repérage de ces indices et leur positionnement

On calcule ensuite la position de tous les coins des carrés par intersection des segments issus de la segmentation de l'image binaire.

Pour finir, il faut être capable d'associer à chaque coin trouvé, le carré correspondant dans la mire. La détection du placement, dans la mire, de chaque disque extrait est automatisée. Elle se base sur la connaissance des positions relatives des carrés les uns par rapport aux autres de et sur l'hypothèse que les lignes joignant les coins détectés de la mire présentent un angle inférieur à 45° par rapport à la caméra. Sur la base d'une hypothèse d'alignement et d'espacement régulier pour les coins des carrés, il est facile d'identifier ceux qui correspondent effectivement à un carré de la mire et quelles sont leurs positions relatives par rapport au "coin de référence"; les autres seront rejetés. Ceci, constitue donc une dernière discrimination des composantes connexes indésirables. Les sommets retenus sont donc finalement associés à une position spatiale connue (celle d'un coin du carré correspondant sur la mire, que l'on vient d'identifier).

A3. Mise en correspondance de ces indices avec les amers 3D réels

En fin de cette phase complètement automatisée (mis à part les placements de la mire à différentes positions sur le banc de calibrage), on dispose donc d'un ensemble de correspondances C_i, chacune associant une position spatiale à un point extrait de l'image. La détermination des paramètres de la caméra sera basée sur cet ensemble de correspondances.

A4. L'estimation des paramètres de calibrage

A4.1 Détermination des paramètres extrinsèques (sauf T_Z)

Dans cette première phase de l'algorithme, nous allons déterminer les paramètres extrinsèques de la caméra sauf T_Z, c'est-à-dire ($\psi,\varphi,\theta,T_X,T_Y$), en supposant les autres fixes. C'est la raison pour laquelle la méthode nécessite la donnée de valeurs initiales approximatives pour f, X^{opt}_{ima} et Y^{opt}_{ima}. Ces deux dernières seront simplement initialisées aux demies résolutions de l'image, en largeur et en hauteur respectivement. La détermination des paramètres extrinsèques va être réalisée en utilisant une relation issue du théorème de Thalès, établie pour les triangles semblables représentés dans la Figure 84.

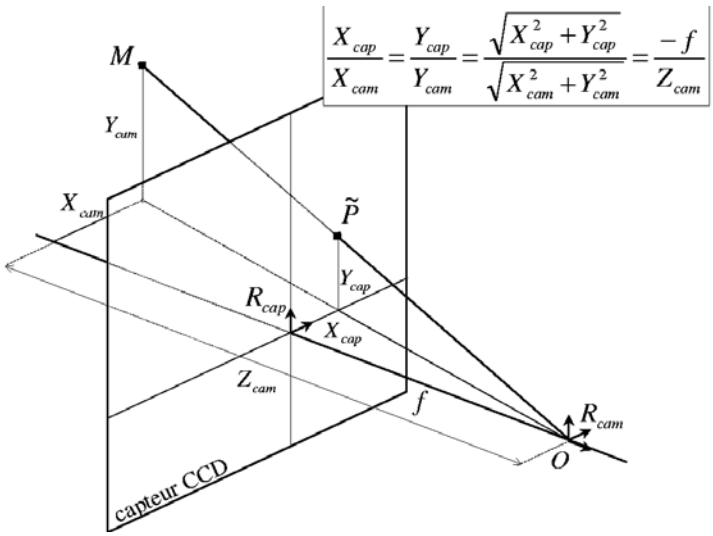


Figure 84 : Relation entre les coordonnées réelles et les coordonnées projectives.

Cette relation doit être vérifiée par le modèle de caméra que l'on cherche à établir, et cela pour chaque correspondance entre un point réel (centre de disque de la mire) et son image. Pour une telle correspondance : $C_i=\{(X^i_{abs},Y^i_{abs},Z^i_{abs}),(X^i_{ima},Y^i_{ima})\}$, la relation s'écrit :

$$\frac{X^i{}_{cap}}{X^i{}_{cam}} = \frac{Y^i{}_{cap}}{Y^i{}_{cam}}$$

ou de manière équivalente : $F^i_{ext} = X^i_{cap}.Y^i_{cam} - Y^i_{cap}.X^i_{cam}$

Afin de trouver les paramètres du modèle qui seront capables de vérifier au mieux l'ensemble de ces équations, nous définissons une fonction de mérite χ^2 qui est la somme quadratique des F^i_{ext}. Nous allons donc minimiser, au sens des moindres carrés, l'ensemble de ces différences. La fonction χ^2est non linéaire dans les paramètres sur lesquels nous cherchons à la minimiser. Nous n'allons pas détailler la méthode d'optimisation utilisée; cependant, pour la mettre en œuvre, il est nécessaire de connaître la valeur des F^i_{ext} ainsi que leurs dérivées partielles par rapport aux paramètres considérés, et cela pour chaque configuration de paramètres.

En partant d'un sommet de carré extrait de l'image (X^i_{ima},Y^i_{ima}), nous pouvons remonter à ses coordonnées dans R_{cap} puis calculer les coordonnées de son correspondant "non distordu" (X^i_{cap},Y^i_{cap}) en utilisant les relations établies dans le paragraphe 1.2.3.

A4.2 Détermination des paramètres intrinsèques (plus T_Z)

Une fois que les paramètres extrinsèques (sauf T_Z) ont été estimés par minimisation de la somme quadratique des F^i_{ext}, nous pouvons procéder à la détermination des paramètres restants du modèle de la caméra. Il s'agit donc des

paramètres T_Z, f, X^{opt}_{ima}, Y^{opt}_{ima}, dyx et k, les autres paramètres étant considérés fixes. Selon le même principe que pour la première étape, nous allons utiliser une autre relation issue des propriétés des triangles semblables (cf. Figure 84) :

$$\frac{\sqrt{(X^i{}_{cap})^2 + (Y^i{}_{cap})^2}}{\sqrt{(X^i{}_{cam})^2 + (Y^i{}_{cam})^2}} = \frac{-f}{Z^i{}_{cam}}$$

Cette équation, qui fait intervenir les paramètres en question, doit être vérifiée pour toutes les correspondances C_i. On peut donc la réécrire, autant de fois que l'on a détecté de sommets de carrés au cours des acquisitions, de la façon suivante :

$$F^i{}_{\text{int}} = f.\sqrt{(X^i{}_{cam})^2 + (Y^i{}_{cam})^2} + Z^i{}_{cam}.\sqrt{(X^i{}_{cap})^2 + (Y^i{}_{cap})^2} = 0$$

En utilisant une fois de plus la même méthode d'optimisation, les paramètres optimaux, au sens des moindres carrés appliqués aux fonctions F^i_{int}, vont être recherchés.

A4.3 Bouclage sur les deux étapes

Les paramètres extrinsèques recherchés dans la première étape de l'algorithme ont été estimés en utilisant des valeurs approchées des paramètres intrinsèques. Pour cette raison, la précision obtenue n'est pas optimale. D'autre part, ces paramètres "mal" estimés sont utilisés par la suite dans la deuxième étape de l'algorithme et servent à leur tour à estimer les paramètres restants. Afin de contourner ce problème, la double minimisation décrite dans cette annexe est en fait exécutée en boucle. De cette façon, les paramètres servant de base aux calculs des paramètres complémentaires sont de plus en plus précis et la qualité du calibrage obtenue se stabilise très rapidement. En général, deux doubles minimisations sont suffisantes.

ANNEXE B

Système de coordonnées utilisés

Plusieurs problèmes se posent lorsque l'on souhaite positionner un objet de manière absolue sur le globe terrestre :

- la terre n'est pas réellement un volume de forme régulière. Elle est généralement assimilée à un ellipsoïde, mais suivant l'endroit du globe où l'on se trouve, certains modèles d'ellipsoïde sont localement plus justes que d'autres.
- dans la plupart des applications, le monde est localement représenté sous la forme d'une carte plane. Or la projection d'une surface courbe sur un plan peut se faire de différentes façons, et requiert donc une loi de conversion entre les coordonnées géodésiques absolues et les coordonnées planes dans ce système de représentation.

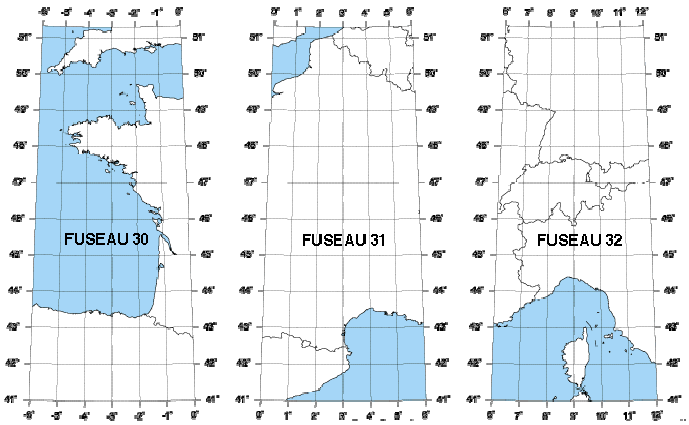
5.3.1 Le World Geodetic System (WGS 84)

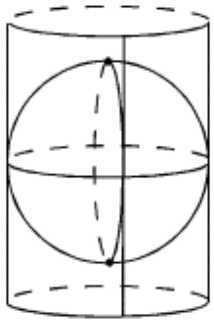
Comme son indice l'indique, le WGS 84 est un système de coordonnées mis au point par l'armée américaine en 1984, mais est lui-même l'évolution du WGS72 utilisé précédemment. Ce modèle modélise la surface de la planète sous la forme d'un ellipsoïde, référencé comme IAG-GRS80

Propriétés de l'ellipsoïde IAG-GRS80 :

Demi grand-axe a	6378137.0 m
Demi petit-axe b	6356752.314 m
Inverse de l'aplatissement 1/f	298.257222
Excentricité e	0.08181919106

La résolution standard des valeurs numériques dans ce système de coordonnées garantit une précision de l'ordre du mètre.





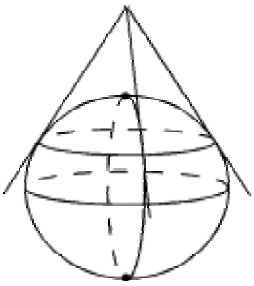
La projection plane associée est la projection UTM (Universal Transverse Mercator), qui est une projection de l'ellipsoïde sur un cylindre :

5.3.2 La Nouvelle Triangulation de la France (NTF)

Ce système de coordonnées plus localisé pour être utilisé en France utilise l'ellipsoïde Clarke 1880 IGN, dont les propriétés sont les suivantes :

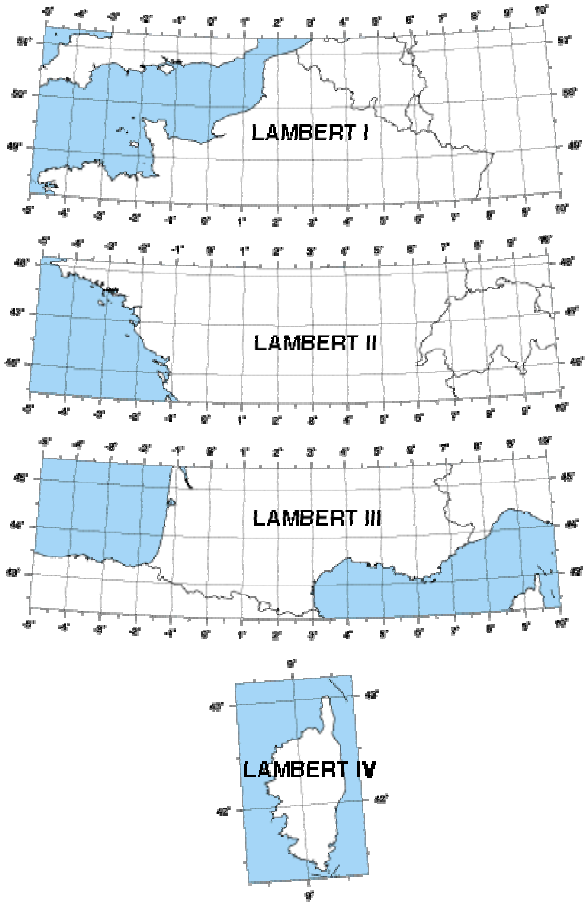
Demi grand-axe a	6378388.0 m
Demi petit-axe b	6356911.9461 m
Inverse de l'aplatissement 1/f	297.000000
Excentricité e	0.08199188998

La représentation plane associée est la projection Lambert, qui contrairement à l'UTM est une projection conique.



Pour plus de précision, la projection Lambert a délimité le territoire en différentes zones, afin de prendre pour chacune un cylindre de projection différent.

Zone Lambert	I	II	III	IV	II étendu
Zone d'application	53.5gr - 57gr	50.5gr - 53.5gr	47gr - 50.5gr	Corse	France entière
Latitude origine	55gr = 49°30´	52gr = 46°48´	49gr = 44°06´	46.85gr = 42°09´54"	52gr = 46°48´
Longitude origine	0gr Paris	0gr Paris	0gr Paris	0gr Paris	0gr Paris
Parallèles Automécoïques	48°35´54.682 " 50°23´45.282 "	45°53´56.108 " 47°41´45.652 "	43°11´57.449 " 44°59´45.938 "	41°33´37.396 " 42°46´03.588 "	45°53´56.108 " 47°41´45.652 "
X0 : False Easting	600 000 m	600 000 m	600 000 m	234.358 m	600 000 m
Y0 : False Northing	200 000 m	200 000 m	200 000 m	185 861.369 m	2 200 000 m



conversion de coordonnées géodésiques en coordonnées planes

Le positionnement GPS a pour particularité de fournir un positionnement absolu sur un ellipsoïde de référence représentant le globe terrestre. Or pour nos applications une position en longitude/latitude est peu exploitable, et l'on serait plus intéressé par un positionnement relatif en mètres.

La formule de conversion est la suivante :
Soient λ, ϕ les longitudes et latitudes initiales

$$\ell = \frac{1}{2}\ln\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} - \frac{e}{2}\ln\frac{1+e\sin\varphi}{1-e\sin\varphi}$$

$$R = C\exp(-n\ell)$$

$$\gamma = n(\lambda - \lambda_0)$$

$$X = X_S + R\sin\gamma$$

$$Y = Y_S - R\cos\gamma$$

Où
n, C, Xs , Ys sont des constantes de la projection
λ0 est la longitude du méridien central

e est l’excentricité de l'ellipsoïde

	LAMBERT I	LAMBERT II	LAMBERT III	LAMBERT IV	LAMBERT 93
N	0,7604059656	0,7289686274	0,6959127966	0,6712679322	0,7256077650
C	11603796,98	11745793,39	11947992,52	12136281,99	11754255,426
Xs	600000,000	600000,000	600000,000	234,358	700000,000
Ys	5657616,674	6199695,768	6791905,085	7239161,542	12655612,050

$\lambda 0$= 0 grades Paris (= 2° 20' 14,025" E Greenwich)
e = 0,08248325676