



HAL
open science

Assistance à la conduite en conditions atmosphériques dégradées par la prise en compte du risque routier

Romain Gallen

► **To cite this version:**

Romain Gallen. Assistance à la conduite en conditions atmosphériques dégradées par la prise en compte du risque routier. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2010. Français. NNT: . tel-00641797

HAL Id: tel-00641797

<https://theses.hal.science/tel-00641797>

Submitted on 16 Nov 2011

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.

**THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

spécialité :
Sciences Mécaniques, Acoustiques, Électronique et Robotique

présentée par

M. Romain GALLEN

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie

**ASSISTANCE À LA CONDUITE EN CONDITIONS
ATMOSPHÉRIQUES DÉGRADÉES PAR LA PRISE EN
COMPTE DU RISQUE ROUTIER**

Soutenue publiquement le 10 décembre 2010

devant le jury composé de :

<i>Rapporteurs :</i>	M. Jourlin	Prof. des universités - HDR (Université Jean-Monnet, Saint-Etienne)
	M. Mekhilef	M ^e de conférences - HDR (Université d'Orléans, Orléans)
<i>Examineurs :</i>	M. Devars	Prof. des universités - HDR (Université Pierre et Marie Curie, Paris)
	D. Aubert	Dir. de thèse - Dir. de recherche - HDR (LCPC/INRETS, Paris)
	N. Hautière	Encadrant - Chercheur (LCPC/INRETS, Paris)
	S. Glaser	Encadrant - Chercheur (LCPC/INRETS, Paris)
<i>Invités</i>	C. Robert	Directrice de projet - Valeo Vision, Bobigny
	A. Cord	Chercheur (LCPC/INRETS, Paris)

Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs (LCPC/INRETS)

Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations (LCPC/INRETS)

Mis en page avec la classe thloria.

Table des matières

- Introduction -

Chapitre 1 Accidentologie : constat, objectifs et moyens

1.1	Bilan d'accidentologie	6
1.1.1	Acteurs concernés et objectifs des analyses de risque	7
1.1.2	Sources de risques	8
1.1.3	Statistiques d'accidents et études portant sur le risque routier	10
1.1.4	Bilan des études portant sur le risque routier	23
1.2	Prévention des risques et aides à la conduite	24
1.2.1	Systèmes de gestion du risque	24
1.2.2	Systèmes de mitigation du risque	26
1.2.3	Systèmes d'anticipation du risque	28
1.2.4	Le projet DIVAS	29
1.3	Bilan sur l'accidentologie et le traitement des risques routiers	31

Chapitre 2 Adaptation de la vitesse au risque

2.1	Vitesse pratiquée et vitesse de référence	34
2.1.1	Vitesses observées, la V_{85}	35
2.1.2	Vitesse légale et vitesse de conception	37
2.1.3	Vitesses calculées d'après un modèle, la V_{SAVV}	41
2.2	Adaptation de la vitesse	42
2.2.1	Fonctionnement des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse	42
2.2.2	Adaptation de la vitesse en ligne droite	44
2.2.3	Adaptation de la vitesse en virage	49
2.2.4	Acceptabilité	50
2.2.5	Potentiel des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse	51
2.2.6	Bilan bibliographique et propositions	54
2.3	Méthode de calcul de la vitesse de conseil proposée	56
2.3.1	Utilisation d'une vitesse de référence à moduler	57

2.3.2	Modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure	58
2.3.3	Calcul du profil de vitesse en freinage d'urgence (<i>FU</i>)	59
2.3.4	Utilisation de statistiques de risque et de gravité	61
2.3.5	Estimation d'une exposition totale au risque	64
2.4	Bilan et perspectives	73

Chapitre 3 Visibilité routière

3.1	Les différentes composantes de la visibilité routière	76
3.2	Visibilité géométrique	77
3.2.1	Masquages de la route par son profil en long	77
3.2.2	Masquages de la route par le profil en plan de la route	78
3.2.3	Outils de diagnostic de la visibilité géométrique	80
3.2.4	Intégration de la visibilité géométrique	83
3.3	Visibilité photométrique	84
3.3.1	Contraste et visibilité	84
3.3.2	Outils de diagnostic de la visibilité photométrique	86
3.3.3	Calcul du profil de visibilité photométrique de nuit	88
3.3.4	Intégration de la visibilité photométrique	90
3.4	Visibilité atmosphérique	91
3.4.1	Définitions et standards	91
3.4.2	Effets de la pluie sur la visibilité	93
3.4.3	Effets du brouillard sur la visibilité	100
3.4.4	Visibilité photométrique en présence de brouillard nocturne	110
3.5	Synthèse	112

Chapitre 4 Estimation de la visibilité atmosphérique par caméra embarquée

4.1	Détection et caractérisation de la pluie	116
4.1.1	Outils de mesure de la pluie	116
4.1.2	Détection et caractérisation de la pluie par caméra	118
4.1.3	Visibilité routière et adhérence en présence de pluie	121
4.2	Détection et caractérisation du brouillard de jour	122
4.2.1	Matériels de mesure de la visibilité météorologique	122
4.2.2	Détection et caractérisation du brouillard diurne par caméra	124
4.3	Détection et caractérisation du brouillard de nuit par caméra	126
4.3.1	Problématiques liées aux méthodes utilisant des caméras embarquées	127
4.3.2	État de l'art de la détection de brouillard nocturne par caméra	128
4.3.3	Séquences vidéo de référence	133

4.3.4	Détection de halos autour des sources lumineuses	134
4.3.5	Détection embarquée du brouillard nocturne par les halos	142
4.3.6	Caractérisation embarquée du brouillard nocturne par les halos	158
4.3.7	Détection embarquée du brouillard nocturne par la rétrodiffusion	161
4.3.8	Caractérisation embarquée du brouillard nocturne par la rétrodiffusion . .	173
4.3.9	Caractérisation du brouillard de nuit par une méthode statique	175
4.4	Synthèse	185

- Conclusion -

Bibliographie	195
----------------------	------------

- Productions Scientifiques -	207
--------------------------------------	------------

Introduction

Contexte

La fonction sociale de la route a beaucoup évolué de l'invention de l'automobile à nos jours. Elle occupe désormais une place centrale dans la société et elle est le principal moyen de transport des personnes et des biens. Du point de vue des pouvoirs publics le concept de mobilité est devenu central. Tous les jours, des millions de kilomètres sont parcourus à des fins personnelles et professionnelles. Il s'agit de s'assurer que ces transports peuvent s'effectuer avec un maximum d'efficacité (rapidité, confort), tout en préservant un très haut niveau de sécurité.

Depuis de nombreuses années l'accidentologie routière est en baisse constante et il faut s'en réjouir. Le taux d'accident en fonction du kilométrage parcouru n'a jamais été aussi bas, quel que soit le réseau utilisé. Ces progrès sont dus à la somme d'efforts et de d'améliorations techniques apportées par les différents acteurs du domaine routier, des pouvoirs publics aux constructeurs d'automobiles, en incluant les gestionnaires routiers et la prise en charge des soins. Il reste néanmoins plus de 72 000 accidents, faisant 4 300 morts en 2009 sur les routes françaises. Sur le réseau secondaire, en particulier, les accidents concernant des conducteurs seuls sont la principale source de mortalité et sont en augmentation ou stagnent ces dernières années.

Depuis une dizaine d'années et, entre autres, depuis la mise en place d'une politique de contrôle-sanction, les pratiques ont évolué et les vitesses pratiquées par la plupart des conducteurs tendent vers les limites légales autorisées. Malgré une stabilisation de ces pratiques, le nombre d'accidents n'est pas négligeable. Ils ne sont pas nécessairement le fait des contrevenants à la législation routière. Il faut donc prendre en compte d'autres causes d'accidents et intervenir sur celles-ci pour continuer à progresser sur le terrain de l'accidentologie routière.

La triple volonté d'améliorer la sécurité routière, le confort du conducteur et la fluidité du trafic a conduit à l'émergence du concept de « route automatisée » sur lequel de nombreuses équipes de recherche à travers le monde ont porté leur attention au cours des dernières années [Rou 96]. La faisabilité technique de ce concept futuriste lève toutefois de nouveaux problèmes. Dans la perspective de la mise au point et du déploiement de tels réseaux routiers, de nombreux chercheurs focalisent donc leurs efforts autour de la notion de « véhicule intelligent » qui constitue un premier pas vers cette « route automatisée ».

Si les progrès sur le véhicule sont autant d'atouts supplémentaires, les recherches récentes visent à évaluer l'apport d'une intégration véhicule-infrastructure sur la sécurité et la mobilité [Hautière 08b]. Ces axes de recherche ont été à l'origine d'un certain nombre de projets récents visant à faire progresser le véhicule à proprement parler et l'intégration du véhicule dans son environnement routier. Dans ce contexte, les télécommunications entre véhicules et entre les véhicules et l'infrastructure sont un moyen incontournable d'échanges d'informations.

Objectifs

C'est dans cette perspective que s'inscrit le projet DIVAS - Dialogue Infrastructure Véhicule pour Améliorer la Sécurité routière. Il vise à prendre en compte l'interaction véhicule-infrastructure, l'impact de la géométrie de la route et l'impact des conditions météorologiques sur le risque routier afin d'aider le conducteur seul sur la route à affronter les difficultés. Cette thèse se situe au cœur du projet DIVAS. Elle contribue, au travers de la méthode proposée d'estimation du risque et de modulation de la vitesse, à la réalisation emblématique du projet : un système intelligent d'adaptation de la vitesse (ISA, *Intelligent Speed Adaptation*).

Le projet DIVAS vise à prendre en compte deux sources principales du risque routier en dehors du trafic : la géométrie et les propriétés d'adhérence de l'infrastructure d'une part et la visibilité d'autre part. Ce projet montre l'intérêt d'une collaboration avec les gestionnaires de routes pour l'acquisition, la gestion et la communication de certaines de ces caractéristiques, en particulier celles propres à l'infrastructure. En revanche, certains aspects ne peuvent être estimés qu'en temps réel dans l'environnement proche du véhicule. C'est le cas des conditions atmosphériques, qui peuvent impacter la visibilité et l'adhérence.

La notion de visibilité routière, bien qu'intelligible, n'est pas clairement définie. Le projet vise à clarifier les différentes notions de visibilité géométrique, photométrique et atmosphérique, à comprendre leur impact sur la visibilité routière et à déterminer quels sont les moyens d'estimer la visibilité routière en temps réel. Le projet DIVAS vise non seulement à proposer un système global d'assistance à la conduite, mais également à développer des outils embarqués qui contribuent aux systèmes de sécurité propres au véhicule.

Cette thèse a également contribué au développement d'aides à la conduite du « véhicule intelligent » par la proposition d'une méthode originale de détection et de caractérisation du brouillard de nuit par caméra embarquée. Cette information peut aussi bien être utile au véhicule autonome afin d'informer le conducteur, de le mettre en conformation avec la législation (passage en code par exemple) ou d'adapter le fonctionnement d'autres aides à la conduite fondées sur l'utilisation de caméras. Cette estimation de la présence de brouillard peut également être utilisée dans le contexte de notre estimation embarquée du risque afin de proposer une modulation de vitesse adaptée aux conditions de visibilité en temps réel.

Plan

Dans le premier chapitre, nous présentons le contexte de la sécurité routière en France. Après avoir fait un bilan de l'accidentologie récente et des sources de risque pour les conducteurs seuls sur le réseau secondaire, nous présentons le contexte des grandes actions visant à améliorer la sécurité routière et la mobilité en nous appuyant sur les projets Français ou Européens d'envergure traitant ce sujet. Nous présentons comment le projet DIVAS s'insère dans ce schéma global de recherches et quels sont ses objectifs et les moyens mis en œuvre afin de tester la faisabilité et les fonctionnalités des réalisations développées dans le projet.

Dans le deuxième chapitre nous traitons de la problématique centrale de la vitesse. Après avoir rappelé les définitions usuelles de vitesse nous posons la question de la notion de vitesse de référence et de la vitesse de conseil. En particulier, nous illustrons par l'observation des vitesses pratiquées le fait que la vitesse doit être modulée pour tenir compte de la route et de l'environnement routier par beau temps. Nous présentons une stratégie consistant à considérer une vitesse de référence en conditions idéales et à prendre en compte des conditions météorologiques au travers d'une modulation de la vitesse de référence répondant à une dégradation de

la situation idéale. La prise en compte d'événements, localisés dans le temps et dans l'espace, venant dégrader l'adhérence ou la visibilité, est réalisée au travers d'un modèle d'interactions entre conducteur, véhicule et infrastructure inspiré de la bibliographie ainsi que de scénarios d'accidents extraits d'une étude d'accidentologie. Nous intégrons dans la notion de risque des aspects de probabilité d'accident tout en associant une mesure de la gravité de ces accidents. Enfin, nous comparons notre proposition de vitesse aux propositions existantes de modulation dynamique de la vitesse.

Dans le troisième chapitre nous éclairons la notion générale de visibilité routière. Nous clarifions comment cette notion est une vision globale des propriétés de visibilité géométriques, photométriques et atmosphériques des scènes routières. Nous présentons les modèles et les moyens de mesure permettant d'estimer chacune de ces notions et comment nous pouvons les prendre en compte pour estimer la visibilité routière. Nous montrons que certains aspects de la visibilité routière sont structurels et peuvent être estimés une première fois puis mis à jour périodiquement. C'est le cas de la visibilité géométrique et de la visibilité photométrique par beau temps. En revanche, certains aspects nécessitent d'être estimés en temps réel comme la visibilité atmosphérique.

Dans le quatrième chapitre, nous traitons des systèmes embarqués permettant d'estimer la présence de conditions atmosphériques dégradées telles que la pluie et le brouillard. Nous présentons les matériels embarqués existants, leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que les méthodes visant à caractériser différentes atmosphères par caméra embarquée. Enfin, nous présentons notre contribution à la détection et à la caractérisation du brouillard de nuit en conditions embarquées par caméra. Nous montrons qu'il est nécessaire de traiter différemment les scènes routières où le conducteur est seul sur route non éclairée et celles dans lesquelles il y a un éclairage public. Sur la base de cette différenciation nous proposons deux méthodes complémentaires destinées à permettre une estimation de la présence de brouillard de façon continue le long d'un itinéraire. Nous présentons finalement un outil de caractérisation du brouillard par caméra destiné à être exploité sur notre site de test dans les phases complémentaires de validation expérimentales en conditions écologiques.

Finalement, nous dressons le bilan des actions menées, les réalisations notables et les publications scientifiques issues de ces travaux et nous présentons les perspectives ouvertes par ces travaux.

Accidentologie : constat, objectifs et moyens

Sommaire

1.1	Bilan d'accidentologie	6
1.1.1	Acteurs concernés et objectifs des analyses de risque	7
1.1.2	Sources de risques	8
1.1.3	Statistiques d'accidents et études portant sur le risque routier	10
1.1.4	Bilan des études portant sur le risque routier	23
1.2	Prévention des risques et aides à la conduite	24
1.2.1	Systèmes de gestion du risque	24
1.2.2	Systèmes de mitigation du risque	26
1.2.3	Systèmes d'anticipation du risque	28
1.2.4	Le projet DIVAS	29
1.3	Bilan sur l'accidentologie et le traitement des risques routiers . . .	31

Dans ce premier chapitre, nous abordons la problématique du risque routier. Ce terme générique est un enjeu majeur pour une multitude d'acteurs de la route. Nous présentons dans un premier temps les différents intervenants et la définition qu'ils ont du risque. Nous présentons un modèle tiré de la littérature permettant d'envisager le risque comme un système dans un équilibre complexe et la vitesse comme une variable d'ajustement. Cet abord du risque nous intéresse particulièrement dans le cadre de notre système intelligent de la vitesse prenant en compte divers facteurs accidentogènes. Nous précisons que nous nous focalisons sur les situations dans lesquelles le conducteur est seul sur la route ainsi que la définition que nous retenons du risque : une estimation combinée de la probabilité d'avoir un accident et de la gravité associées à cet accident.

Nous utilisons cette définition pour présenter une revue des études abordant le risque routier selon ces deux aspects. Dans un premier temps, nous présentons les études traitant de la probabilité d'avoir un accident en fonction de divers facteurs, dont les principaux sont la vitesse, l'infrastructure et les conditions météorologiques. Nous exposons ensuite les travaux traitant de la gravité en fonction de divers facteurs, dont les principaux sont la vitesse à l'impact, l'orientation du choc et les équipements de sécurité. Nous montrons que ces études nous permettent

d'apprécier les facteurs impactant dont nous devons tenir compte dans notre proposition de traitement du risque présentée dans le chapitre 2. Ces études nous renseignent également sur les possibles effets néfastes des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse (ISA, *IntelligentSpeed Adaptation*) et peuvent être utilisées afin de mesurer ou d'anticiper l'efficacité de tels systèmes.

Nous présentons ensuite les différentes mises en œuvre qui ont pu contribuer ces dernières années à la réduction du risque routier. Après avoir introduit les systèmes de sécurité passifs, nous abordons au travers d'une revue de divers projets de recherche récents, comment certains aspects du risque routier sont traités avec l'aide en particulier des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Nous replaçons ainsi le projet DIVAS dans son contexte, comment il se distingue par l'exploitation qu'il fait de l'intégration véhicule-infrastructure pour le traitement du risque. Nous présentons l'architecture technique du projet, l'idée selon laquelle certains aspects du risque sont liés à l'infrastructure, ils peuvent être estimés en amont et communiqués au véhicule en fonction de sa localisation. D'autres aspects du risque tels ceux liés à la météorologie, en revanche, sont locaux et doivent être estimés en temps réel par le véhicule car ils concernent son environnement proche.

1.1 Bilan d'accidentologie

Les statistiques nationales rapportaient encore 74000 accidents en 2008 et 72000 en 2009, soit 4300 morts et 94000 accidentés [ONISR 09b, ONISR 10]. Le nombre de morts est globalement en baisse constante depuis 1972. La figure 1.1 montre une tendance à la baisse ponctuée de chutes importantes, ces dernières étant liées à des mises en œuvre réglementaires applicables à tous les conducteurs. Certaines baisses sont consécutives à des politiques de prévention (port de la ceinture, limitation de la vitesse légale), d'autres à des progrès techniques (véhicules et assistances à la conduite, routes et aménagements routiers). Rapporté au nombre de kilomètres parcourus, le niveau de sécurité moyen n'a jamais été aussi élevé avec 19,9 morts par million de kilomètres parcourus, mais les objectifs fixés par les autorités restent ambitieux (moins de 4000 morts en 2010).



FIGURE 1.1 – Évolution du nombre de tués sur les routes françaises depuis 1970.

En six ans, entre 2002 et 2008, la baisse des accidents est de 44,4 % pour les personnes tuées et de 31,8 % pour les personnes blessées. Néanmoins, on a pu constater une augmentation des accidents de 10 % entre 2006 et 2007 et entre 2008 et 2009 sur les routes départementales [ONISR 09a]. Deux tiers des personnes tuées sur les routes le sont en rase campagne. Un tiers des personnes tuées le sont dans un accident sans tiers. Une récente hausse globale des accidents sur le quatrième trimestre de 2009 rappelle que cette évolution n'est pas une constante naturelle mais le fruit de politiques et de mises en œuvre de sécurité qui doivent être poursuivies, notamment par des systèmes de sécurité plus performants ou plus adaptés à une situation spécifique de conduite (lieu, environnement, véhicule ou conducteur). Le projet DIVAS entre dans cette catégorie et traite spécifiquement de la problématique d'une vitesse adaptée pour un véhicule seul sur le réseau secondaire.

Les statistiques nationales délivrées par l'ONISR s'adressent aux politiques dont les moyens d'action sont globaux et se font par voie législative en agissant sur le code de la route, sa mise en application et son contrôle. Les populations sont segmentées par classes d'âge et par catégorie d'usager. Elles mettent en lien l'évolution des accidents et l'évolution moyenne des vitesses des véhicules légers tous réseaux confondus (baisse moyenne de 1 km.h^{-1} entre 2007 et 2008 par exemple). Mais cette vision macroscopique du risque n'explique pas les causes des accidents.

Les recherches effectuées autour du risque routier et de l'accidentologie sont différentes en fonction des acteurs auxquelles elles s'adressent. Les paramètres considérés peuvent être des lieux, la signalisation, la qualité de l'infrastructure, le contexte pour les gestionnaires de l'infrastructure, les types de lésions pour les équipementiers et fabricants de systèmes de sécurité, les types d'accidents et la gravité pour les gestionnaires de soin, *etc.* La définition de risque routier est très large et pourra aussi bien être entendue comme le risque d'être impliqué dans un accident, le risque d'être blessé ou de mourir en lien avec la route (certaines statistiques incluent uniquement conducteurs et passagers, d'autres incluent les tiers motorisés ou non et d'autres études incluront les dommages aux biens) ou encore les dégâts matériels liés aux accidents, lesquels ont généré 11,4 milliards d'euros [ONISR 09a] de frais en France pour 2006.

1.1.1 Acteurs concernés et objectifs des analyses de risque

La volonté d'améliorer la sécurité routière est toujours présente et les solutions envisagées doivent répondre à diverses contraintes posées par les nombreux acteurs de la route que sont les opérateurs routiers, les fabricants de véhicules et de matériels de sécurité, les formateurs, les politiques et enfin les conducteurs. Chacun ayant besoin de chiffres pour se guider et étudier les apports potentiels, les études portant sur le risque sont nombreuses et recouvrent de multiples champs disciplinaires.

Certaines études ont un abord extrêmement large du risque (*cf.* figure 1.2 tirée de [ITE 08]) portant sur le risque d'être impliqué dans un accident pour tout usager de la route avec des classifications d'exposition au risque en fonction de l'âge, du sexe, du jour de la semaine, de l'état émotif, du véhicule, *etc.*

D'autres études sont plus spécifiques. Elles portent par exemple sur le risque du point de vue des équipementiers ou des fabricants d'automobiles, qui est lié à la présence et à la qualité d'équipements de sécurité; ou encore l'étude [(ETSC) 99] qui présente les gains potentiels en terme de risque avec de meilleures conditions d'accès aux sites d'accidents et une politique de soins plus adaptée (spécifique aux blessures liées aux accidents de la route).

L'exploitation des études existantes est rendue difficile pour deux raisons. D'une part, les classes d'observation ne sont pas des variables explicatives. Si les plus âgés ont plus d'accidents (classe d'observation), est-ce lié à la perte de vue, de réflexes, une plus grande fragi-

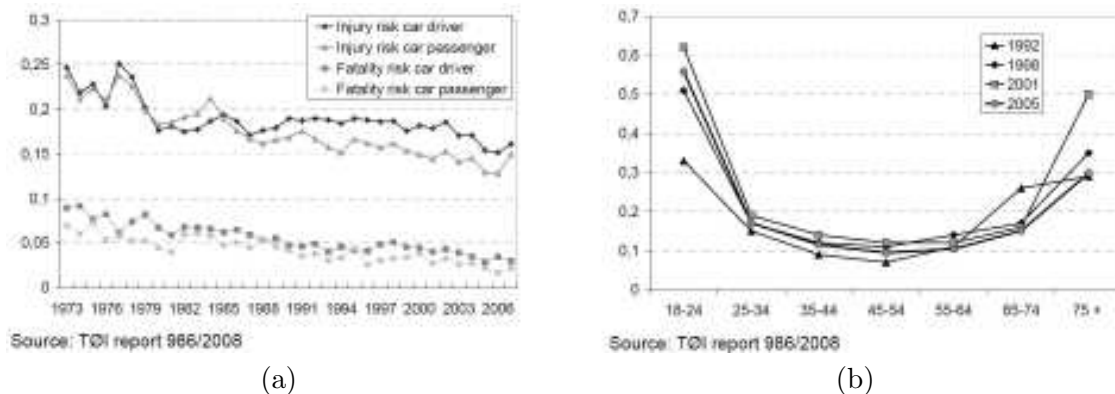


FIGURE 1.2 – Risque d'accident et d'accident fatal (a) et risque d'accident en fonction de l'âge (b) par million de km parcourus par personne.

lité vis-à-vis des chocs, *etc.* Causent-ils les accidents ou en sont-ils victimes? D'autre part, il est difficile de transposer les problématiques complexes impliquant des interactions infrastructure/véhicules/conducteurs d'un cadre à l'autre (prévention des risques, soins et santé, *etc.*), d'un pays à l'autre.

L'étude [Hermans 08], très orientée sur les politiques de prévention du risque routier porte sur « les effets des méthodes d'évaluation du niveau de sécurité d'un réseau sur le classement des pays ». Cette étude met en lien la pondération de différents indicateurs avec le nombre total de décès sur la route. Les différents indicateurs présentés sur la figure 1.3 correspondent à différents domaines concernés par la sécurité routière. Cette étude illustre les différents types d'analyse du risque existants et la difficulté de désintriquer les apports de chaque catégorie à une amélioration globale des conditions de sécurité.

Dans les conclusions de l'étude [Hermans 08], il apparaît que la vitesse, la visibilité et la gestion des soins sont les principaux indicateurs corrélés au taux de mortalité; viennent ensuite infrastructure et alcool, puis le véhicule et les systèmes de sécurité. Le projet DIVAS propose un système intelligent d'adaptation de la vitesse (ISA) qui tient compte de la visibilité disponible pour le conducteur, qu'elle soit liée à l'infrastructure ou qu'elle soit dégradées par les conditions météorologiques.

Nous cherchons à prévenir les accidents, donc à proposer une gestion du risque en amont (avant l'accident) tout en nous inscrivant dans les limites existantes de la législation (nous n'intervenons pas au niveau de la législation ni au niveau de l'infrastructure).

1.1.2 Sources de risques

Une définition répandue du risque telle que l'on peut la trouver dans certaines normes [CEI 99] est : « Combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité ». Dans le domaine de la sécurité routière, un accident de la route correspondrait donc à la réalisation de cette probabilité et la gravité pourrait être entendue comme les conséquences de l'accident. Ces conséquences peuvent être considérées aussi bien sur le plan des biens que des personnes.

Dans la figure 1.4 inspirée de [Oh 01] et transposée aux véhicules seuls sur la route, nous pouvons voir une proposition de définition des sources de risque. Ces sources peuvent être de nature endogène ou exogène. Les auteurs considèrent cet ensemble comme un système ayant besoin d'un certain équilibre pour se maintenir, une défaillance ou une modification d'une de ces sources d'accidents devra être compensée par une adaptation des autres éléments du système.

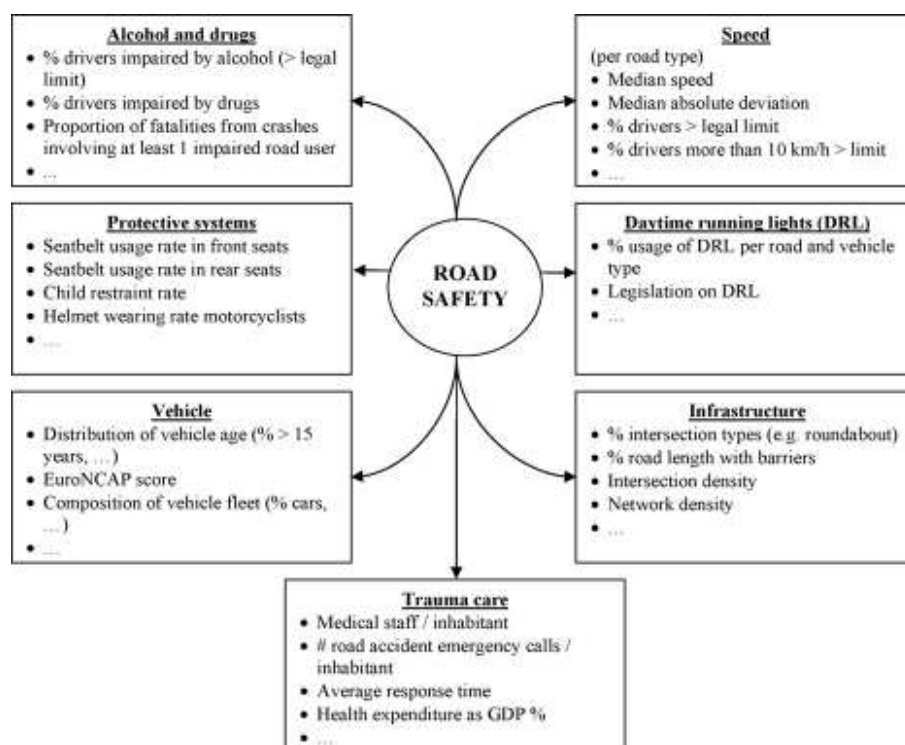


FIGURE 1.3 – Vue schématique des indicateurs liés à la sécurité étudiés d'après [Hermans 08].

En pratique, le conducteur ne peut intervenir qu'au niveau de ses caractéristiques propres (être plus attentif) ou moduler ses actions en fonction de son environnement (adapter sa vitesse, ses trajectoires ou sa distance au véhicule précédent, avoir des accélérations et des freinages moins brusques, *etc.*). En ajustant son comportement il rétablit l'équilibre du système de façon permanente.

Comme nous allons le voir, la vitesse est souvent citée comme une des principales sources de risque. Il est clair que la vitesse est corrélée avec la probabilité et la gravité des accidents. Cependant, la vitesse n'est pas en soi le générateur d'accidents. C'est l'inadéquation de la vitesse avec l'adhérence, les capacités de freinage du conducteur et du véhicule, la courbure de la voie, ou avec le temps de réaction qui posent problème.

Le projet DIVAS cherche à répondre à la question de l'adéquation de la vitesse à son environnement : comment se déplacer efficacement, le plus vite possible et le plus confortablement possible, tout en maintenant une exigence de sécurité élevée. Quelle est la vitesse maximale praticable en toute sécurité dans des conditions données ? Une baisse de l'ensemble des vitesses de 20 km.h^{-1} garantirait une nette amélioration de la sécurité routière, mais cette vitesse n'est ni crédible, ni applicable et ne serait vraisemblablement pas respectée par les conducteurs. La proposition d'une vitesse adaptée à l'environnement routier et météorologique serait non seulement crédible mais fondée.

Nous présentons dans la section 1.1.3 les travaux relatant le lien entre vitesse et accidentologie, mais aussi des études s'intéressant à d'autres facteurs tels que les conditions météorologiques, les conditions de luminosité ou l'infrastructure. Ces facteurs sont identifiés comme étant prépondérants et nous les prenons en compte dans notre estimation du risque en conditions embarquées.

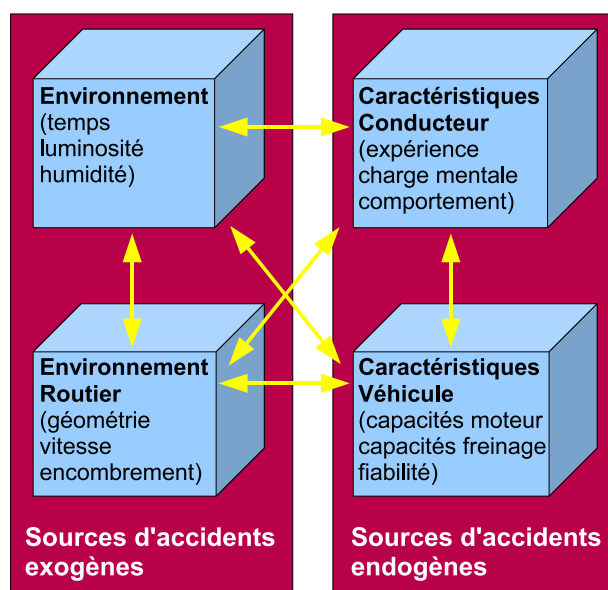


FIGURE 1.4 – Analyse des sources d'accidents d'après [Oh 01].

1.1.3 Statistiques d'accidents et études portant sur le risque routier

Nous classons les études que nous présentons en deux catégories : celles portant sur la probabilité d'être impliqué dans un accident et celles portant sur la gravité associée aux accidents.

Les études d'analyse ou de caractérisation du risque sont fondées sur différentes méthodologies. Dans un premier temps, les études analysent le risque à partir de relevés d'accidents, selon de nombreuses typologies telles que les classes de véhicules [Wood 02], les caractéristiques des occupants (âge [Weininger 07], sexe [Romano 08], nombre [Mackenzie 08], attachés ou avec airbags [Bean 09]). D'autres études proposent des modèles dont l'objectif est d'inférer la probabilité d'occurrence de l'événement « accident » en fonction de différentes variables selon des analyses de corrélation factorielle. Ces modèles sont construits à partir de :

- l'observation de séries statistiques historiques
- l'utilisation de probabilités subjectives ou objectives
- la définition de scénarios d'accidents et des conséquences (gravité) associées par des experts.

[Varhelyi 02] a proposé une taxonomie des facteurs accidentogènes à partir d'un panel d'experts (classement humain basé sur leur expérience). La première dimension impactante sur les accidents est liée aux situations conjoncturelles (surface de la route, visibilité, conditions météorologiques), la deuxième dimension est structurelle (type de route, intersection et particulièrement les discontinuités pouvant apparaître dans le trajet), la troisième dimension est l'interaction avec les autres utilisateurs.

Nous présentons dans la suite les études portant sur l'exposition au risque en fonction de la vitesse (domaine le plus traité), en fonction de la luminosité ou des conditions météorologiques et en fonction de l'infrastructure. Nous n'aborderons pas les interactions (au sens du trafic) avec les autres véhicules. Par la suite nous aborderons des études nous donnant des informations particulières concernant le lien entre infrastructure et accidentologie et les effets des conditions météorologiques et de la luminosité sur l'accidentologie.

Risque en fonction de la vitesse

Comme nous l'avons déjà souligné, la vitesse joue un rôle dans chaque accident. Elle a un impact sur la situation à l'origine de l'accident (temps pour réagir plus court, distance d'arrêt augmentée, manœuvrabilité diminuée, champ de vision réduit) ainsi que sur la gravité des chocs. Souvent, c'est l'inadéquation entre la vitesse et l'environnement (vitesse de conception, vitesse pratiquée par les autres conducteurs, présence de pluie, *etc.*) qui est à l'origine de l'accident. Il semblerait d'après [CRT 06] qu'un tiers des accidents fatals soit partiellement dû à une vitesse excessive.

Nous présentons dans la suite les résultats emblématiques issus des principales études sur le sujet, dont [Aarts 06b] propose une revue assez complète. La probabilité d'accident en rapport avec la vitesse peut être décrite de manière macroscopique en se référant à la probabilité d'accident en fonction de la vitesse moyenne sur un tronçon. D'autres modèles proposent d'analyser le risque individuel (probabilité d'accident) en fonction de l'écart de la vitesse d'un véhicule par rapport à la vitesse moyenne pratiquée du tronçon ou en fonction de la vitesse du conducteur par rapport aux autres véhicules environnants.

Risque en fonction de la vitesse absolue du tronçon

Nous pouvons lire une compilation dans [Lu 03] des résultats issus d'études récentes des effets d'une baisse officielle de la vitesse. Les effets ont été quantifiés par des mesures avant/après et sont rapportés sur la figure 1.5.

Reference	Country	Change		Results
		Before	After	
Nilsson (1990)	Sweden	110 km/h (68 mi/h)	90 km/h (56 mi/h)	Speeds declined by 14 km/h Fatal crashes declined by 21%
Engel (1990)	Denmark	60 km/h (37 mi/h)	50 km/h (31 mi/h)	Fatal crashes declined by 24% Injury crashes declined by 9%
Peltola (1991)	UK	100 km/h (62 mi/h)	80 km/h (50 mi/h)	Speeds declined by 4 km/h Crashes declined by 14%
Shogers (1992)	Australia	110 km/h (68 mi/h)	100 km/h (62 mi/h)	Injury crashes declined by 19%
Finch et al. (1994)	Switzerland	130 km/h (81 mi/h)	120 km/h (75 mi/h)	Speeds declined by 5 km/h Fatal crashes declined by 12%
Scharping (1994)	Germany	60 km/h (37 mi/h)	50 km/h (31 mi/h)	Crashes declined by 20%
Newstead and Mallan (1996)	Australia	5-20 km/h decreases (3-12 mi/h decreases)		No significant change (4% increase relative to sites not changed)
Parker (1997)	USA 22 states	5-20 mi/h decreases (8-32 km/h decreases)		No significant changes

FIGURE 1.5 – Résultats des principales études avant/après d'après [Lu 03].

D'après les études d'accidentologie, certains ont cherché à proposer des modèles reliant la vitesse et l'évolution du nombre d'accidents. Le modèle le plus répandu actuellement est celui proposé par Nilsson. Ce modèle est tiré d'observations avant/après sur des tronçons pour lesquels la vitesse est passée de 110 km.h^{-1} à 90 km.h^{-1} . D'après ses observations et des relevés

d'accidentologie, il a étendu son modèle en fonction de la gravité en ajustant la puissance du modèle (puissance 3 pour les accidents graves et 4 pour les accidents mortels respectivement nous pouvons le voir figure 1.6).

$$\frac{\text{Accidents Avant}}{\text{Accidents Après}} = \left(\frac{\text{Vitesse Avant}}{\text{Vitesse Après}} \right)^2 \quad (1.1)$$

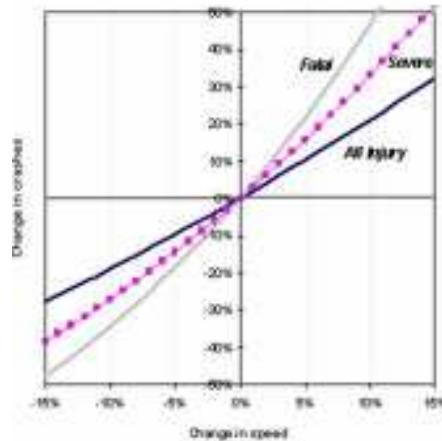


FIGURE 1.6 – Nombre d’accidents en fonction de l’évolution de la vitesse moyenne d’après [Nilsson 81].

D’autres modèles existent : ceux présentés dans [Finch 94] ou [Baruya 98] décrivant différemment la relation entre une baisse de vitesse et une baisse des accidents (exemple : $\Delta \text{Accidents} = 4,92 \cdot \Delta V$ en *mph* pour Finch). Enfin, [Antov 02] montrent que sur des routes présentant un bon niveau de sécurité (largeur de voie, visibilité, marquages) cette relation n’est pas valide et que les limites de vitesses pouvaient dans certaines conditions être augmentées sans risque supplémentaire pour les usagers de la route.

Ces études illustrent l’impact majeur de la vitesse sur l’accidentologie, tous accidents confondus. La vitesse est donc un levier très efficace pour limiter le nombre d’accidents. Mais dans l’optique de l’efficacité des transports, nous pouvons envisager des solutions plus adaptées qu’une baisse réglementaire car il n’est sûrement pas indispensable de baisser la vitesse de manière uniforme. La prise en compte de facteurs de risque permet d’envisager une adaptation de la vitesse en adéquation avec les facteurs accidentogènes.

Les paramètres de ces modèles sont vraisemblablement fortement influencés par les environnements routiers des pays dans lesquels ont été faites les études. Il s’agit en pratique d’une équation à destination des équipementiers et des politiques permettant de planifier une baisse d’accident sur un tronçon en fonction de l’évolution des vitesses pratiquées.

Risque en fonction de l’écart de vitesse à la vitesse moyenne

Certaines études visent à caractériser le risque encouru par les individus lorsqu’ils roulent avec une vitesse différente de la vitesse moyenne. Nous citerons par exemple, les observations présentées dans [Solomon 64, Cirillo 68, West 71] qui rapportent la courbe en U illustrée figure 1.7(a) et (b). La courbe en U traduit qu’un écart à la vitesse moyenne pratiquée augmente le risque d’accident, ce, pour des vitesses pratiquées supérieures ou inférieures à la vitesse moyenne.

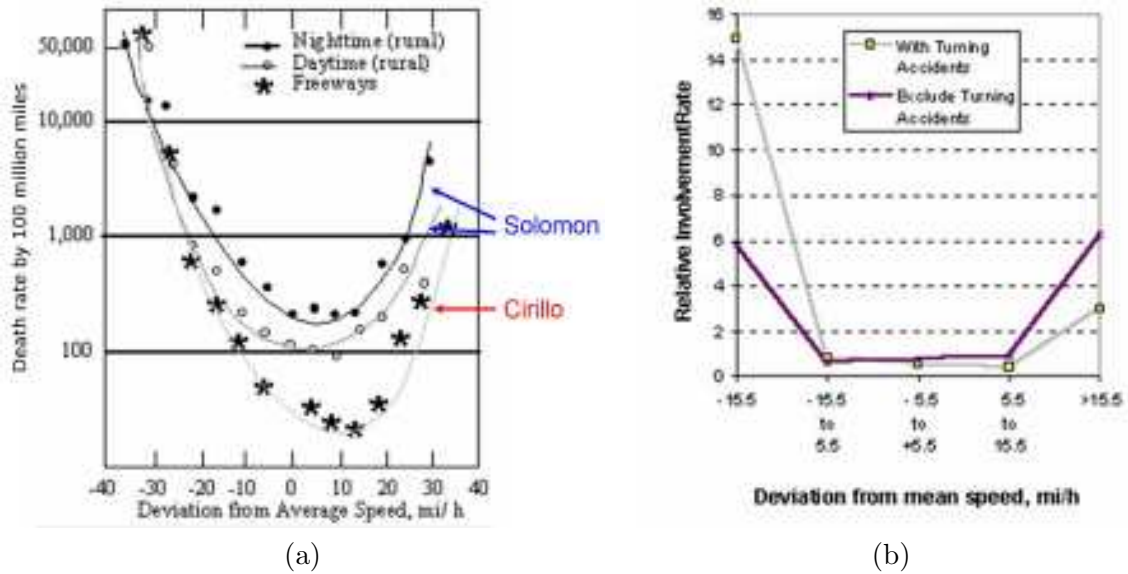


FIGURE 1.7 – Courbes d'accidentologie sur routes locales (Solomon) et nationales (Cirillo) (a) et selon West and Dunn (b).

Solomon tient compte de tous les accidents alors que Cirillo ne tient compte que des accidents avec d'autres véhicules allant dans la même direction, leurs observations sont illustrées sur la figure 1.7(a). Les travaux de West et Dunn (Fig. 1.7(b)) ont apporté un complément d'explication à la courbe en U. Comme nous pouvons le voir sur la figure 1.7(b) les accidents en virage ont lieu le plus souvent pour des vitesses inférieures à la vitesse moyenne, ceci est expliqué par un manque de visibilité géométrique en virage et des chocs arrière par des véhicules suivants arrivant plus vite.

Les travaux les plus récents sont ceux de [Fildes 91] ou de [Kloeden 01b], ces contributions proposent un modèle individuel d'exposition au risque. [Kloeden 01b, Kloeden 01a] a travaillé sur le risque d'accident routier avec blessure en fonction de l'écart de vitesse d'un véhicule par rapport à la vitesse moyenne pratiquée. Il présente non pas une courbe en U mais une courbe strictement croissante de type exponentielle (*cf.* Eq. 1.2).

$$\text{Risque}(\Delta V) = e^{0,07039\Delta V + 0,0008617\Delta V^2} \quad (1.2)$$

ΔV correspond au différentiel de vitesse entre le véhicule et la moyenne locale des vitesses pratiquées.

Ce type de modèle pourrait éventuellement être utilisé connaissant la vitesse moyenne locale pour indiquer à un conducteur sa probabilité d'accident en fonction de sa vitesse courante. Il présente néanmoins deux défauts majeurs, la probabilité à l'échelle individuelle ne donnerait que peu d'information au conducteur, de plus ce modèle a été calibré d'après les rapports de dépassement des hospitalisés, mais il est évident qu'un dépassement de 20 km.h^{-1} en virage n'a pas le même sens qu'en ligne droite sur route départementale. Ce modèle ne permet pas de différencier les conditions environnementales et de comprendre le lien entre dépassement de vitesse et accidentologie même si la corrélation est observée.

Les effets de l'écart à la vitesse moyenne ou de la variance de la distribution de vitesses sont discutés et discutables. D'après [Garber 88], plus la variance des vitesses est importante sur une route, plus les accidents y sont nombreux. Il ressort qu'elle s'explique surtout par un risque

situationnel, les très fortes différences de vitesse se produisent essentiellement dans quelques cas particuliers. Ils se produisent majoritairement aux intersections sur routes secondaires et sur 2x2 voies, comme montré dans [Bisson 09], cela correspond surtout à des accidents dus à de forts ralentissements ou des remontées de file. [Kloeden 01b] exclut certaines de ces situations telles que les accidents aux carrefours et les accidents lors d'une entrée sortie d'une place de parking qui contribuent également fortement aux accidents avec gros différentiel de vitesse (donc forte gravité associée). Taylor [Taylor 02], qui propose une classification des routes associée à l'accidentologie trouve les effets de la variance des vitesses négligeables au sein de ses classes de routes.

La mise en œuvre d'un système d'adaptation intelligent de la vitesse aura un effet à la fois sur le trafic et sur les vitesses. Les systèmes d'adaptation de la vitesse existants ou testés récemment tendent à montrer une moindre dispersion des vitesses avec leur utilisation, donc un accroissement de la sécurité. Mais des effets pervers pourraient apparaître dans le cas de vitesses de conseil excessivement basses. Nous détaillons dans le chapitre 2, dans la section 2.2 consacrée aux systèmes d'adaptation de la vitesse intelligents (*ISAs : Intelligent Speed Adaptation Systems*)), les avantages et inconvénients de ces systèmes.

Risque en fonction du type de route

D'après [ONISR 09a], les routes nationales et départementales restent les plus meurtrières et les plus dangereuses. Il y a deux fois plus de morts sur route Nationale que sur autoroute et dix fois plus sur route départementale (cf. figure 1.8).

Métropole + DOM		Accidents corporels	Fermeurs tués	Blessés hospitalisés	Blessés légers	Total blessés	Gravité (tous/100 accidents corporels)
Ensemble des autoroutes	Année 2008	4 290	234	1 811	4 288	6 099	5,43
	Année 2007	5 390	276	2 071	5 453	7 924	5,31
	Différence	-1 100	-42	-260	-1 165	-1 825	0,34
	Évolution	-20,5 %	-15,2 %	-12,6 %	-21,4 %	-18,9 %	
Routes nationales	Année 2008	5 359	408	3 178	4 800	7 976	8,91
	Année 2007	7 218	561	3 921	6 141	10 082	9,76
Routes départementales	Année 2008	27 988	2 771	16 818	13 834	30 692	12,05
	Année 2007	24 724	2 910	18 542	14 584	33 126	11,77
Voies communales et autres voies (1)	Année 2008	63 630	940	14 372	37 804	52 176	2,15
	Année 2007	45 508	991	15 220	40 777	35 987	2,13
	Différence	+18 122	-51	-848	-2 973	+16 189	0,02
	Évolution	+40 %	-5,1 %	-5,6 %	-7,3 %	+45,3 %	
Ensemble	Année 2008	76 567	4 443	36 179	60 726	96 909	5,79
	Année 2007	83 850	4 838	39 754	66 955	106 709	5,77
	Différence	-7 283	-395	-3 575	-6 229	-9 804	0,02
	Évolution	-8,8 %	-8,2 %	-9,0 %	-9,3 %	-9,2 %	

(1) autres voies : bretelles d'autoroutes, parkings, chemins vicinaux...

Source : ONISR, fichier des accidents.

FIGURE 1.8 – Statistiques d'accidentologie en fonction du réseau en France en 2008 d'après [ONISR 09a].

Les aspects accidentogènes propres à l'infrastructure sur les routes secondaires ont donné lieu à plusieurs études visant à identifier les paramètres les plus impactants.

L'étude [Watters 07] s'adresse aux gestionnaires de réseaux et aux politiques afin d'aménager l'infrastructure. Elle vise à mesurer un indice de « qualité » des routes relatif à l'accidentologie et exploite la notion de consistance géométrique, qui est une mesure s'appuyant sur quatre notions : la vitesse, la stabilité du véhicule, la charge mentale du conducteur et les indices d'alignement (on trouvera une revue plus détaillée de la notion de consistance dans le rapport de l'AIPCR [AIPCR 03]). En pratique les auteurs n'arrivent pas à mettre en corrélation la consistance géométrique appliquée aux routes rurales et le nombre d'accidents sur ces routes ¹.

1. Plusieurs raisons sont proposées, la consistance n'a pas été correctement calculée, la notion de consistance

L'étude [Taylor 02] analysant la relation entre vitesse et accidents sur des routes rurales s'intéresse également à l'aspect géométrique et à l'infrastructure des routes (nombre d'accès, nombre de sorties, nombre de virages serrés, ou larges). L'auteur insiste sur le fait qu'une classification hiérarchique reflétant la qualité des routes est indispensable pour identifier les priorités en terme de sécurité. Elle reflète le risque intrinsèque propre à ces types d'infrastructures et à l'utilisation que les usagers en ont. Leurs conclusions sont qu'il faut dans l'ordre définir une hiérarchie en fonction du risque encouru sur ces routes, déterminer les vitesses appropriées sur ces types de routes, identifier les moyens de réellement atteindre ces vitesses.

Les groupes déterminant les différentes catégories de routes identifiées sont :

- Groupe 1 : routes très vallonnées, avec une haute densité de virages et une faible vitesse moyenne. Ce sont les routes de mauvaise qualité
- Groupe 2 : routes avec une haute densité d'accès, une densité de virages supérieure à la moyenne, et une vitesse moyenne inférieure à la moyenne
- Groupe 3 : routes avec une haute densité d'embranchements, faiblement vallonnées avec une densité de virage inférieure à la moyenne et une vitesse moyenne supérieure à la moyenne
- Groupe 4 : routes avec une faible densité de virages, d'embranchements et d'accès et une vitesse moyenne élevée. Ce sont les routes de bonne qualité du point de vue sécurité

Dans cette analyse de Taylor, la variance de la vitesse ne s'est pas avérée corrélée avec la fréquence des accidents à l'intérieur des groupes de routes. Les auteurs suggèrent que la variance serait caractéristique du type de structure ou du type de route plutôt qu'une variable explicative du risque d'accident importante. Les auteurs concluent que les politiques de régulation et de contrôle automatisé de la vitesse ont plus de potentiel pour diminuer les dégâts et les accidents urbains. En revanche, en ne considérant que les accidents corporels graves, le plus grand potentiel pour réduire l'accidentologie concerne les routes rurales.

Dans le cadre de DIVAS, nous travaillons dans un premier temps sur le risque pour un conducteur seul et avons exclu les interactions entre véhicules. Aussi, nous considérons essentiellement l'aspect géométrique du ruban routier, excluant de fait les intersections. Nous retenons les indicateurs de risque associés à deux catégories : ceux qui ont un impact sur la visibilité et la lisibilité de la route (visibilité, éclairage, marquage, environnement ou largeur du bas coté) et ceux qui ont un impact sur la visibilité et la dynamique du véhicule (nombre de virage et de virages serrés, pente ou longueur de section).

Risque en fonction de la luminosité, du temps

Seuls quelques pays ont des limitations de vitesse différentes pour certaines conditions météorologiques. Dans certains pays, des vitesses conseillées peuvent être affichées sur des panneaux à messages variables. Les pays suivants (ou des régions de ces pays (*)) ont des limitations de vitesse différentes en fonction des conditions météorologiques :

- par temps de pluie : France, Canada, Corée, Mexique, Japon, Royaume Uni
- en présence de brouillard : France, Canada, Corée, Mexique, Japon, Royaume Uni
- en cas de neige : Canada, Corée, Mexique, Japon, Royaume Uni*, et Mexique*
- de nuit : Mexique*, Corée
- en Hiver : en Finlande et en Suède
- vent violent : État de Victoria en Australie.

On peut voir sur la figure 1.9 que les règles d'adaptation de la vitesse en conditions adverses

n'a pas été correctement transposée aux routes rurales, les auteurs n'ont pas de taux d'accidents sur ces tronçons mais uniquement le nombre d'accidents.

sont nombreuses et dépendent aussi bien des phénomènes météorologiques que du type de route. La mise en application de ces recommandations reste du domaine du conducteur qui méconnaît encore trop souvent ces règles. Toutes ces modifications correspondent à une gestion globale du risque en conditions adverses et concernent des adaptations à l'intention de tous les conducteurs.

	Hors intempéries	Pluie	Visibilité inférieure à 50 mètres (brouillard)	Dispositions spéciales	
				Usage de pneus cramponnés	Elèves conducteurs et conducteurs novices (moins de 2 ans de permis, hors intempéries)
Autoroutes interurbaines	130 km/h	110 km/h	50 km/h	Vitesse maximale limitée à 90 km/h	110 km/h
Autoroutes urbaines et routes à deux chaussées séparées	110 km/h	100 km/h	50 km/h		100 km/h
Autres routes hors agglomérations	90 km/h	80 km/h	50 km/h		80 km/h
Agglomérations	50 km/h ¹				

¹ Cette limite peut dans certains cas être relevée à 70 km/h sur les sections de route où les accès des riverains et les traversées des piétons sont en nombre limité. Elle est relevée à 80 km/h sur le boulevard périphérique de Paris.

FIGURE 1.9 – Limitations légales de vitesse en fonction du type de réseau et de la météorologie.

[Eisenberg 04] s'est principalement attaché à établir la relation entre précipitations et accidents. Bien que cette étude se concentre sur les accidents de trafic, certaines causes peuvent être transposées à la circulation de véhicules seuls sur route. En particulier, un phénomène physique a été identifié, il s'agit de l'accumulation de produits divers sur la route en période sèche (huile, essence, *etc.*), qui ressortent avec la pluie de façon d'autant plus importante que l'accumulation à été longue. De plus, il semblerait que les faibles précipitations font baisser le risque alors que les moyennes et fortes précipitations l'augmentent. L'explication pour ce deuxième phénomène serait que l'effet de surprise est important, mais qu'avec un pluie fine, les conducteurs sont alertés, adaptent leur vitesse de façon suffisante alors qu'ils ne la modulent pas assez pour des pluies importantes. Il suggère finalement que tous les événements « pluie » ne devraient pas être traités identiquement et qu'il faudrait sensibiliser le conducteur à un accroissement du risque variable en fonction de la hauteur d'eau sur la route, de la date du dernier événement ou de la nature des précipitations (pluie, neige, *etc.*).

[Andrey 93] estime en Australie que la présence de pluie multiplie le risque d'accident par 1,7 et que ce risque revient à la normale dans l'heure suivant la survenue de l'événement. [Brodsky 88] estime aux États-Unis que l'augmentation du risque serait de l'ordre de $\times 2$ à $\times 4$. Ces études tiennent compte de l'ensemble des accidents, y compris les accidents de trafic, particulièrement nombreux en conditions d'adhérence dégradées.

On trouvera dans divers travaux l'exploitation de ces statistiques comme dans [Aron 07] où l'augmentation du risque ρ due à la pluie est définie telle que :

$$\rho = \frac{\text{Taux d'accidents sous pluie} / \text{Taux d'accidents temps sec}}{\text{Kilométrage sous pluie} / \text{Kilométrage temps sec}} \quad (1.3)$$

D'après cette méthodologie de calcul, le risque serait multiplié par 1,5 dans les sections droites et par 1,9 dans les virages.

Le risque d'être impliqué dans un accident en fonction du jour, de l'heure, des conditions d'éclairage ou des conditions météorologiques a été traité dans [Wanvik 09, Eisenberg 04]. [Wanvik 09] étudie le risque en fonction de l'éclairage (*cf.* Fig.1.10). La présence d'éclairage ferait

baisser de 55 % la quantité d'accidents après la tombée de la nuit dans les zones rurales (13 % en ville). Cette baisse est moins importante en conditions météorologiques dégradées. La baisse d'accidents grâce à l'éclairage est seulement de 44 %, 26 % et 26 % en présence respectivement de pluie, de brouillard et de neige, mais les effets restent bénéfiques. L'effet de l'éclairage sur le nombre d'accidents concerne particulièrement les piétons et les cyclomoteurs (-54 % et -66 % d'accidents), puis les voitures et les motos (-47 % et -27 % d'accidents). Il n'y a pas de différence significative en fonction des différents types d'accidents (objets fixes, collisions frontales, *etc.*). Dans l'ensemble la présence d'éclairage réduit de moitié les accidents de nuit. Il faudra noter que la présence d'éclairage n'est pas favorable dans un seul cas : en présence de brouillard.

Accident group	Risk increase on lit roads		Risk increase on unlit roads		Effect	
	Estim.	95% conf. int.	Estim.	95% conf. int.	Estim.	95% conf. int.
All	17%	11%, 22%	145%	124%, 167%	-52%	-57%, -47%
Fair weather	11%	6%, 17%	116%	90%, 138%	-49%	-54%, -43%
Rain	53%	36%, 73%	192%	128%, 275%	-48%	-60%, -31%
Fog ^a	25%	12%, 40%	12%	-5%, 35%	+12%	-8%, +36%
Dry surface	4%	-2%, 11%	135%	106%, 168%	-56%	-62%, -49%
Wet surface	23%	13%, 33%	132%	95%, 176%	-47%	-56%, -36%
Pedestrian	141%	76%, 230%	361%	165%, 700%	-54%	-78%, -7%
Bicycles	81%	61%, 105%	429%	303%, 596%	-66%	-75%, -54%
Moped	48%	30%, 68%	287%	179%, 435%	-62%	-73%, -46%
MC	70%	40%, 107%	131%	49%, 260%	-27%	-55%, +19%
Automobile	-1%	-7%, 5%	88%	69%, 110%	-47%	-54%, -40%
Hit fixed object	-29%	-37%, -19%	44%	20%, 73%	-51%	-60%, -38%
Frontal collision	28%	14%, 43%	144%	92%, 210%	-48%	-60%, -32%
Flank collision	37%	26%, 49%	160%	109%, 223%	-47%	-58%, -33%
Hit animal ^a	109%	79%, 145%	381%	300%, 479%	-57%	-66%, -45%
Rear end coll.	26%	15%, 39%	267%	193%, 358%	-66%	-73%, -56%
120km/h	0%	-15%, 18%	86%	48%, 132%	-46%	-59%, -29%

^a Property damage accidents are included.

FIGURE 1.10 – Augmentation du risque due à l'obscurité et effet de l'éclairage dans différentes situations d'après [Wanvik 09].

Gravité

Si de nombreuses études se focalisent sur l'influence de différents paramètres sur la probabilité d'avoir un accident donc sur la phase « avant » le choc. D'autres études concernent également la gravité des chocs, en particulier pour la sécurité des personnes, l'aspect matériel étant en général relégué au second plan. Les analyses associent des caractéristiques relevées sur les sites d'accidents (vitesse à l'impact, angle d'impact, nature de l'impact) à la sévérité des blessures mesurée à l'aide de l'échelle AIS (« *Abbreviated Injury Scale* »).

Nous présentons les différentes études sur lesquelles nous pourrions nous appuyer afin d'intégrer la notion de gravité dans notre traitement du risque routier.

Définitions et échelles d'usage pour qualifier la gravité

L'échelle AIS, créée vers le milieu des années 60 et qui n'a cessé d'évoluer jusqu'aujourd'hui, est le standard international dès lors qu'il s'agit de classer la sévérité des blessures subies par un conducteur de véhicule motorisé. Elle était conçue pour l'évaluation des lésions au moment de l'impact. Elle offre l'avantage d'être une méthode numérique simple pour hiérarchiser et comparer les blessures par degré de sévérité ainsi que pour standardiser la terminologie décrivant les lésions.

L'échelle AIS identifie 1300 blessures classées selon une échelle allant de 1 (blessure légère) à 6 (au-delà de toute ressource thérapeutique). Le MAIS ou Maximum AIS est la valeur d'AIS la plus élevée chez un blessé ayant subi des lésions multiples. Il est utilisé pour évaluer l'impact

des systèmes de sécurité sur la gravité. Les valeurs d’AIS quantifient les blessures et non les conséquences de celles-ci. C’est une évaluation intrinsèque de la gravité des lésions et non une mesure des incapacités qui peuvent en résulter. L’AIS n’est pas un classement fondé sur le risque vital lié à chaque lésion mais il est bien corrélé avec le risque de décès dans le cas de lésions graves et potentiellement mortelles (AIS>3). Du fait de sa relation non linéaire avec le risque de décès, l’« *Injury Severity Score* » (ISS) lui est préféré aujourd’hui pour sa meilleure corrélation entre gravité globale et probabilité de survie. L’ISS est la somme des carrés des AIS relevés sur trois territoires corporels prédéfinis, sa mesure est inférieure ou égale à 75.

Influence de la vitesse sur la gravité globale des accidents

S’appuyant sur le modèle de [Nilsson 81], [Elvik 04] reconsidère l’évaluation des exposants à utiliser dans des configurations plus précises. Les valeurs des puissances ont été affinées et des intervalles de confiance sont donnés (cf. figure 1.11).

Accident or injury severity	exponent	interval
Fatalities	4.5	(4.1 – 4.9)
Seriously injured road user	3.0	(2.2 – 3.8)
Slightly injured road user	1.5	(1.0 – 2.0)
All injured road users (severity not stated)	2.7	(0.9 – 4.5)
Fatal accidents	3.6	(2.4 – 4.8)
Serious injury accidents	2.4	(1.1 – 3.7)
Slight injury accidents	1.2	(0.1 – 2.3)
All injury accidents (severity not stated)	2.0	(1.3 – 2.7)
Property-damage-only accidents	1.0	(0.2 – 1.8)

Source: T&I report 7402004

FIGURE 1.11 – Évaluation de la valeur de l’exposant pour différentes classes d’accident d’après [Elvik 04].

[Elvik 04] a repris de nombreuses recherches et a tenté d’estimer les valeurs des puissances proposées . Le modèle de Nilsson présenté figure 1.6, p. 12, a été affiné par Elvik. Il relate l’évolution attendue du nombre d’accidents pour une modification donnée des vitesses pratiquées. Traduite en règle empirique, une baisse de 1 % des vitesses se traduirait en une baisse de 4 % des accidents fatals. Elvik propose une classification plus fine (cf. figure 1.11). En particulier, pour le cas « tous accidents corporels confondus », il propose une puissance de 2,7 avec une grande plage d’intervalle (0,9-4,5) et pour le cas « dommages aux biens uniquement », la puissance proposée est 1 (décroissance des accidents proportionnelle à la décroissance de vitesse) avec un intervalle allant de 0,2 à 1,8. Il n’explique pas les raisons de ces intervalles importants, cela pourrait être lié au type de route, au type d’accident, au type de trafic.

Nous pouvons voir sur la figure 1.11 que les intervalles de confiance sont parfois très étendus. Leur fiabilité est discutable et la transposition de ces résultats à d’autres réseaux routiers et à d’autres pratiques de conduite est hasardeuse. Ces données globales nous permettent néanmoins d’observer que les accidents les plus sévères sont les plus impactés par des modifications de vitesses. La mise en œuvre d’un système intelligent d’adaptation de la vitesse aura vraisemblablement un effet plus important sur la mortalité que sur les accidents légers. Ce modèle macroscopique a plus d’utilité pour estimer les effets attendus d’une modification des vitesses sur les accidents sévères ou graves, qu’à être utilisé pour une estimation temps réel et individualisée du risque.

Influence de la vitesse du choc sur la gravité

Concernant la sévérité des accidents, il existe de nombreux indicateurs liés à la violence du choc et son impact sur les occupants du véhicule ou sur les piétons. La plupart des mesures concernant la sévérité des accidents est liée à la vitesse lors de l'impact. À l'instar des différentes mesures et notions de vitesse utilisées pour décrire les vitesses pratiquées sur route, il existe de nombreuses mesures liées à la vitesse, utilisées pour décrire la gravité potentielle des chocs : la vitesse instantanée à l'instant du choc, le différentiel de vitesse entre l'instant du choc et l'instant immédiatement suivant le choc, la décélération moyenne mesurée selon différents pas de temps entre l'instant du choc et l'arrêt du véhicule ou la vitesse finale des véhicules après une collision intervéhiculaire, *etc.*

Les facteurs impactant la sévérité du choc sont très nombreux : le type de choc (obstacle fixe et rigide), la différence de masse lors d'un choc entre véhicules, la différence de hauteur, l'intrusion dans l'habitacle, la direction de l'impact et la partie du véhicule absorbant l'impact, les suite d'un impact primaire (rebond, choc secondaire), *etc.*

Dans des études telles que [Bowie 94], le risque d'accident sévère est relié à la différence de vitesse à l'impact ΔV . Le risque d'un accident modéré ou grave est de moins de 5 % si le différentiel de vitesse n'excède pas 16 km.h^{-1} , mais ce même risque est supérieur à 50 % à partir d'approximativement 50 km.h^{-1} de différence. D'autres études utilisent aussi le ΔV pour associer une notion liée à la vitesse et la gravité des chocs comme l'illustre la figure 1.12

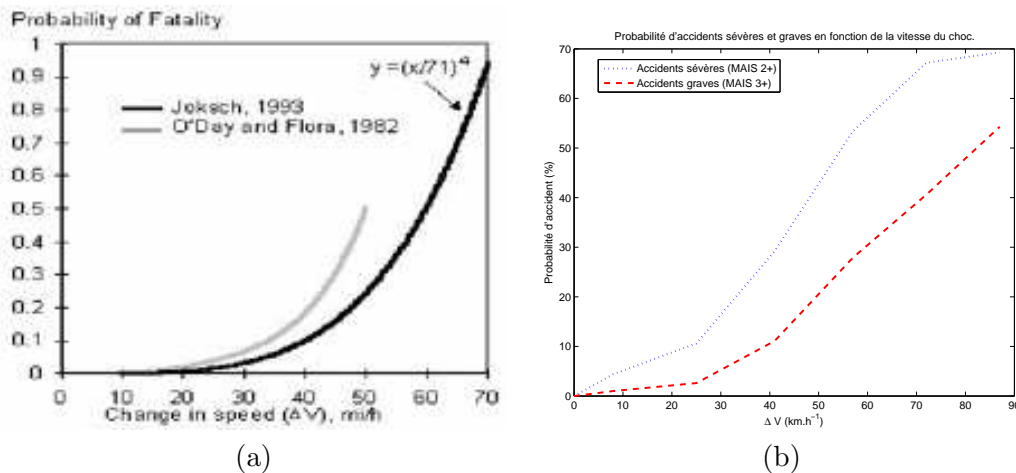


FIGURE 1.12 – (a) Taux de mortalité en fonction de la différence de vitesse à l'impact d'après [O'Day 82, Joksch 93] (a) et risques de blessures moyennes et graves en fonction de la différence de vitesse à l'impact d'après [Bowie 94](b).

De nombreuses études se sont penchées depuis sur la probabilité de blessure d'une gravité donnée ou sur le taux de mortalité en fonction des équipements de sécurité utilisés tel qu'illustré sur la figure 1.13 pour le port de la ceinture. Elles sont effectuées par les fabricants de systèmes de sécurité, les organismes définissant les normes de sécurité ou les pouvoirs publics pour apprécier sous de nombreux angles la gravité des accidents. Certaines de ces études portent sur l'effet des airbags sur la gravité, sur l'impact de diverses caractéristiques des conducteurs (âge, sexe, taille, poids, *etc.*) ou encore sur l'influence du véhicule (poids, hauteur, structure de caisse, *etc.*). Nous présenterons dans le chapitre 2 une méthode d'estimation du risque ouverte permettant éventuellement d'intégrer ces nombreux aspects en fonction des conditions réelles d'utilisation du véhicule par un conducteur donné.

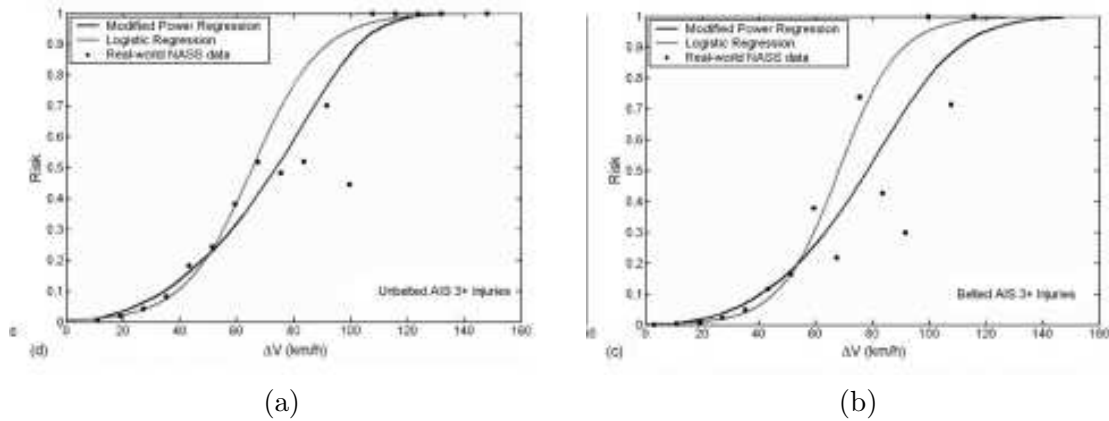


FIGURE 1.13 – Probabilité d’accidents très sévères (MAIS 3+) en fonction de ΔV en $km.h^{-1}$ pour des passagers sans ceinture (a) et avec ceinture (b) d’après [Wood 07].

D’autres études se sont focalisées sur les indicateurs à utiliser afin de mieux interpréter les conséquences d’un choc, en particulier l’Energy Equivalent Speed (ou EES) revient à associer une loi d’évolution de la gravité mesurée par l’énergie cinétique équivalente du conducteur ou du véhicule. Le véhicule peut ne pas être arrêté par le premier choc comme par exemple dans le cas d’un choc d’une voiture contre un autre véhicule à l’arrêt. Pour un même différentiel de vitesse $\Delta V = 20 km.h^{-1}$ il est possible de calculer différentes valeurs d’EES en fonction de la vitesse initiale. La relation entre ces mesures n’est pas linéaire comme illustré sur la figure 1.14, néanmoins l’EES relaterait plus les dégâts occasionnés lors d’un choc alors que le ΔV relaterait mieux la vitesse ressentie par les occupants du véhicule.

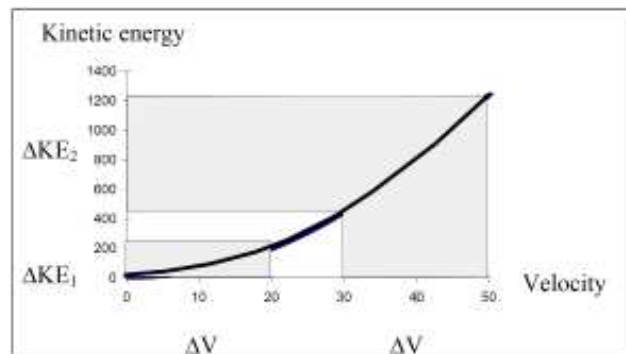


FIGURE 1.14 – Relation entre la mesure de ΔV et la mesure d’EES.

Les mesures associées aux accidents peuvent être liées à des notions physique telle l’EES, à des scénarios tel l’EBS (Equivalent Barrier Speed ou vitesse contre mur) ou des mesures centrées sur l’occupant telles l’OIV (Occupant Impact Velocity) et l’AIV (Acceleration Severity Index). Souvent ces mesures sont utilisées lors de la reconstruction d’accident pour relier la gravité et la vitesse lors d’analyses a posteriori. Certaines d’entre elles telle l’OIV nécessite une observation précise de l’instant de l’accident et est typiquement réservée à l’analyse de chocs en laboratoires. Les travaux [Gabauer 08] montrent que des mesures telles l’EES, l’OIV ou l’ASI n’apportent pas plus de précisions dans l’estimation de la sévérité des accidents qu’une mesure associée au choc plus simple à calculer telle que le ΔV .

Le développement de tests en laboratoire où les conditions initiales sont bien connues et plus récemment l'implantation de capteurs embarqués (EDR ou Event Data Recorders) permettant d'obtenir des mesures en conditions écologiques. [Gabauer 06] a montré que les EDR permettaient de voir l'accélération réellement ressentie par les passagers. En fonction de l'absorption du choc par la voiture, la sévérité n'est pas la même. Une mesure de l'accélération réelle à l'instant du choc permet de voir si il y a eu des points durs dans l'absorption générant des accélérations ressenties extrêmement élevées, même brèves.

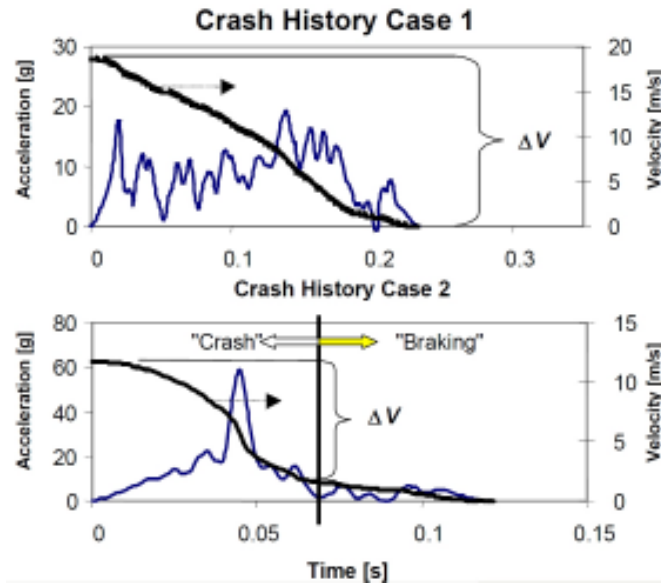


FIGURE 1.15 – Profils de décélération types lors d'un choc contre un obstacle rigide ou un véhicule.

La quantité importante pour l'occupant est l'accélération maximale subie par le conducteur dans l'absolu et lors d'éventuels chocs avec des éléments de l'habitacle. Cette accélération maximale peut être plus ou moins bien contenue par l'orientation du choc, l'absorption de l'énergie par la caisse et la présence d'éléments de sécurité tels que les airbags (*cf.* [IIHS 05]). La figure 1.15 illustre bien l'importance de la nature du choc. En haut, la courbe illustre un choc à haute vitesse contre un autre véhicule. Dans l'instant suivant le choc, les deux véhicules contribuent à absorber l'énergie du choc, puis les véhicules finissent de dissiper leur énergie en freinant ou dérapant. L'accélération maximale instantanée ne dépasse pas les 30 g. En revanche, la courbe du bas illustre la vitesse et l'accélération lors d'un choc à moindre vitesse contre un obstacle rigide fixe. Seul le véhicule peut absorber une part de l'énergie par son élasticité, la variation de vitesse instantanée pour le conducteur peut atteindre 60 g, le choc est beaucoup plus violent et le risque de blessure plus important.

Paramètres spécifiques influençant la gravité

Pour les accidents à haute vitesse (vitesse supérieure à 80 km.h^{-1}), l'étude [Weininger 07] en Autriche associe des descriptions assez complètes des accidents reliés à la gravité des traumatismes subis. Il propose d'identifier les patients à haut risque de trauma sévère en tenant compte de la vitesse pratiquée, de la direction de l'impact et de l'utilisation de systèmes de sécurité (ceinture, airbag). Les informations relevées concernant les accidents sont présentées dans la figure 1.16.

Preclinical data	Clinical data
Circumstances	Injury severity (ISS/AIS)
Accident scene	Injury pattern
Weather condition	
Type of accident	Mortality rates
Collision with moving objects	
Collision with fixed objects	
Over-turning	
Direction of impact	
Frontal	
Side	
Rear	
Entrapment	
Automobile deformation	
Cabin intrusion	
dashboard intrusion	
Steering wheel deformation	

ISS: Injury Severity Score; AIS: Abbreviated Injury Scale.

FIGURE 1.16 – Informations relevées sur les accidents dans [Weininger 07].

Bien que nous n’agissions pas dans la gestion du risque postérieure à l’accident, nous voyons certains des paramètres jugés impactant sur la gravité des chocs. Ils sont relevés et classés par leurs implications sur certains types de lésions mais il ne sont pas classés par dangerosité. En dehors des interactions avec d’autres véhicules, l’orientation du choc et les conditions météorologiques sont considérées comme des les facteurs les plus impactant sur la sévérité des chocs. Nous montrerons dans le chapitre 2 comment il est possible de prendre en compte de tels aspects dans l’estimation du risque.

L’étude de [Mackenzie 08], portant sur un nombre important d’accidents, s’intéresse aux accidents sévères sur les routes départementales d’Australie. Cette fois les catégories de classements présentées sur la figure 1.17 sont plus nombreuses et leurs effets relatifs sur les accidents graves sont quantifiés.

Crash Type	High Injury Severity	Number of Casualty Crashes	Road Alignment	High Injury Severity	Number of Casualty Crashes
MULTIPLE VEHICLE	42%	1237 (25%)	Straight	44%	2982 (59%)
Head On	55%	335 (7%)	Curved - View Obscured	39%	820 (16%)
Rear End	27%	274 (5%)	Curved - View Open	46%	1181 (24%)
Side Swipe	43%	169 (3%)	Unknown	52%	31 (1%)
Right Angle	42%	393 (8%)	Total	44%	5014 (100%)
Right Turn	32%	66 (1%)	Road Feature	High Injury Severity	Number of Casualty Crashes
SINGLE VEHICLE	44%	3741 (75%)	Intersection	39%	760 (15%)
Hit Fixed Object	44%	2050 (41%)	Mid-block	45%	4194 (84%)
Hit Object/Animal on Road	28%	178 (4%)	Other	42%	60 (1%)
Roll Over	47%	1287 (26%)	Total	44%	5014 (100%)
Left Road Out of Control	42%	226 (5%)			
OTHER THAN ABOVE	50%	36 (1%)			
Total	44%	5014 (100%)			

FIGURE 1.17 – Proportion d’accidents sévères parmi les accidents en fonction des conditions (véhicule seul ou pas, visibilité, type de tronçon) d’après [Mackenzie 08].

La segmentation des variables liées aux accidents, proche de celle faite dans [Weininger 07], est cependant différente. Les résultats ne sont pas comparables ni cumulables. De plus, entre la partie gauche du tableau et la partie droite, la segmentation « véhicule seul / véhicules multiples » est refondue dans les statistiques concernant la nature des tronçons (droit ou courbe).

Quelques statistiques sont à noter :

- les collisions avec tonneaux ou choc contre obstacle fixe ont le même taux d'accidents grave, très élevé.
- les collisions frontales sont aussi graves que les chocs contre obstacles fixes (mais il y a en moyenne deux fois plus de personnes impliquées)
- de nuit les accidents sont globalement plus graves (particulièrement les vendredis et samedis)
- les accidents sont proportionnellement plus graves sur route sèche (plus d'accidents faibles et de dérapages sous pluie)
- les accidents en section courante sont globalement plus graves que les accidents aux intersections

D'après [Wood 07], l'analyse de données d'accidents en Grande-Bretagne, en Australie et aux USA montre que pour les collisions générant des accidents graves (hautes valeurs de ΔV), toutes les collisions peuvent être assimilées à des impacts frontaux (l'influence de l'orientation du choc n'est plus prévalente).

1.1.4 Bilan des études portant sur le risque routier

Une des principales variables explicatives du risque est la vitesse : la vitesse en valeur absolue, la vitesse pratiquée comparée aux vitesses légales, la différence de vitesse avec le flux de véhicules environnants, la vitesse par rapports aux caractéristiques de l'infrastructure ou encore la vitesse comparée au 85^e percentile des vitesses pratiquée sur un tronçon. Néanmoins le risque est envisagé dans d'autres études comme ayant d'autres sources telles que les conditions météorologiques (sans discriminations des différents effets sur la visibilité, l'adhérence, *etc.* et indépendamment des vitesses pratiquées). Les variables sont souvent analysées indépendamment alors que les causes des accidents sont souvent multiples.

Prenons pour exemple la notion de risque en fonction de la visibilité par temps de pluie. La pluie est identifiée comme multipliant la probabilité d'accident par deux. Mais cet aspect tient aussi bien compte de la gêne visuelle que de l'impact sur l'adhérence ou encore le stress sensoriel. De même, les statistiques d'augmentation des accidents en Suède (SWOV [Aarts 06a]) en fonction de certaines conditions sont : +26 % dans l'obscurité, +25 % sur route mouillée, +16 % sur glace, +10 % par temps de pluie, +3 % par temps de brouillard. Mais certaines de ces situations se produisent simultanément telles que route mouillée et obscurité par exemple. Ici encore il y a une superposition des résultats qui rend ces analyses difficilement exploitables. Quels sont les paramètres perceptifs et comment sont-ils reliés aux paramètres dynamiques ?

Nous allons aborder le risque comme une probabilité d'accident multipliée par une gravité des conséquences. Les analyses macroscopiques ne peuvent pas être intégrées en amont de la conduite pour estimer un risque d'exposition individuel. Nous envisageons en revanche de les utiliser pour pondérer des catégories d'accidents et des gravités associées dans le cadre de l'utilisation de scénarios.

Nous disposons de statistiques reliant des catégories d'accidents et des gravités (utilisables dans le cadre de scénarios), des modèles d'occurrence d'accidents graves (ce sont des mesures de risque, probabilité d'occurrence d'un événement en fonction de la gravité) et des modèles statistiques de gravité qui relient la vitesse à une sévérité médicale des accidents corporels.

Nous devons donc définir à priori nos priorités d'action et dans quelle mesure nous souhaitons utiliser des modèles préexistants plus ou moins complexes et quelles statistiques utiliser. Pour commencer, nous devons décider si nous souhaitons estimer un indice de risque de façon continue (tous types de routes, toutes conditions de trafic, géométriques ou de météorologie), semi-continue (tous le temps sur certaines routes par exemple) ou discret (ponctuellement sur des points particuliers).

Concernant la nature et la quantité de ces accidents, ils sont très nombreux en ville et impliquent souvent des piétons et occasionnent des dégâts matériels; en revanche sur routes nationales et départementales, ils sont très graves sur le plan des traumatismes. Nous ne pouvons pas utiliser les mêmes outils et les mêmes indices pour traiter ces différents cas. Concernant la nature des accidents, les causes ne sont pas claires pour ce qui est des accidents en ville (causes multiples, acteurs et facteurs extérieurs nombreux). En revanche, pour ce qui est des accidents hors trafic, il a déjà été identifié dans [Sentouh 06] qu'en dehors du trafic, les accidents ont deux sources, les aspects liés à la dynamique et les défaillances du conducteur. Nous souhaitons traiter prioritairement les situations hors trafic, hors agglomération. Nous pourrions donc traiter la situation en intégrant des paramètres mécaniques et des paramètres propres au conducteur.

Dans la section suivante, nous allons voir quelles mises en œuvre existent afin d'estimer ou de contenir le risque de façon statique ou dynamique.

1.2 Prévention des risques et aides à la conduite

1.2.1 Systèmes de gestion du risque

Concernant la gestion du risque, il existe de nombreux moyens d'intervention. Certains sont passifs et agissent lors de la survenue de l'accident (ceinture de sécurité, airbags, *etc.*), certains sont actifs et interviennent dans l'instant précédent l'accident (collision mitigation), mais dans ces deux cas la prévention de l'accident n'est plus envisagée. Les limitations de vitesse officielle et la législation (sur l'alcool et les drogues par exemple) interviennent dans la gestion globale du risque. Si on considère le risque comme la combinaison d'une probabilité d'accident et de ses conséquences, les systèmes passifs ainsi que les systèmes de gestion du risque après la survenue de l'accident, ne peuvent intervenir que sur la gravité.

C'est le cas d'une étude telle que celle présentée dans [Oh 01] proposant une estimation de la probabilité de survenue d'un accident localement par l'observation de données en temps réel de trafic recueillies grâce à des boucles électromagnétiques. D'après les séries statistiques observées dans le temps, l'auteur identifie un certain nombre de macro-facteurs corrélés avec l'apparition d'un accident ou précurseurs de la présence d'un accident (trafic, vitesse moyenne sur un tronçon, déviation de la vitesse attendue sur ce tronçon). Il est ainsi capable d'exprimer une probabilité de survenue d'accident en fonctions de ces paramètres relevés en temps réel. Les probabilités de survenue d'accident sont toujours extrêmement faibles, mais il propose de lever une alarme de danger potentiel lorsque la probabilité franchit un seuil nettement supérieur au seuil dans des conditions nominales (même en absence d'accidents, son estimation du risque de survenue d'accident n'est jamais nulle, cela correspond au risque nominal). Cette estimation en temps réel du risque est intéressante mais très difficile à utiliser afin de prévenir la survenue d'accident. Il peut éventuellement être utilisé afin de préparer ou d'anticiper la survenue d'un accident du point de vue de la prise en charge et de la gestion des soins.

Nous pouvons analyser les mises en œuvre de sécurité et de gestion des risques routiers en se référant à leur implication par rapport à l'instant de survenue de l'accident comme l'illustre le schéma de la figure 1.18.

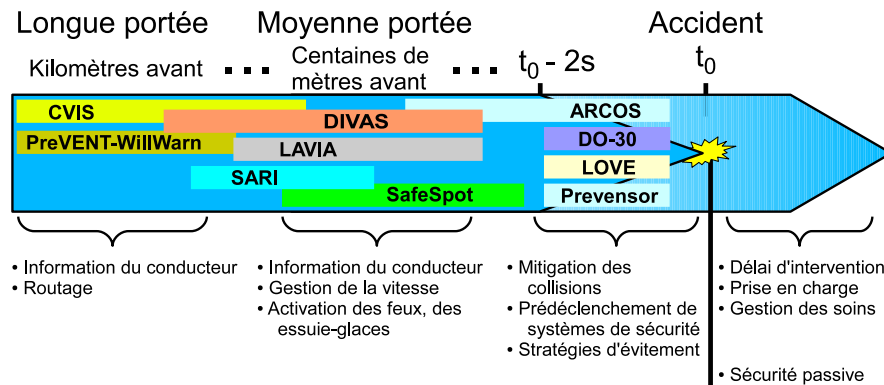


FIGURE 1.18 – Gestion du risque dans le temps de l'accident et projets intervenant sur le domaine.

Le projet DIVAS vise à permettre aux conducteurs d'être dans les meilleures conditions possibles pour affronter les difficultés du trajet et à permettre d'aider le conducteur à mieux adapter son comportement lorsqu'une situation dégradée du point de vue de l'infrastructure ou l'environnement survient. Ce système intelligent d'adaptation de la vitesse (ISA) implique une intégration véhicule-infrastructure et bien que cela ne constitue pas son objectif premier, ces données peuvent être utilisées afin d'agir encore plus en amont sur le trafic ou pour détecter localement les conditions météorologiques. Le projet met en avant les interactions et le rôle des gestionnaires d'infrastructure dans le relevé, l'entretien, la diffusion des données et l'architecture technique. Mais le développement, le test et la mise en place d'un ISA implique également une réflexion profonde sur la notion de vitesse de référence et la législation actuelle.

Nous décrivons dans la suite les principaux systèmes de sécurité, à commencer par l'infrastructure et les systèmes de sécurité passifs. Puis nous nous intéressons aux projets récents d'envergure ayant pour objectif d'améliorer la sécurité routière qui sont illustrés sur la figure 1.18. Nous décrivons leurs objectifs leurs modalités d'actions et les implications techniques et technologiques nécessaire à leur bon fonctionnement et décrivons plus précisément le projet DIVAS.

Aménagements routiers

Les aménagements routiers contribuent à la prévention et à la limitation des risques liés aux accidents de la route. L'ensemble des normes de construction concernant les caractéristiques de la route (largeur, pente, rayons de courbure, séparation physique des voies, *etc.*), concernant la visibilité (visibilité géométrique, visibilité en dépassement, en haut de côte, *etc.*) ou les marquages routiers sont autant de mises en œuvre permettant aux conducteurs de mieux gérer et anticiper les situations accidentogènes, de limiter les configurations intrinsèquement dangereuses.

L'ensembles de ces normes et aménagements ont un effet sur la sécurité qui peut être parfois difficilement mesurable. La présence d'un rail de sécurité permettra de limiter avec une quasi certitude l'ensemble des accidents entre des véhicules face à face, mais une meilleure lisibilité de la signalisation horizontale et verticale lui permettront d'être plus vigilant vis à vis du reste de son environnement. Pour l'instant considérés comme passifs, ces systèmes ont vocation à évoluer et à devenir dynamiques, interactifs et coopérants (marquages horizontaux adaptatifs, panneaux à message variable associés à des outils de caractérisation du trafic ou de la météorologie).

Les systèmes de sécurité passifs

Les systèmes de sécurité passifs sont présents en permanence à bord du véhicule. Ils ont vocation à être fonctionnels lors de la survenue d'un accident. Ils visent en général à brider la dangerosité des chocs pour les occupants. On compte parmi les systèmes de sécurité passifs la ceinture de sécurité, l'airbag, la capacité d'absorption mécanique de la caisse, l'appuie tête ou les barres de renfort latérales.

Leurs effets ne sont pas facilement mesurables et dépendent du taux de pénétration de ces technologies et méthodes dans le parc automobile. De nombreuses études concernant la sévérité des traumatismes liés aux accidents de la route avec et sans certains de ces systèmes de sécurité existent néanmoins. L'étude [Gabauer 08] caractérise l'effet sur les blessures sévères de l'utilisation de ceinture de sécurité pour le conducteur dans un véhicule équipé d'airbag comme l'illustrent les courbes de la figure 1.19.

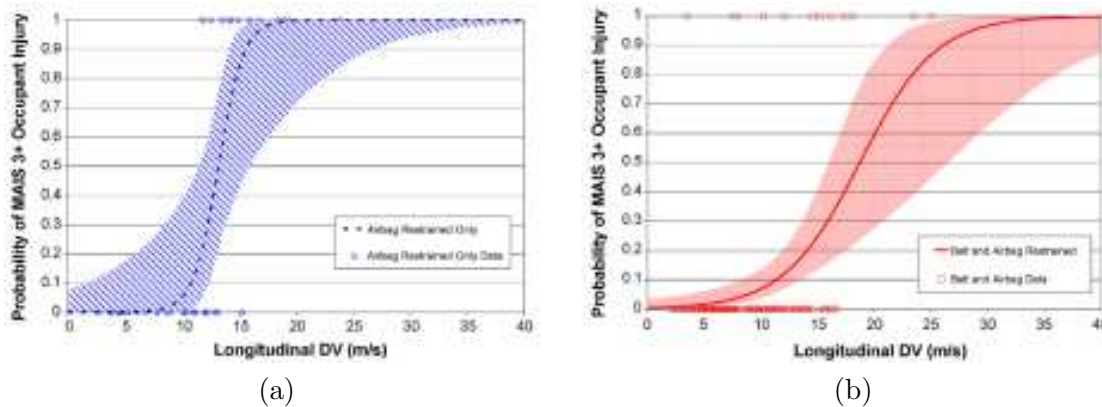


FIGURE 1.19 – Probabilité d'accidents très sévères (MAIS 3+) en fonction de ΔV en $m.s^{-1}s$ pour des passagers sans ceinture (a) et avec ceinture (b) d'après [Gabauer 08].

La comparaison des figures 1.19 (a) et (b) illustre qu'avec un choc à une vitesse importante, la probabilité d'accident sévère est inférieure en présence de ceinture. Connaissant la distribution des vitesses de choc et la présence ou non de systèmes de sécurité passifs, il serait possible d'estimer le potentiel de sécurité de ces technologies et leur portée sur l'accidentologie. Il serait envisageable d'estimer ainsi le nombre d'accidents fatals passés à sévère, le nombre d'accidents sévères passés à léger et le nombre d'accidents légers qui n'auraient pas prêté à conséquences. Il faudrait néanmoins tenir compte de l'orientation des chocs car la portée et l'efficacité de ces systèmes est fortement dépendante de cet aspect.

L'ensemble des systèmes passifs n'entre en jeu qu'après la survenue du choc. Les systèmes de sécurité actifs en revanche cherchent à agir sur l'occurrence ou non de l'accident et sur les conditions dans lesquelles il survient, en agissant en amont de l'accident. Ce sont les aides à la conduite dont certaines sont bien connues, implantées dans les véhicules depuis de nombreuses années, telles l'ABS (Anti blocking system), l'ESP (Electronic stability program), les limiteurs et contrôleurs de vitesse.

1.2.2 Systèmes de mitigation du risque

Nous avons présenté sur la figure 1.18 les différents niveaux d'intervention pour la prévention et la gestion du risque routier. Avant l'accident, il est courant de distinguer une période d'une durée d'une à deux secondes précédant l'impact. Il est d'usage de considérer durant cette

période que l'accident est inévitable si la situation perdure, qu'il n'est plus temps d'informer le conducteur et qu'il faut intervenir dans la situation accidentogène présente. Les objectifs peuvent concerner les chocs contre les obstacles comme c'est le cas par exemple du projet D030 (détection d'obstacles à 30 m) ou du projet ARCOS (Action de recherche concertée en sécurité routière), elles peuvent concerner les sorties de voie comme c'est le cas du projet Prevensor (Prévention des sorties de voie) ou elles peuvent concerner les piétons comme c'est le cas du projet LOVE (Logiciels d'observation des vulnérables). Les stratégies mises en places pour intervenir dans le laps de temps très court avant l'accident sont des automatisations telles qu'un freinage d'urgence (FU) automatique, une correction du cap du véhicule afin d'éviter la sortie de voie ou d'optimiser la direction du choc, la mise en préparation d'autres systèmes de sécurité comme la prétention des ceintures ou un déclenchement anticipé de l'airbag.

Ces systèmes s'appuient pour l'instant uniquement sur les capteurs proprioceptifs et extéroceptifs du véhicule. Ils n'utilisent qu'une connaissance de l'environnement proche du véhicule et ne mettent pas en jeu de communications entre les véhicules ou entre véhicules et infrastructure. Les capteurs proprioceptifs sont les odomètres mesurant la vitesse des roues, la mesure d'angle au volant, la centrale inertielle, la présence d'ABS, le GPS, *etc.* Les capteurs extéroceptifs sont des caméras, des RADARs (RADio Detection And Ranging) ou des LIDARs (LIght Detection And Ranging). Ils ont en général pour objectif de détecter les obstacles potentiels ou les vulnérables et permettent de les localiser dans l'environnement du véhicule. Dans le cadre du projet DO-30 par exemple, l'utilisation d'un système de stéréovision embarqué permet de détecter les obstacles d'au moins 20 cm sur la voie du véhicule comme illustré sur la figure 1.20. Ces obstacles ne sont pas identifiés mais ils présentent un danger potentiel pour le véhicule en fonction de la vitesse. Le projet LOVE s'est appuyé sur la même architecture matérielle et logicielle que DO-30 mais l'objectif était de détecter spécifiquement les vulnérables et en particulier les piétons. Dans le cadre du projet ARCOS, les obstacles sont détectés à l'aide d'un LIDAR. Celui-ci a l'avantage de la portée et de la précision par rapport aux caméras, il ne permet pas en revanche d'effectuer des tâches multiples telles que la détection de voie ou la détection de panneaux de signalisation et ne permet pas non plus d'analyser le type d'obstacle détecté (véhicule, vulnérable, infrastructure).



FIGURE 1.20 – Détection d'obstacle par stéréovision proposée dans le projet DO-30.

Les propositions consistant à intervenir pour une meilleure sécurité routière en amont de cette phase précédant l'accident ne visent pas à optimiser les conditions de sécurité d'un accident mais plutôt à essayer de prévenir les accidents.

1.2.3 Systèmes d'anticipation du risque

De nombreuses modalités peuvent être envisagées afin d'améliorer la sécurité des usagers de la route avant la survenue d'une situation accidentogène. Les modalités d'interaction avec les conducteurs ont évolué en même temps que les technologies et les législations concernant ces moyens.

Le projet SARI est emblématique des directions prises pour améliorer la sécurité par un intégration infrastructure-conducteur. Ce projet propose des méthodes de diagnostic de l'infrastructure afin de détecter les points potentiellement difficiles et prévenir le conducteur localement d'une difficulté sur son trajet au travers d'une signalisation dynamique. La source du danger peut être expliquée au conducteur et une solution pour franchir cette difficulté est éventuellement proposée au conducteur. Utilisant des capteurs de bord de voie reliés aux panneaux de signalisation, SARI propose une signalisation dynamique capable de tenir compte de certains aspects tels que la présence de pluie ou d'un vent fort afin de prévenir des risques dynamiques induits par l'environnement.

D'autres projets tel ARCOS abordent la sécurité au travers de la coopération véhicule conducteur. en proposant d'étudier les modalités de détections de dangers à courte portée et l'efficacité des interfaces homme-machine (IHM), le projet laisse résolument le conducteur maître de son véhicule mais vise à lui permettre d'anticiper au mieux. Le projet LAVIA aborde l'aide aux conducteurs d'une façon radicalement différente. Partant du principe qu'il y a une bonne corrélation entre taux de dépassement des vitesses légales et accidentologie, le projet propose les moyens d'informer ou de brider le conducteur en fonction des vitesses légales. Les modalités d'action sur la vitesse ont été envisagées à différents niveaux. L'efficacité d'une simple information du conducteur des vitesses légales a été comparée à un bridage automatique de la vitesse du véhicule. La conformation des conducteurs aux prescriptions légales étant jugée comme ayant un fort potentiel de sécurité comme nous l'avons souligné en présentant les modèles reliant vitesse et accidentologie ([Nilsson 81, Nilsson 04, Elvik 04]) et les études étudiant le potentiel de sécurité de baisses globales des vitesses (*cf.* [Carsten 05]).

Le projet ARCOS traite non seulement de problématiques pour améliorer le véhicule autonome comme nous l'avons décrit précédemment, mais envisage de permettre au véhicule de communiquer avec d'autres véhicules dans un premier temps ou avec toute infrastructure communicante ensuite. Cela étend le domaine d'action et permet de prévenir les autres usagers d'une situation accidentogène. Les moyens de perception embarqués des véhicules ne leur permettant pas d'avoir accès à des informations sur leur environnement lointain, seuls des moyens de communication avec d'autres véhicules ou avec l'infrastructure permettraient aux véhicules d'étendre leur horizon électronique pour une meilleure anticipation des risques.

Sur ces considérations, des projets tel SafeSpot ont contribué à développer les aides à la conduite utilisant un environnement communiquant et coopératif au travers de cartographies multicouches, chaque couche devenant de plus en plus précise et dynamique. Un certain nombre de projets ont étudié les possibilités offertes par les communications afin d'améliorer la sécurité. Le projet TRACKSS propose que d'autres véhicules ou des éléments de l'infrastructure à portée optique puissent donner des informations au véhicule, puis au conducteur. Les panneaux peuvent renseigner leur contenu, levant ainsi la problématique de lisibilité et les véhicules informent sur certaines de leurs caractéristiques ou leur état (en cours de freinage par exemple). Ces informations peuvent dans un premier temps être directement utilisées par le conducteur, mais elles pourraient ultérieurement être utilisées par des systèmes de sécurité plus complexes nécessitant ce type d'informations. Ces projets permettent d'informer les conducteurs sur leur environnement à courte et moyenne portée, le conducteur restant libre de sa conduite.

Certains projets tels CVIS ont abordé la problématique des communications en tant que tel pour des véhicules communicant entre eux ou avec l'infrastructure. Ce projet traite de la problématique technique et structurelle d'une architecture ouverte reliant les divers acteurs communicants du réseau routier. Elle pose les bases pour le développement des futurs systèmes de coopération et d'interaction entre véhicules-infrastructure et conducteurs. Ce projet vise à exploiter les communications afin d'améliorer et d'étendre l'horizon électronique du véhicule à moyenne et à longue portée. D'autres projets ont présenté les potentialités des communications en terme de sécurité. Ne se fondant quasiment que sur les communications, certains projets tel PreVENT-WillWarn, préfigurateur du projet CVIS, ont pour objectif d'avertir le conducteur en le prévenant de situations accidentogènes en dehors de son champ de vision.

L'ensemble de ces dispositifs contribuent à améliorer la sécurité des usagers de la route. Ils ont pour vocation de prévenir le conducteur des dangers et le laissent libre d'adapter sa vitesse ou son attention afin de franchir les dangers potentiels. Entre l'information du conducteur à moyenne ou longue portée et la prise en main d'une partie du contrôle du véhicule aux très courtes portées, la question de mettre le conducteur dans les meilleures dispositions pour franchir les divers obstacles de la route reste posée.

Enfin, certains systèmes ont pour objectif d'agir en amont en mettant le conducteur en situation d'affronter dans les meilleures conditions les événements de la route. C'est à cette catégorie qu'appartient le projet DIVAS. L'objectif de ce projet emprunte de multiples aspects des travaux existants dans le domaine de la sécurité routière. Le risque routier est abordé comme une problématique complexe faisant intervenir le conducteur, son véhicule, l'infrastructure et l'environnement.

1.2.4 Le projet DIVAS

Le projet DIVAS, Dialogue Infrastructure Véhicule pour Améliorer la Sécurité routière a débuté en 2007. Il est financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et vise au développement d'une architecture intégrant véhicule et infrastructure afin que le conducteur ait une vitesse adaptée au franchissement des obstacles potentiels. Il ne s'intéresse au risque que du point de vue du conducteur seul et vise à expérimenter le potentiel de sécurité d'un système d'échange d'informations entre véhicules et infrastructure. Le projet vise entre autres à mettre en avant l'influence capitale de certains paramètres de l'infrastructure et le rôle qu'auraient les gestionnaires de route dans le déploiement de tels systèmes dans la mesure où ils sont les plus à même de caractériser et de maintenir à jour les données de leurs infrastructures.

Le concept général est que l'infrastructure met à disposition du conducteur une offre de sécurité en conditions nominales (hors trafic, beau temps, route sèche). En présence de cette offre de sécurité nominale, les conducteurs adaptent leur vitesse en fonction des limites de vitesse légale et du risque perçu, qui est une fonction complexe dépendant du triplet infrastructure-véhicule-conducteur. Une observation statistique des vitesses pratiquées le long d'un trajet pour des conducteurs experts sur des véhicules en parfait état de fonctionnement en conditions nominales permet de faire ressortir un profil de vitesse nominale dont nous avons pu vérifier qu'il dépendait principalement de paramètres propres à l'infrastructure tels que le rayon de courbure des virages ou la pente.

L'objectif est de proposer aux conducteurs une vitesse de conseil individualisée et dynamique qui prenne en compte des aspects propres au véhicule, au conducteur, à l'infrastructure et à l'environnement routier, au travers des notions d'adhérence et de visibilité en particulier. Nous avons proposé une méthode d'estimation d'un indice de risque en conditions embarquées, cet indicateur est représentatif de l'exposition au risque par l'utilisation de scénarios d'accidentologie

représentatifs des accidents sur routes secondaires. L'accidentologie en France ayant fortement évolué ces dernières années et en particulier depuis la mise en place de la politique de contrôle sanction. Le projet DIVAS s'est attelé à mettre à jour les données d'accidentologie afin que la prise en compte de scénarios soit la plus pertinente possible et corresponde au cas qui nous intéresse plus spécifiquement : les accidents de véhicules hors trafic sur route secondaires.

Lorsque les conditions extérieures dégradent l'offre de sécurité nominale (de nuit, présence de pluie ou de brouillard), nous estimons cet indice de risque dans les conditions courantes et le comparons à sa valeur en conditions nominales. La vitesse est modulée de telle sorte que l'exposition au risque en conditions dégradées soit égale à l'exposition au risque en conditions nominales. Afin de pouvoir apprécier la dégradations des conditions de circulation, le projet DIVAS s'est focalisé sur deux notions particulièrement impactantes que sont l'adhérence et la visibilité.

Lorsqu'elles existent, les méthodes de la bibliographie permettant d'estimer les paramètres des modèles d'adhérence et de visibilité ont été utilisées. Dans d'autres cas comme pour la détection embarquée de la présence de pluie ou de brouillard de nuit, les techniques permettant d'alimenter le modèle d'estimation du risque par des indicateurs liés à l'adhérence et à la visibilité ont été développées dans le cadre du projet.

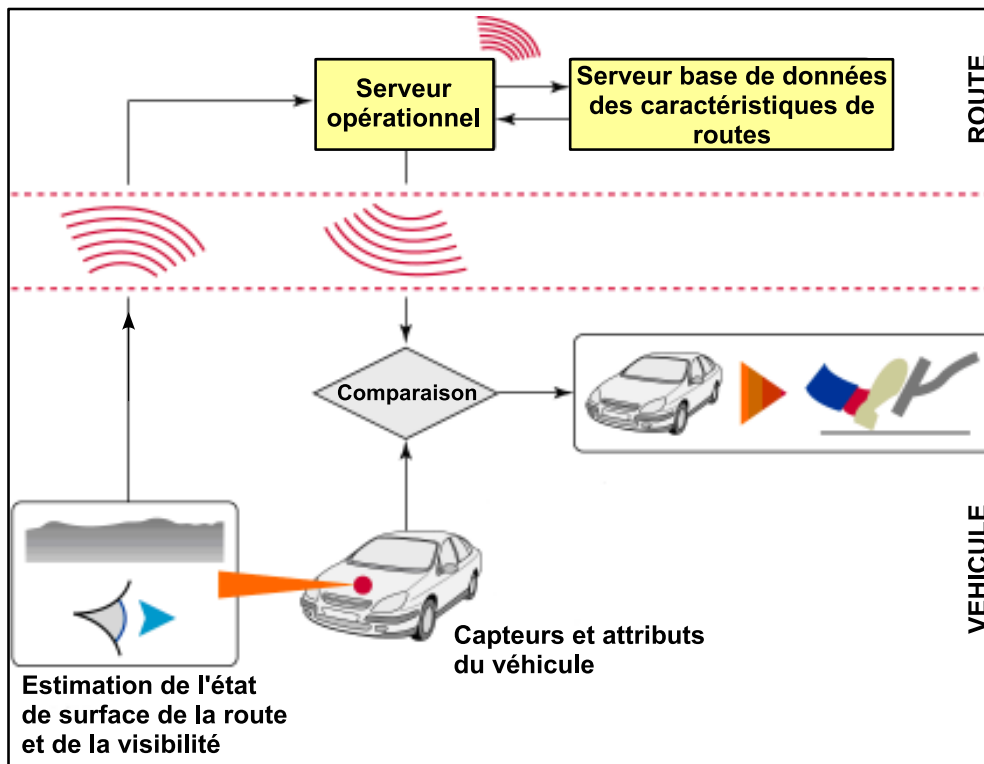


FIGURE 1.21 – Schéma de principe des échanges de données dans le cadre du projet ANR-DIVAS.

Le projet vise également à vérifier la faisabilité technique, l'acceptabilité et la crédibilité d'une vitesse de conseil calculée par de telles méthodes. L'architecture permettant de parvenir à ces résultats est présentée sur la figure 1.21. En s'appuyant sur les technologies actuelles et les futures technologies innovantes en matière de communication sans fil, le projet met en avant qu'un dialogue permanent entre l'infrastructure et les véhicules offrirait un gain de sécurité.

Dans cette perspective, une architecture pertinente a été proposée, elle s'appuie sur trois composants principaux :

- un serveur de base de données contenant les caractéristiques brutes relevées par les divers instruments de mesure
- un serveur opérationnel contenant les dernières données, à jour et géolocalisées, qui peuvent être transmises et correctement interprétées par les véhicules
- une unité de traitement embarquée connectée au serveur opérationnel et aux divers capteurs embarqués (bus CAN ou autres, caméra *etc.*).

Les données transmises aux véhicules sont des données fonctionnelles dans la mesure du possible. Les données du serveur de base de données ont été traitées à l'aide d'algorithmes utilisant des modèles permettant de convertir les données des capteurs en des données exploitables. L'exploitation pratique est ainsi simplifiée, le serveur de base de données est alimenté en données brutes, sitôt l'acquisition des données faite, elles peuvent être renseignées sans pré-traitement. Les modèles permettant de passer à des grandeurs physiques utiles sont codés dans le serveur opérationnel et peuvent évoluer au gré des évolutions matérielles ou des évolutions des modèles physiques utilisés. Le serveur opérationnel peut envoyer des données simples et intelligibles dans le système standard international. Elles pourront être utilisées par l'unité de traitement embarquée pour tout système de sécurité.

1.3 Bilan sur l'accidentologie et le traitement des risques routiers

Les enjeux de sécurité routière peuvent être traités à différents niveaux. Au niveau des politiques de sécurité routière au travers de la réglementation, au niveau de l'infrastructure par les méthodes de construction et d'aménagement des routes, au niveau des constructeurs et équipementiers automobiles par les systèmes de sécurité embarqués dans les véhicules ou enfin, au niveau de la gestion des soins après l'accident.

On distinguera parmi les mises en œuvre visant à améliorer la sécurité routière des modalités statiques et dynamiques. La notion « dynamique » dans le domaine de la sécurité routière concerne les systèmes en mesure de s'adapter instantanément à une situation donnée. Bien que les politiques ou les aménagements routiers changent dans le temps (adaptation de la signalisation et des vitesses pour travaux, étendage de sel sur les routes en présence de neige, *etc.*), les modifications et ajustements se font en général selon des temporalités lentes (journalières, hebdomadaires, mensuelles, annuelles). Ces adaptations ne sont pas qualifiées de dynamiques.

Concernant les moyens de prévention et d'intervention pour la sécurité embarqués dans le véhicule, certains sont « passifs » et interviennent après la survenue de l'accident (ceinture de sécurité, airbags, *etc.*), certains sont « actifs » et interviennent dans l'instant précédent l'accident (mitigation des collisions). Mais dans ces deux cas, la prévention de l'accident n'est alors plus envisagée. Dans le cadre du projet DIVAS, nous n'intervenons pas sur les politiques de sécurité (en amont) ni à l'instant du choc ou après (en aval). Notre objectif est de proposer une méthode permettant de prévenir des accidents potentiels qui soit adaptée à la situation dans laquelle se trouve le conducteur.

Concernant les systèmes dynamiques de gestion et de prévention du risque, plusieurs projets d'envergure nationale ou internationale faisant intervenir des acteurs multiples ont proposé des mises en œuvre fondées sur différentes considérations de sécurité ou de risque : ARCOS (gestion des interdistances entre véhicules, mitiger les collisions sur obstacles fixes ou roulants, prévenir les sorties de route, alerter les véhicules en amont d'accidents, *etc.*), le sous-projet SAFELANE

de PREVENT (prévention des sorties de voie), PREVENSON (risque de sortie de voie). Ces systèmes ont pour objectif d'agir en amont de l'accident en mettant le conducteur en situation d'aborder dans les meilleures conditions la route dans des conditions données. C'est dans cette catégorie que s'inscrit la démarche de DIVAS.

Adaptation de la vitesse au risque

Sommaire

2.1	Vitesse pratiquée et vitesse de référence	34
2.1.1	Vitesses observées, la V_{85}	35
2.1.2	Vitesse légale et vitesse de conception	37
2.1.3	Vitesses calculées d'après un modèle, la V_{SAVV}	41
2.2	Adaptation de la vitesse	42
2.2.1	Fonctionnement des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse	42
2.2.2	Adaptation de la vitesse en ligne droite	44
2.2.3	Adaptation de la vitesse en virage	49
2.2.4	Acceptabilité	50
2.2.5	Potentiel des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse	51
2.2.6	Bilan bibliographique et propositions	54
2.3	Méthode de calcul de la vitesse de conseil proposée	56
2.3.1	Utilisation d'une vitesse de référence à moduler	57
2.3.2	Modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure	58
2.3.3	Calcul du profil de vitesse en freinage d'urgence (FU)	59
2.3.4	Utilisation de statistiques de risque et de gravité	61
2.3.5	Estimation d'une exposition totale au risque	64
2.4	Bilan et perspectives	73

Nous évoquons dans une première partie les différentes notions de vitesse utilisées dans le domaine de la sécurité routière et proposons de nous appuyer sur l'une d'elles comme vitesse de référence, la vitesse V_{85} (85^e percentile des vitesses pratiquées hors trafic). Nous présentons d'autres méthodes alternatives permettant d'obtenir par des moyens plus économiques une autre vitesse de référence. Nous présentons ensuite les différentes mises en œuvre d'ISA (*Intelligent Speed Adaptation system*), leurs modalités de fonctionnement et leur portée potentielle pour la sécurité routière. Nous présentons également les propositions de vitesses de la bibliographie permettant d'estimer une vitesse de conseil en fonction d'un certain nombre de facteurs propres au véhicule, au conducteur, à l'infrastructure et à l'environnement.

C'est sur certains de ses modèles que nous nous appuyons afin de considérer le comportement dynamique du véhicule ou d'intégrer diverses caractéristiques des routes et de leur environnement. Par la suite, nous proposons une méthode de calcul pouvant être utilisée dans le cadre

d'un ISA-dynamique et qui comporte deux nouveautés majeures. D'une part, nous considérons que le 85ème percentile des vitesses (V_{85}) est une vitesse pratiquée et praticable en conditions idéales, et nous proposons de la moduler en conditions dégradées (approche top-down). D'autre part, cette méthode tient compte de la gravité potentielle et de la probabilité d'occurrence de grandes typologies d'accidents. À partir de scénarios de référence, nous estimons le delta de vitesse permettant de ramener l'exposition au risque en conditions dégradées à son niveau en conditions idéales

[Varhelyi 02] pose une série de questions relatives aux différents ISA.

1. Dans quelles situations les conducteurs sous-estiment t'ils le risque et donc échouent dans le choix de la vitesse appropriée ?
2. Quelle est la vitesse appropriée dans une situation critique donnée ?
3. Comment un ISA doit t'il être conçu ?
4. Quelles solutions techniques peuvent être mises en œuvre ?
5. Quel est le niveau d'acceptation ?
6. Quelles sont les effets sur la sécurité routière et les autres implications ?

Nous cherchons à intégrer le risque lorsque les conditions de circulation se dégradent du point de vue de la visibilité et de l'adhérence. Deux méthodes permettraient de parvenir à un tel résultat. La première consiste à modéliser le conducteur, le véhicule, leur relation et le comportement de conduite du conducteur, tout ceci dans un environnement qui devrait être variable en fonction des conditions détectées. Cette approche est appelée « *bottom-up* » et est largement fondée sur l'utilisation de modèles. L'autre approche consiste à déterminer quelle est la vitesse de référence en conditions idéales, et lorsque des dégradations de l'environnement de conduite surviennent, à estimer quelle modulation de vitesse serait appropriée pour conserver mobilité et sécurité. Cette seconde approche, « *top-down* » utilise également des modèles, mais nous cherchons à nous appuyer sur une vitesse de référence qui soit pratiquée et praticable. Il est très difficile dans une approche purement modèle d'intégrer tous les aspects de l'environnement. Alors qu'en s'appuyant sur une vitesse de référence pratiquée, nous bénéficions de l'expérience du ou des conducteurs ayant servi à construire la référence et qui ont intégré de nombreux aspects tels que la qualité de la route, l'environnement proche, la visibilité et la lisibilité de la voie. En partant d'une référence proche de la solution en conditions idéales, nous pensons que les vitesses proposées en conditions dégradées n'en seront que plus réalistes, ce qui aura pour effet d'améliorer la crédibilité et l'efficacité.

Nous illustrons la vitesse de conseil en fonction de l'adhérence et de la visibilité sur une portion de route départementale. Nous décrivons les possibilités techniques existantes d'estimation de l'adhérence en temps réel tel qu'elles ont été prévues dans DIVAS. Nous montrons que nous sommes en mesure de prendre en compte une portée visuelle limitée pour le conducteur et les effets d'une baisse de visibilité sur les vitesses. Nous ne rentrons pas dans le détail des définitions et des moyens de caractérisation de la visibilité routière puisque cela fait partie du chapitre suivant.

2.1 Vitesse pratiquée et vitesse de référence

Les notions de vitesses doivent être éclaircies car elles peuvent prendre des sens précis et différents en fonction des domaines d'application et des acteurs de la sécurité routière. Concernant les études statistiques d'accidentologie, l'ONISR relève que « Pour rendre compte du comportement de l'utilisateur, de jour comme de nuit, sur tous les types de réseaux et de véhicules, plus de

700 données différentes concernant les vitesses moyennes et les taux de dépassement des vitesses limites autorisées sont recueillies ». Dans le domaine de l'accidentologie, les trois indicateurs synthétiques les plus utilisés sont le taux de dépassement de la vitesse limite autorisée, les taux de dépassement de plus de 10 km.h^{-1} et le pourcentage de dépassement des vitesses limites autorisées de plus de 15 km.h^{-1} .

Concernant les domaines de la conception routière et de la recherche appliquée à la sécurité routière qui développe des systèmes tels que les ISAs que nous exposons dans la suite, les vitesses auxquelles se réfèrent les études sont la vitesse limite autorisée (dénotée V_{LEGALE}), la vitesse de conception (dénotée V_{INFRA}) et le 85^e percentile des vitesses (dénotée V_{85}).

2.1.1 Vitesses observées, la V_{85}

La V_{85} est considérée par les divers acteurs du domaine (politiques, gestionnaires) comme une vitesse sûre en conditions nominales, c'est à dire par beau temps, pour une route sèche dans de bonnes conditions de visibilité. Par beau temps, hors trafic, la vitesse moyenne pratiquée dépend essentiellement de l'infrastructure et de la vitesse légale imposée.

Définition de la vitesse V_{85}

La V_{85} est le 85^e percentile des vitesses pratiquées. Les définitions de cette vitesse ont évolué au cours du temps. Désormais, cette vitesse doit être mesurée pour des véhicules non contraints par le trafic (de 3 à 8 secondes d'écart avec le véhicule précédent et au moins 3 secondes avec un véhicule derrière). Les mesures peuvent s'étaler sur des périodes variables allant de l'heure à l'année mais sont en général différenciées en fonction de la luminosité (jour, nuit). La V_{85} est donc à l'origine une mesure ponctuelle.

Alors qu'avant 2000, la V_{85} avait toujours tendance à être supérieure à la vitesse légale, en France, depuis quelques années et l'introduction des contrôles automatisés, on admet communément que la V_{85} tend vers la vitesse limite autorisée lorsque rien ne contraint les conducteurs (ni géométrie, ni trafic, ni météorologie, *etc.*).

Modèle d'estimation de la V_{85}

Jusqu'à présent, la V_{85} était mesurée ponctuellement sur les routes au moyen de boucles électromagnétiques ou de relevés RADAR statiques. Les vitesses V_{85} estimées à partir des boucles électromagnétiques présentent l'intérêt d'être constituées d'un grand nombre de mesures, l'ensemble des véhicules laissant une empreinte sur les signaux relevés. L'exploitation de ces données pour extraire la V_{85} est rendue difficile du fait de la définition de cette vitesse. Il faut en effet identifier des véhicules légers non contraints par le trafic. La figure 2.1 extraite de [Hoogendoorn 05] montre que l'utilisation de différents modèles statistiques conduit à des estimations très différentes de la V_{85} .

Certains modèles donnent une estimation de la V_{85} de 27 m.s^{-1} (97 km.h^{-1}) tandis que d'autres donnent 31 m.s^{-1} (111 km.h^{-1}). Cela est dû à la difficulté de réellement observer des véhicules non contraints par le trafic en pleine journée, ce qui impacte en particulier les conducteurs les plus rapides qui sont très souvent contraints du fait qu'ils vont plus vite que les autres. L'étude [HRB 00] propose de choisir les moments où la densité de véhicule est moindre mais le défaut de la méthode est que cela se produit le plus souvent de nuit et que cela biaise d'autant la méthode car les conditions environnementales et les populations concernées sont différentes.

Au fil des ans, des modèles de distribution de vitesse pour différents pays, différents réseaux, différentes géométries de route ou différents moments de la journée ont été développés afin

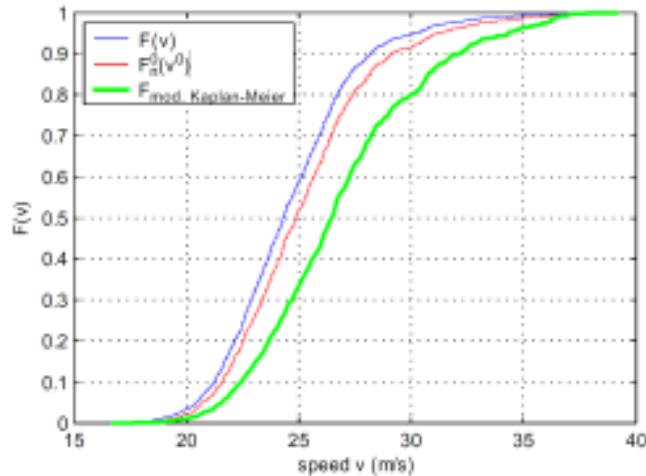


FIGURE 2.1 – Distributions des vitesses non contraintes en fonction du modèle statistique utilisé d’après [Hoogendoorn 05].

d’anticiper la V_{85} attendue lors de la construction d’une route. Des modèles d’évolution de la V_{85} en fonction des vitesses limites autorisées et des taux réels de dépassement ont également été proposés.

Ces méthodes se limitent à des observations ponctuelles et l’obtention d’un profil de V_{85} hors trafic par un échantillonnage dense des points observés sur les routes représenterait un processus très coûteux en temps et en argent. Dans un proche avenir, on peut imaginer que des profils continus de V_{85} pourraient être obtenus plus facilement par l’utilisation de GPS en conjonction avec des systèmes d’information géographique (SIG). Mais à l’heure actuelle, cela reste encore difficile, en particulier dès lors qu’il s’agit du contexte de circulation non contrainte.

Une solution pour l’obtention d’un tel profil à moindre coût a été proposée dans [Louah 05]. Elle consiste à utiliser des profils de vitesses réels de conducteurs individuels roulant hors trafic, à les moyenner et à les recalcr grâce à des mesures ponctuelles de V_{85} réelle effectuées en certains points du tracé judicieusement choisis. En ces points, l’utilisation de modèles tels [Hoogendoorn 05, Louah 07] permet de recalcr les profils obtenus sur des valeurs estimées à partir de mesures en grand nombre. Les conducteurs sont des conducteurs dits « experts » ils choisissent des horaires de circulation en anticipant les faibles trafic et de bonnes conditions météorologiques et rapportent les zones dans lesquelles ils ont été contraints afin de les supprimer des données.

Sur les routes secondaires, hors des villes, la vitesse est modulée essentiellement par les difficultés du tracé. La variance des vitesses en ces points difficiles est plus faible, c’est dans les parties les plus rapides que la variance est la plus grande. On peut voir sur la figure 2.2 dix profils de vitesse sur un même trajet, on y devine les courbes les plus serrées (abscisse 6000) ainsi que certaines lignes droites (abscisse 10000). Trois points d’échantillonnage des vitesses ont été choisis en des points de ligne droite où la variance des vitesses était minimale (abscisses 7600, 9000 et 12000), ils sont signifiés par une marque verticale sur l’échelle des abscisses.

Ce processus bien que beaucoup plus réaliste qu’un échantillonnage dense par des boucles n’en demande pas moins une mise en place expérimentale lourde ainsi qu’un traitement complexe des données recueillies. Dans le cadre du projet DIVAS, une estimation de la V_{85} selon la méthodologie proposée dans [Louah 05] a eu lieu sur la route départementale 27, en Bretagne. À partir de

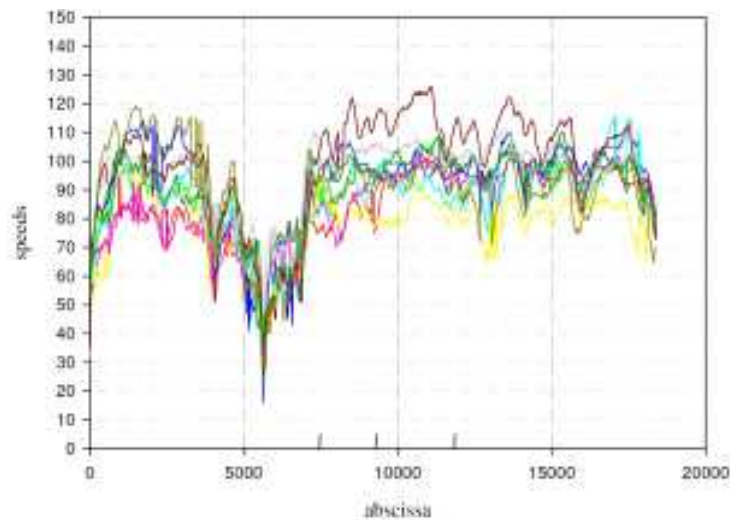


FIGURE 2.2 – Profils de vitesse obtenus avec 10 conducteurs et 3 mesures ponctuelles effectuées sur route d'après [Louah 05].

profils de vitesses géolocalisés de conducteurs experts ayant roulé en conditions non contraintes sur cette route comme l'illustre la figure 2.3 pour les profils extrêmes. La V_{85} est ensuite estimée et recalée en plusieurs points du trajet équipés de boucles électromagnétiques.

2.1.2 Vitesse légale et vitesse de conception

Les vitesses limites autorisées sont plus ou moins bien adaptées aux routes. Si de nos jours les processus de construction des routes sont complexes et mettent en adéquation le besoin d'absorber un flux de véhicules, la géométrie et les limitations de vitesse il n'en a pas toujours été ainsi. Le réseau secondaire (en particulier les routes départementales) a été en partie construit avant l'introduction de ces normes. Les vitesses limites autorisées sont génériques pour tout un type de réseau, d'où un certain nombre d'inadéquations entre géométrie et vitesse limite susceptibles d'induire en erreur le conducteur en le laissant penser que cette vitesse est sûre sur toute une section. Malgré des adaptations locales, on ne peut ajuster des panneaux pour chaque difficulté de la route pour des questions de temps, d'argent et d'efficacité. En effet, trop de panneaux surchargeraient le conducteur dans sa tâche de conduite, les préconisations ne seraient plus suivies et cela ne réglerait pas la problématique de la vitesse variable lors d'intempéries (voir figure 1.9, chapitre 1).

Après construction de la route selon les normes attendues pour sa catégorie ou après analyse du trajet, les gestionnaires peuvent connaître un certain nombre des caractéristiques de la route telles que le rayon de courbure, la pente ou le dévers de la route. D'après ces caractéristiques géométriques de la route et en utilisant des modèles décrivant les vitesses pratiquées en fonction de ces caractéristiques, les gestionnaires peuvent estimer quelles seront les vitesses pratiquées localement le long d'un trajet, ils peuvent s'assurer que les vitesses légales sont bien positionnées et cohérentes et que les marquages horizontaux et verticaux sont adaptés.

L'approche d'estimation de la vitesse pratiquée du point de vue infrastructure est une approche par le haut (*top-down*) consistant à considérer que la solution est la vitesse légale en ligne droite et considérant une dégradation de cette vitesse dans les virages.

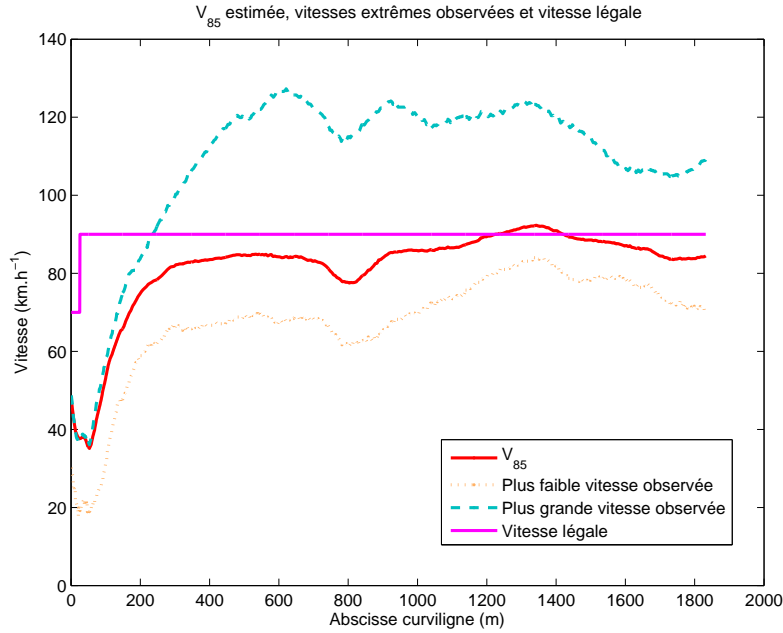


FIGURE 2.3 – Exemples de profils de vitesses relevés selon la méthodologie proposée dans [Louah 05].

La vitesse V_{INFRA} peut être estimée en virage à l'aide d'un modèle décrivant l'évolution des vitesses pratiquées en fonction du rayon de courbure R ou de la pente p (en montée uniquement) présenté dans l'équation 2.1 :

$$V_{INFRA}(R) = \frac{V_{LEGALE}}{1 + 346/R^{1.5}}$$

$$V_{INFRA}(p) = V_{LEGALE} - 0,31p^2 \quad (2.1)$$

Des modèles statistiques permettent également d'estimer les accélérations longitudinales pratiquées en fonction de la pente, ils sont présentés dans l'équation 2.2 :

$$Acc_{Max} = -0,067p + 0,9786$$

$$Dec_{Max} = 0,067p + 1,5214 \quad (2.2)$$

Afin d'estimer un profil réaliste des vitesses pratiquées, si on considère que là où les conditions sont optimales les conducteurs ont tendance à rouler à la vitesse légale ($V_{85} \rightarrow V_{LEGALE}$), on peut estimer quelle sera leur vitesse pratiquée en virage en en pente en prenant en chaque point de la route le minimum des vitesses de l'équation 2.1 ($V_{INFRA} = \min(V_{INFRA}(R), V_{INFRA}(p))$).

Bien sûr, lorsqu'il y a des transitions de vitesse légale ou une fin de virage où l'on passe à une ligne droite, les conducteurs ne peuvent atteindre instantanément la vitesse légale, les transitions entre hautes et basses vitesses peuvent être prises en compte à l'aide du modèle de l'équation 2.2. On obtient ainsi le profil de vitesse V_{INFRA} supposé être pratiqué par les conducteurs. D'après ce profil, si besoin est, des aménagements spécifiques peuvent être mis en place afin de mieux préparer le conducteur à l'approche des points difficiles. Nous illustrons ce processus d'estimation de la V_{INFRA} sur route départementale dans la figure 2.4. D'après des relevés géolocalisés des

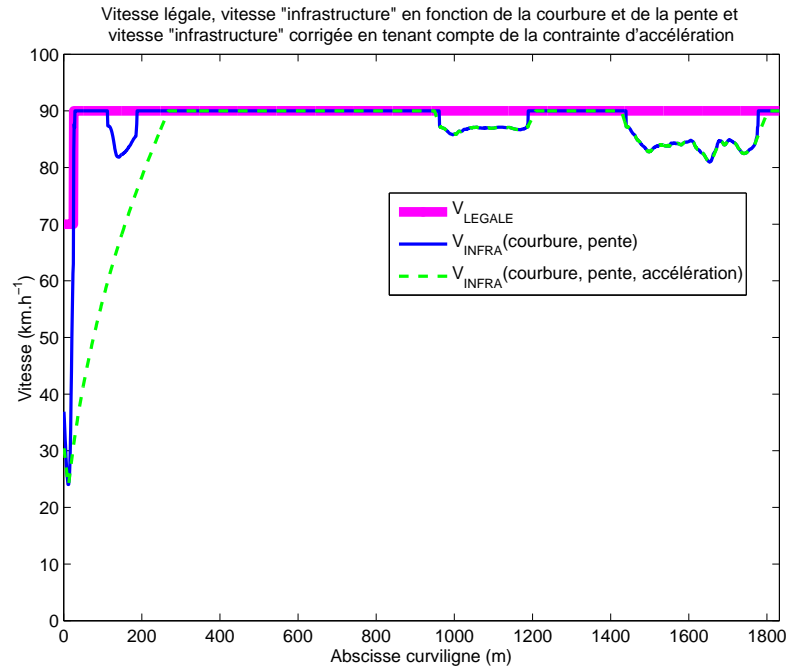


FIGURE 2.4 – Application de la contrainte d'accélération (cf. Eq. 2.2 avec le minimum des vitesse légale et vitesse de conception).

vitesse légale et des caractéristiques de l'infrastructure, nous avons calculé la vitesse en fonction du rayon de courbure puis avons appliqué la contrainte d'accélération.

La vitesse attendue est différente de la vitesse légale dans les virages et lors des transitions de vitesse. Ceci est particulièrement visible entre les abscisses de 50 et 250 où une phase d'accélération suit le franchissement d'un rond point vers l'abscisse 0. Les contraintes sur l'accélération s'appliquent dans le même ordre de proportions à chaque transition brusque de vitesse, que ce soit une transition de vitesse légale, une entrée ou une sortie de virage (abscisses 1000, 1200, 1400 et 1800 sur la figure 2.4). Les gestionnaires de la route savent donc d'ores et déjà qu'entre vitesse légale et vitesse pratiquées il peut y avoir une grande différence et que si la vitesse légale offre un cadre général de fonctionnement, elle ne constitue pas à proprement parler une vitesse de conseil.

Le processus d'estimation de la V_{85} selon la méthodologie de [Louah 05], bien que simplifié en comparaison des méthodes existantes reste complexe. Dans un premier temps, il nous faut tout de même pouvoir disposer d'une vitesse de référence crédible en conditions idéales. Nous pensons que la vitesse légale ne peut pas être considérée comme une vitesse de référence au sens de vitesse de conseil, nous pouvons alors nous appuyer sur des notions telles que la vitesse de conception ou sur des modèles de dynamique conducteur/véhicule/infrastructure afin de disposer d'une vitesse de conseil en conditions nominales. Nous ne traitons pas des problématiques urbaines ni en trafic dense, nous n'avons donc pas à traiter de la problématique du calcul d'une vitesse « moyenne » avec des points d'arrêt, processus beaucoup plus complexe.

Nous pouvons comparer la vitesse V_{85} estimée par la méthode de [Louah 05] et la vitesse de conception V_{INFRA} (c'est à dire la V_{85} attendue du point de vue de l'infrastructure) sur le même trajet. Les profils sont présentés sur la figure 2.5, cela nous permet d'apprécier la qualité des modèles d'estimation des vitesses pratiquées.

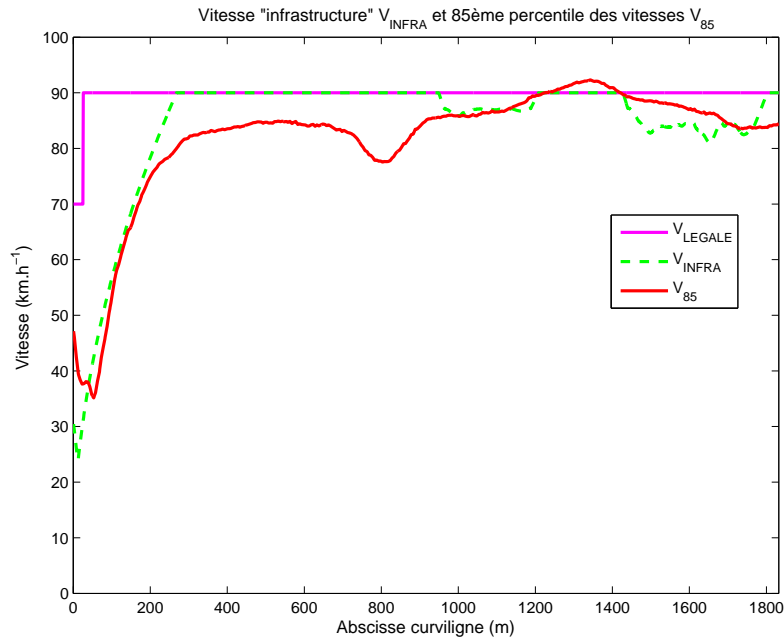


FIGURE 2.5 – Comparaison du modèle de vitesses pratiquées V_{INFRA} et d'un profil estimé de V_{85} .

Il existe des similitudes telles que les vitesses pratiquées dans le rond point (abscisses de 50 m à 250 m). L'accélération du modèle décrit par l'équation 2.2 correspond bien aux accélérations pratiquées en sortie de rond point dans la ligne droite (abscisse > 250 m). Il faut en revanche noter un fort ralentissement des automobilistes aux alentours de la position 800, or le modèle de V_{INFRA} ne rend pas compte de cette décélération. Cette différence entre vitesse pratiquée renvoie aux commentaires de [Taylor 02] (cf. chap. 1, p. 15) selon lequel la dangerosité des routes peut être observée par l'écart entre les vitesses pratiquées et les vitesses légales, c'est généralement l'indice d'un risque ou d'une gêne détectée par les conducteurs mais qui n'est pas caractérisée par une adaptation locale des vitesses légales. Cette gêne peut être due à la visibilité, à la qualité de la route, à des entrées de voie multiple ou à un ralentissement pour prendre des informations s'il y a de trop nombreux marquages et indications. En revanche, dans la section allant du point 1200 au point 1700, les vitesses pratiquées sont supérieures à la vitesse attendue par le modèle V_{INFRA} et même supérieures à la vitesse légale. C'est le signe que dans cette portion les conducteurs se sentent en pleine sécurité et privilégient la vitesse.

La méthodologie d'estimation de la V_{85} donne des résultats intéressants et plus vraisemblables que le modèle V_{INFRA} sans nécessiter d'énormes moyens de mesure. Elle demeure néanmoins complexe à mettre en œuvre lorsqu'il s'agit de diagnostiquer tout un réseau. La méthodologie d'estimation des vitesses pratiquées dans ces deux cas s'appuie sur des observations et des modèles statistiques tels que présentés dans les équations 2.1 et 2.2. Ils permettent d'obtenir une vitesse de référence globale, celle-ci ne peut être individualisée pour tenir compte du véhicule ou du conducteur.

D'autres études s'appuient sur des propriétés dynamiques du véhicule afin d'estimer les vitesses pratiquées en fonction de la géométrie de la route. La stratégie est différente : d'après un modèle d'interactions véhicule/infrastructure/conducteur on estime la vitesse maximale légale à laquelle peut rouler le véhicule sans sortir de la voie.

2.1.3 Vitesses calculées d'après un modèle, la V_{SAVV}

Le modèle SAVV (Système d'Alerte de Vitesse excessive en Virage) n'est pas à proprement parler un modèle d'estimation de la vitesse de référence. Il a été développé à l'origine afin de pouvoir avertir un conducteur d'une vitesse excessive en approche de virage et à proposer une vitesse adaptée au franchissement d'un virage. La vitesse proposée n'est pas une vitesse limite fondée sur des considérations strictement mécaniques et dynamiques (limite d'adhérence du véhicule en virage), mais une vitesse limite tenant compte du confort du conducteur ; suggérant par là même que la survenue d'une situation d'inconfort pourrait engendrer des conditions accidentogènes.

Afin de calculer une vitesse de conseil, ce modèle s'appuie sur les limites de sollicitation pneumatique chaussée et des limites d'accélération longitudinale et latérale tolérables ainsi qu'une limite d'accélération secondaire (limite de confort). Le modèle mécanique est présenté dans l'équation 2.3 :

$$\begin{cases} \theta_{route} > 0 \\ V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 - \frac{H}{L_{av}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon} \mu_{max}} \right)^2 \lambda_{lat} \mu_{max} - \phi_{route}} \right) \\ \theta_{route} < 0 \\ V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 + \frac{H}{L_{av}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon} \mu_{max}} \right)^2 \lambda_{lat} \mu_{max} - \phi_{route}} \right) \end{cases} \quad (2.3)$$

avec ρ la courbure, g l'accélération de la gravité, θ la pente, ϕ le dévers, μ_{max} l'adhérence maximale mobilisable, λ l'accélération, H la hauteur du centre de gravité et L la distance des essieux avant ou arrière au centre de gravité du véhicule.

Ce modèle a montré qu'en intégrant des paramètres propres au conducteur tels que les accélérations latérales et longitudinales maximales tolérables ou encore l'importance de tenir compte du *jerk* qui est la dérivée de l'accélération et à laquelle les conducteurs sont particulièrement sensibles. On peut voir sur la figure 2.6 l'adéquation entre le modèle dans une suite de virages avec les vitesses réellement pratiquées par des automobilistes.

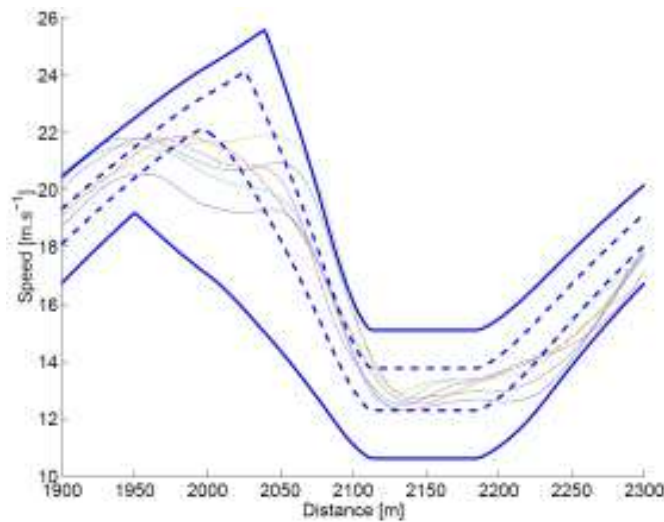


FIGURE 2.6 – Modèle de dynamique du véhicule en courbe d'après [Glaser 04].

Chaque profil en trait épais bleu correspond à un incrément de λ_{lon} et de λ_{lat} de 0,1, le plus bas étant à $\lambda_{lon} = \lambda_{lat} = 0,1$, le plus haut à $\lambda_{lon} = \lambda_{lat} = 0,4$. Les six lignes les plus fines correspondent à des conducteurs réels. Nous pouvons voir que les profils de vitesse obtenus pour les valeurs 0,2 et 0,3 de λ_{lon} et λ_{lat} encadrent particulièrement bien les profils de vitesse réelle.

Le modèle semble bon lorsqu'il s'agit de reproduire les vitesses pratiquées en virage. Bien sûr, en ligne droite, il ne peut pas anticiper que les conducteurs pourraient dépasser la vitesse limite autorisée. Si nous devons composer une vitesse de référence à partir de modèles, nous utiliserons dans les lignes droites la vitesse légale, d'autant que les vitesses pratiquées tendent vers la vitesse légale ces dernières années.

2.2 Adaptation de la vitesse

2.2.1 Fonctionnement des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse

Les dernières évolutions en termes de sécurité active embarquée sont les ISAs. Dans ce domaine, il n'existe que peu de réalisations industrielles car l'implantation pose des problèmes du point de vue de la législation, de l'application à grande échelle et de la fiabilité. Un ISA, Intelligent Speed Adaptation System est un nom générique pour tout système embarqué en mesure de renseigner ou d'imposer au conducteur la vitesse limite autorisée correspondant à sa localisation géographique. Ces systèmes peuvent également proposer une vitesse tenant compte d'autres considérations telles que la géométrie de la route ou les conditions météorologiques. Ces systèmes présentent un important potentiel en terme de sécurité car la vitesse est jugée à l'origine de nombreuses situations d'accidents et augmente la gravité des chocs comme nous l'avons décrit au chapitre 1.

L'abord légaliste, caractérisé par la politique de « contrôle/sanction », est important afin de faire baisser les vitesses et mettre les conducteurs en situation légale, mais mettre les conducteurs en conformation avec la vitesse légale est-il suffisant ? Les différentes générations d'ISAs se sont focalisées dans un premier temps sur l'information ou sur la mise en conformation avec les vitesses légales locales, mais évolue afin de tenir compte de la route et plus récemment de l'environnement.

Les premiers systèmes d'ISA proposent de rappeler les consignes de sécurité locales en s'appuyant sur des cartographies de vitesses légales [van Loon 01, Carsten 00, Ehrlich 06] ou à l'aide d'algorithmes de détection temps réel de panneaux tels que [Fang 03, Simon 09]. Ils présentent l'avantage de pouvoir être implantés sur des véhicules du marché dans la mesure où ils se contentent de rappeler la législation. Certains sont déjà implantés sur certains véhicules grand public [Opel], mais les véhicules ne sont pas asservis à ces systèmes et la vitesse proposée l'est toujours en tant que vitesse de conseil, l'automobiliste étant libre de la vitesse pratiquée.

Seules des mises en œuvre dans le domaine de la recherche appliquée telles que l'ISA-UK Project [Carsten 00] et le LAVIA [Ehrlich 06] sont allées plus loin que le strict conseil en proposant des ISAs contraignants en conditions écologiques. [Carsten 00] identifie les ISAs selon des types (vitesse de conseil légale, vitesse de conseil « dynamique ») et différents modes de fonctionnement « informatifs » (*advisory*), « actifs » (mais débrayables par le conducteur) et « contraints » (*mandatory*, actif sans débrayage). Dans ces projets, l'efficacité et la portée en termes de sécurité se sont évidemment avérées plus importantes en mode contraint. En revanche, du point de vue de l'acceptabilité, les automobilistes n'étant pas habitués à l'existence de modes contraints, les avis sont très partagés.

On notera que l'utilisation d'un ISA en mode contraint bride les véhicules aux vitesses limites définies localement (*cf.* figure 2.7(b)). Les ISAs mis en place s'appuient sur des technologies

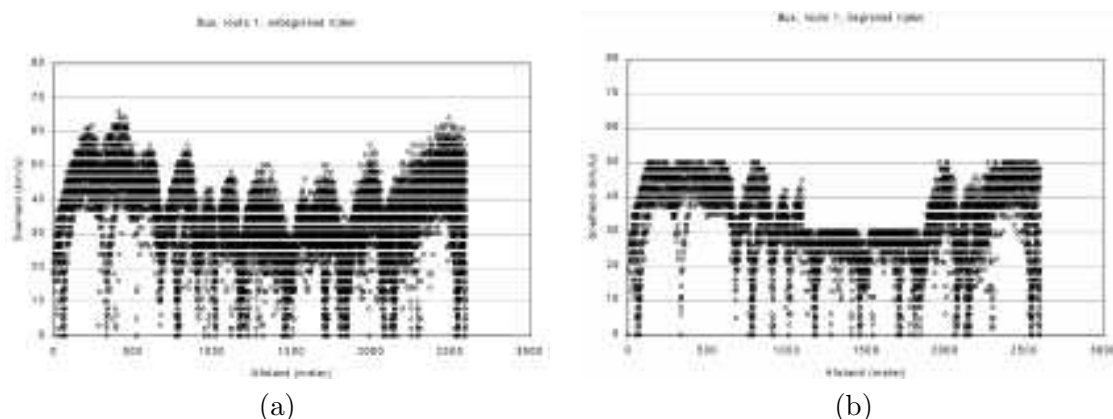


FIGURE 2.7 – Distributions des vitesses pratiquées sans et avec ISA en mode « mandatory » extrait de [van Loon 01].

couplant l'alimentation du moteur et non en agissant sur le freinage. Les transitions de vitesses d'une vitesse haute vers une vitesse basse sont donc assez douces. En revanche dans certaines situations telles les descentes, ils peuvent être ineffectifs sur la vitesse des véhicules.

Des recherches s'appuyant sur des modèles de véhicule, de conducteur, ou les deux, sont menées afin de proposer d'adapter la vitesse avec d'autres considérations que la seule vitesse légale. Ces recherches ont pour but de proposer une vitesse mieux adaptée aux conditions extérieures ou à détecter les points difficiles en terme de sécurité afin de mieux comprendre le rôle accidentogène de la vitesse et éventuellement d'adapter l'infrastructure et les règles localement à des fins de sécurité.

Les ISAs sont généralement considérés comme des aides à la conduite des véhicules. On notera cependant une proposition originale de modulation dynamique de la vitesse sur des tronçons faite par [Oh 01]. Les auteurs proposent une estimation de la probabilité de survenue d'un accident localement par l'observation de données temps réel de trafic recueillies grâce à des boucles électromagnétiques. D'après ces travaux permettant d'obtenir une estimation du risque sur un tronçon, il propose de mettre en place des limitations de vitesse dynamiques. Cette proposition de gestion du risque par la vitesse reste cependant globale, elle s'adresse à tous les conducteurs empruntant la section concernée. L'autre approche concerne les ISAs « dynamiques » et vise à proposer individuellement une vitesse en fonction de risques liés à la dynamique du véhicule et des risques liés à l'environnement.

Certaines études telle [Glaser 07b] permettent de réaliser des ISAs dynamiques en conditions de trafic dense. L'objectif de ce travail est de mettre en lien un modèle simple de conducteur avec des aspects de dynamique du véhicule. Le modèle est appliqué sur un scénario de poursuite où le véhicule d'intérêt suit ou est suivi par un autre véhicule. En fonction de conditions initiales données (vitesse de l'autre véhicule et vitesses relatives), un niveau de risque est estimé selon des considérations d'arrêt différentes (distance d'arrêt, Time To Collision ou TTC).

Les ISAs ou les systèmes permettant hors trafic de proposer dynamiquement une vitesse mieux adaptée que la seule vitesse légale se concentrent pour la plupart sur la vitesse en courbe [Glaser 07a, Jimenez 08]. Ces propositions s'appuient sur des notions de dynamique telles que le risque de sortie de voie en fonction de la courbure, de l'adhérence ou de paramètres propres au conducteur (temps de réaction ou limites de tolérance à l'accélération latérale).

Les travaux proposées dans [Glaser 07a] proposent une cartographie des points critiques en virage ou lors d'enchaînement de virages, ils peuvent être destinés à l'infrastructure aussi

bien qu'au conducteur. [Jimenez 08], qui s'inspire fortement de [Glaser 07a] pour son modèle dynamique et son modèle de conducteur propose une vitesse de consigne pour le conducteur en ligne droite ou en courbe et s'intéresse à la portée potentielle du système en terme de sécurité routière. Ils proposent également une vitesse de consigne adaptée à de bonnes conditions de visibilité ainsi qu'une vitesse de consigne en conditions de visibilité dégradée.

Le détail du fonctionnement de ces ISAs en ligne droite ou en courbe est traité plus en détail dans la suite.

2.2.2 Adaptation de la vitesse en ligne droite

Approche probabiliste en fonction du trafic, du véhicule, de l'infrastructure

Dans [Lu 03] les auteurs proposent une méthode d'ajustement de la vitesse en tenant compte de la V_{85} en circulation libre comme vitesse de référence vers laquelle on souhaite tendre ajustée en fonction de paramètres tenant compte du trafic, de la géométrie et de l'environnement routier. Ici la V_{85} a préalablement été relevée sur les sections d'intérêt c'est une mesure et non une estimation d'après modèle.

Le modèle pour ajuster la vitesse peut être exprimé des deux façons suivantes :

$$V_{Lim} = V_{85} - f(\text{trafic}) - f(\text{géométrie}) - f(\text{environnement}) \quad (2.4)$$

$$V_{Lim} = V_{85} \times f_{Adj}(\text{trafic}) \times f_{Adj}(\text{géométrie}) \times f_{Adj}(\text{environnement}) \quad (2.5)$$

Les fonctions f ou f_{Adj} sont ajustées en étudiant l'influence de certains paramètres appartenant aux catégories citées (trafic, géométrie, environnement) tels que la largeur de voie, le nombre d'insertions, de sorties, de panneaux. L'objectif étant, tout en prenant en compte l'écart entre la vitesse légale et la vitesse pratiquée (identifiée à la V_{85}), de définir une nouvelle vitesse légale afin que la vitesse pratiquée tende vers une vitesse de jugée moins risquée.

Les auteurs mesurent les paramètres d'ajustement (f et f_{Adj}) selon des modèles d'évolution définis *a priori* grâce à des analyses multivariées. Pour cela ils ont supposé qu'ils avaient identifié des variables indépendantes et leurs participations relatives au risque. Les meilleurs prédicteurs de V_{85} selon des modèles linéaire ou quadratiques ont été estimés sur des sites de référence présentant peu d'accidents. Connaissant les « facteurs définissant une V_{85} présentant des conditions satisfaisantes de sécurité » grâce à des observations sur des routes présentant une accidentologie supérieure, ils estiment le poids de différents facteurs contribuant à l'accidentologie afin de produire leur modèle.

Leur résultat est une modulation locale de la vitesse par rapport une vitesse légale de 60 *mph* soit 97 $km.h^{-1}$ telle que :

$$V_{Cons} = 97 \times [0,90 + (0,01 \times V_{FC})]^{0,734} \times [1 - (0,12 \times V_{SC})]^{0,568} \times [1 - (V_{AD}/473,9)]^{0,714} \times [1 - (V_{SD}/31,6)]^{0,688} \times [0,93 + (0,07 \times V_{LW})]^{1,171} \quad (2.6)$$

La valeur 97 correspond à la vitesse légale en $km.h^{-1}$, vitesse maximale sur les autoroutes des Etats-Unis. $V_{FC} = 1$ si c'est une artère majeure, 0 sinon. $V_{SC} = 1$ si le site possède une bordure, 0 sinon. V_{AD} le nombre total de sorties et de jonctions mineures et moyennes. V_{SD} le nombres de panneaux signalant des intersections, enfin $V_{LW} = 1$ si la largeur de voie est supérieure à 3,66 *m*.

Cependant la transpositions de tels résultats à d'autres pays, d'autres types de routes et de législation semble hasardeuse. Il n'est pas non plus discuté du problème d'incohérence de

certaines de ces modèles (multiplicatifs ou additifs) qui peuvent amener à la considération qu'à vitesse nulle le risque est minimal.

Nous n'avons pas connaissance de mises en œuvre ou de propositions sur des trajets longs de plusieurs sections permettant d'observer comment les vitesses sont modulées le long d'un trajet. Cette méthode ne permet pas de tenir compte de paramètres propres au véhicule ou au conducteur mais permettrait une gestion dynamique globale des vitesses. Les travaux présentés dans la suite concernent des ISAs individuels au sens où ils proposent de s'appuyer sur des modèles de véhicules, de conducteurs, d'interaction véhicule-infrastructure permettant de faire des propositions individualisées pour peu qu'on puisse renseigner ces modèles.

Approche déterministe fondée sur l'infrastructure et la visibilité

[Charbonnier 07] propose une vitesse adaptée à la visibilité géométrique. Il ne traite pas spécifiquement du risque en ligne droite mais ses calculs aboutissent à une vitesse de conseil en ligne droite qui peut être différente de la vitesse légale de consigne. À l'origine, l'objectif est de calculer la visibilité requise en chaque point du trajet en fonction des vitesses autorisées et pratiquées. Connaissant la distance de visibilité, on peut déterminer une vitesse de conseil de telle sorte que la distance d'arrêt soit inférieure ou égale à la visibilité disponible, qu'elle soit de nature atmosphérique ou géométrique. L'hypothèse est que le conducteur doit être en mesure de s'arrêter avant un obstacle apparaissant à la limite de distance de visibilité (atmosphérique ou géométrique).

[Charbonnier 07] s'appuie sur un modèle classique de distance d'arrêt (*cf.* Eq. 2.8) pour proposer une vitesse de conseil. Il tient compte également du respect des vitesses réglementaires et du respect des vitesses de conception (*cf.* Eq. 2.1). Enfin, le profil de vitesse obtenu est modifié en tenant compte des recommandations d'accélération et de décélération maximum en fonction de la pente données par l'ICTAVRU [ICT 09] (*cf.* Eq. 2.2).

La stratégie consiste à être en mesure de s'arrêter avant de percuter un obstacle fixe posé sur la route. En chaque point du trajet, une vitesse V_0 permettant de s'arrêter à la limite de portée visuelle (qu'elle soit de nature géométrique ou atmosphérique) est calculée en inversant le modèle de distance d'arrêt :

$$d_A = t_{PR}V_0 + \frac{V_0^2}{2g(\mu + p)} \quad (2.7)$$

$$V_0 = g(\mu + p) \cdot \left(\sqrt{t_{PR}^2 + \frac{2d_A}{g(\mu + p)}} - t_{PR} \right) \quad (2.8)$$

avec d_A la distance d'arrêt en mètres égale à la distance de visibilité, t_{PR} le temps de perception/réaction en secondes, V_0 la vitesse initiale (en $m.s^{-1}$), g la constante gravitationnelle, μ l'adhérence et p la pente.

Le calcul de la vitesse V_0 permettant de s'arrêter en une distance d'arrêt d_A se fait à l'aide de l'Eq. 2.8 en considérant une situation d'adhérence dégradée fixée constante ($\mu = 0,41$, valeur classique pour des chaussées humides) et un temps de réaction du conducteur $t_{PR} = 2s$ (référence usuelle pour le 95ème percentile des temps de perception réaction lors de la découverte d'un danger).

Approche déterministe en fonction du conducteur, du véhicule, de l'infrastructure

[Varhelyi 02] propose un ISA capable de moduler de façon dynamique la vitesse en fonction de conditions adverses telles qu'une route mouillée, une baisse de visibilité ou la survenue de la nuit. Il part de l'hypothèse que du point de vue de la sécurité, un apport majeur peut être effectué en adaptant intelligemment la vitesse. Il sous-entend les situations accidentogènes et des trajectoires seront gérables par le conducteur à ces vitesses.

Comme dans [Charbonnier 07], la stratégie est fondée sur la distance d'arrêt. Sur un tronçon donné, on estime la distance d'arrêt en conditions nominales (beau temps, bonne adhérence, conducteur à la vitesse légale). En conditions dégradées d'adhérence, le conducteur doit être en mesure de s'arrêter en une même distance qu'en conditions nominales. En conditions dégradées de visibilité le conducteur doit pouvoir s'arrêter à sa limite de portée visuelle. Lorsqu'adhérence et visibilité sont dégradées, il propose d'estimer la vitesse permettant de s'arrêter dans la limite de portée visuelle tout en tenant compte de l'adhérence dans le modèle de calcul de distance d'arrêt.

Nous utilisons les notations V pour les notions de vitesse afin de la différentier de (v_{Met}, v_{Geo}) , les notions de visibilité. La distance d'arrêt visée d_A est telle que :

$$d_a = \min(d_{ref}, v_{Max}) \quad (2.9)$$

De même, il considère que la vitesse de référence en un point du trajet correspond à la vitesse légale. La distance d'arrêt en conditions nominales (beau temps, bonne adhérence) d_{ref} est :

$$d_{ref} = t_{PR}V_{Legale} + \frac{V_{Legale}^2}{2g(\mu + p)} \quad (2.10)$$

On peut définir pour une vitesse de référence V_{ref} (la vitesse légale dans [Varhelyi 02]), dans des conditions nominales, une distance d'arrêt de référence d_{ref} . g étant l'accélération de la gravité $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ et p la tangente de la pente (positive en montée, négative en descente). En conditions dégradées (adhérence, visibilité), on peut définir une vitesse appropriée pour une distance d'arrêt identique à la distance d'arrêt en conditions nominales par :

$$V_{Cons} = \left\{ V \in \mathbb{R}^+ \mid \frac{1}{2g(\mu + p)}V^2 + t_{PR}V - \min(d_{ref}, v_{Max}) = 0 \right\} \quad (2.11)$$

$$V_{Cons} = \left(-t_{PR} + \sqrt{t_{PR}^2 + \frac{2\min(d_{ref}, v_{Max})}{g(\mu + p)}} \right) g(\mu + p) \quad (2.12)$$

On observe sur la figure 2.8(a) et (b) des abaques de vitesses en fonction de l'adhérence μ (désigné par f sur la figure 2.8) et de la visibilité. Il faut noter que cette stratégie est assez contraignante sur les vitesses proposées, par exemple sur la figure 2.8(a), en conditions dégradées d'adhérence, sur une route à 110 km.h^{-1} , la vitesse proposée peut être inférieure à 60 km.h^{-1} . Ce type de consigne très basse est intéressante du point de vue de la sécurité mais elle peut poser le double problème de la crédibilité et de l'applicabilité. En cas d'utilisation d'une telle modulation de vitesse par un ISA contraignant, quel serait l'impact sur le trafic de la dispersion des vitesses entre les conducteurs équipés de cet ISA et ceux circulant librement ?

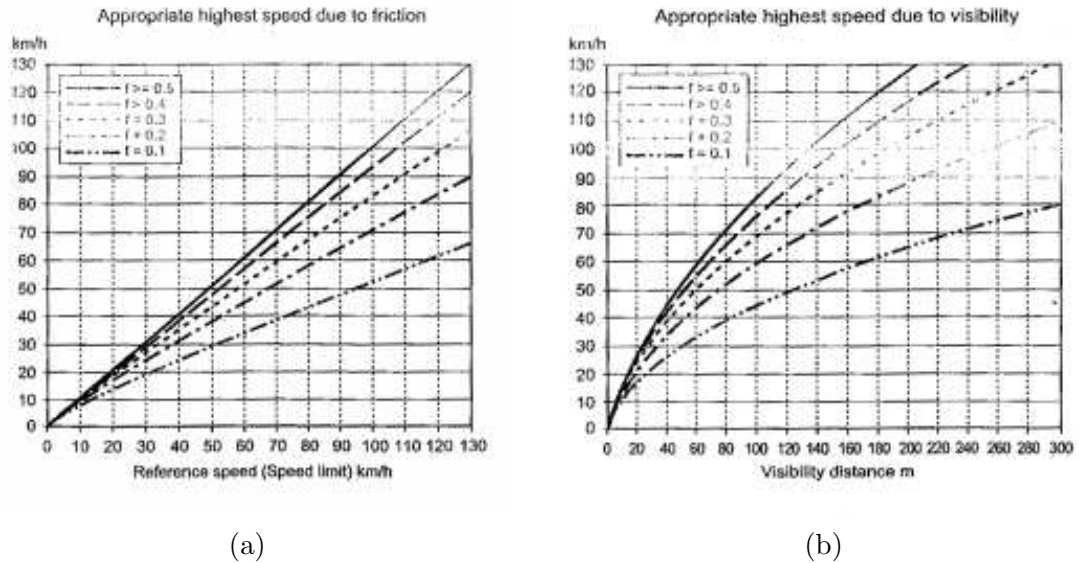


FIGURE 2.8 – « Vitesse de conseil » pour des conditions variées d'adhérence et de visibilité d'après [Varhelyi 02].

Approche statistique, conducteurs et caractéristiques véhicules multiples

Le travail présenté dans [Patte 09] permet de proposer une vitesse en ligne droite adaptée à des conditions spécifiques. L'approche est basée sur un conducteur effectuant un freinage d'urgence (FU) avec l'équation 2.8 modifiée telle que :

$$d_A = t_{PR}V_0 + \frac{V_0^2}{2g(\gamma_{(V_0)} + p)} \quad (2.13)$$

avec d_A la distance d'arrêt en mètres égale à la distance de visibilité, t_{PR} le temps de perception/réaction en secondes, V_0 la vitesse initiale (en $m.s^{-1}$), g la constante gravitationnelle, p la pente et $\gamma_{(V_0)}$ la décélération moyenne équivalente exprimée en fraction de g ($\gamma_{(V_0)} \in [0, 1]$). La différence essentielle est qu'en lieu et place de l'adhérence μ apparaissant dans les équations 2.8 et 2.12 on trouve une décélération moyenne équivalente. L'auteur suggère implicitement que $\gamma_{(V_0)} = \alpha\mu$ avec α un paramètre de mobilisation de l'adhérence dépendant de la pression exercée sur la pédale de frein et de la présence d'ABS.

L'auteur considère que le conducteur enfonce la pédale de frein complètement lors d'un freinage d'urgence. D'après [Patte 09], lorsque l'ABS est actif il tend à mobiliser 95 % de l'adhérence mobilisable, mais c'est optimiste dans la mesure où entre le début de la pression sur la pédale de frein et l'activation de l'ABS s'écoule un certain temps et l'ABS peut avoir des performances inférieures (*cf.* Figure 2.9).

En utilisant une méthode de monte-carlo, [Patte 09] calcule la distance d'arrêt de nombreux freinages d'urgences en effectuant des tirages sur un certain nombre de variables d'influence (variables conducteur, variables véhicule et variables liées à l'infrastructure). Parmi ces variables on trouve entre autres le temps de perception-réaction, la pression exercée, la présence d'ABS, l'état du pneumatique et la distance de visibilité. Afin de modéliser des freinages d'urgences dans de nombreuses conditions, il présente les lois statistiques qui modélisent l'évolution possible des variables d'entrée comme on peut le voir sur Figure 2.10.

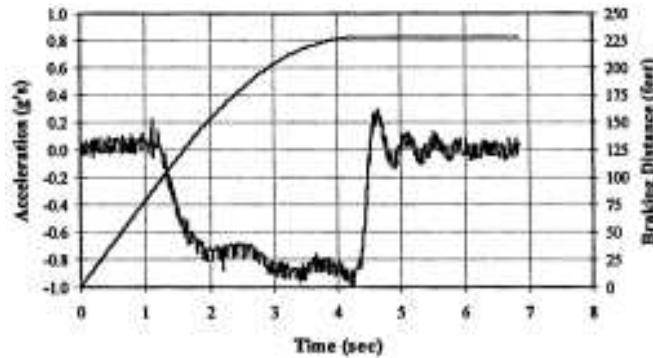


FIGURE 2.9 – Profil type de décélération avec ABS lors d'un freinage d'urgence tiré de [Fambro 97].

Variable	Symbole	Unité	Loi statistique	Moy.	Ecart-type	5% (estimé)	95% (estimé)	Traçage (inf./sup)
Temps de perception réaction	T_{pr}	s	Gamma (18, 0.060)	1,19	0,28	0,75	1,65	0,01% / 99,99%
Vitesse initiale	V_i	km/h	Gamma (déviate et inversé) 180 - $\Gamma(12, 6,5)$	120	19	85	46	0,01% / 99,99%
Profondeur de sculpture	k	mm	Triangulaire	5,7	2	2	8,3	0,01% / 99,99%
Équipement ABS	-	logique	Discrét. : 79% avec / 21% sans	-	-	-	-	Néant
Décélération avec ABS	a_{acc}	g	Gamma (déviate et inversé) 0,39 - $\Gamma(4,5 ; 0,47)$	0,65	0,12	0,43	0,83	2,50%
Décélération sans ABS			Gamma (déviate et inversé) 0,7 - $\Gamma(3,4 ; 0,44)$	0,45	0,09	0,30	0,58	97,50%
Type de pneu	μ_p	Coef.	N(1,1 ; 0,05)	1,1	0,05	1,02	1,18	5% / 95%
CFL(D)	$\mu_{cfl(D)}$	Coef.	Empirique (CARAT) CFL 120 >	35	9	22 (17-40,40)	46 (17-40,40)	Sans objet
R_{acc}/R_{acc}	R_a	Coef.	N(1,01 ; 0,15)	1,01	0,15	1,37	1,80	0,01% / 99,99%

FIGURE 2.10 – Synthèse du paramétrage du modèle - cas des autoroutes, tiré de [Patte 09].

Il obtient en sortie de simulation une distribution de distances d'arrêt (*cf.* figure 2.11) et peut étudier l'impact de certaines variables sur la probabilité d'occurrence d'accident dans certaines conditions.

D'après ces distributions de distance d'arrêt, il établit des critères à destination des exploitants de l'infrastructure tels qu'un indice de fiabilité ou indice de risque conventionnel. Il établit également des critères qui pourraient être adressés à des conducteurs tels qu'un indice de risque individuel ou une probabilité d'accident grave. On peut qualifier cet abord de méthode *bottom-up* dans la mesure où on construit le modèle de vitesse complètement à partir de modèles et de variables modélisées. L'inclusion d'un plus grand nombre de paramètres dans le modèle est possible mais multiplie le temps de calcul. De plus, la prise en compte d'un plus grand nombre de facteurs augmente la variance de la sortie du modèle et n'aide pas à l'interprétation des distributions des distances d'arrêt.

Bien que ce ne soit pas à proprement parler un ISA, ce système permet d'estimer un indice de risque fondé sur une dégradation des conditions nominales de fonctionnement du véhicule, des conditions d'utilisations nominales de l'infrastructure et d'aspects propres au conducteur. D'après cette méthodologie de calcul de risque on peut estimer le « sur-risque » généré par la

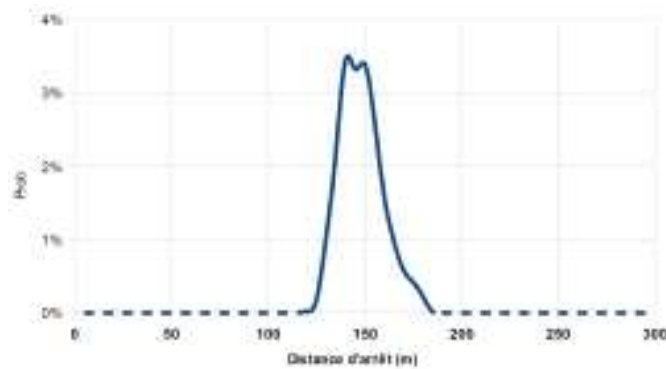


FIGURE 2.11 – Distribution de la distance d'arrêt pour un profil d'utilisateur moyen, circulant à 120 km.h^{-1} sur chaussée mouillée, avec ABS d'après [Patte 09].

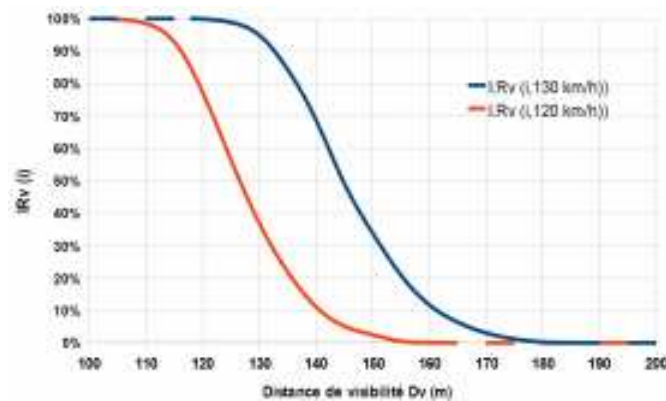


FIGURE 2.12 – Indice de Risque individuel, variation en fonction de la distance de visibilité offerte.

dégradation de certains paramètres tels que l'adhérence, l'absence d'ABS, des pneus de mauvaise qualité ou la visibilité tel que c'est illustré sur la figure 2.12. En cherchant à ramener cette mesure du risque à sa valeur en conditions nominales (beau temps, bons pneus, bon temps de perception-réaction) par une modulation de la vitesse initiale, on aboutirait à proposer une vitesse modulée en conditions dégradées.

2.2.3 Adaptation de la vitesse en virage

Peu de travaux proposent de moduler la vitesse en courbe. Les travaux de [Glaser 04] et de [Jimenez 08] proposent une approche intéressante fondée sur des considérations de vitesse limite en approche de virage.

Bien que les travaux de [Glaser 04] ne décrivent pas un ISA à proprement parler, nous avons décrit dans la section 2.1.3 qu'ils pouvaient être utilisés afin d'estimer une vitesse de référence le long d'une trajectoire et que cette vitesse était modulée en fonction de paramètres propres au véhicule et au conducteur. Les travaux de [Jimenez 08] utilisent justement ce modèle afin d'estimer une vitesse de référence à partir d'une cartographie des routes et en considérant des paramètres propres au conducteur (temps de perception-réaction $t_{PR} = 2 \text{ s}$, décélération maximale

$dec_{Max} = 2g$). Le système permet également d'estimer la vitesse en courbe comme [Glaser 04] et en ligne droite selon la même méthodologie que [Charbonnier 07] mais en conservant leur modèle de dynamique véhicule-conducteur. Connaissant la localisation du véhicule, le système estime en permanence quel est l'écart à la vitesse de référence et quelle devrait être sa décélération afin que sa vitesse soit inférieure à la vitesse de référence lors de la survenue de la difficulté suivante sur le parcours.

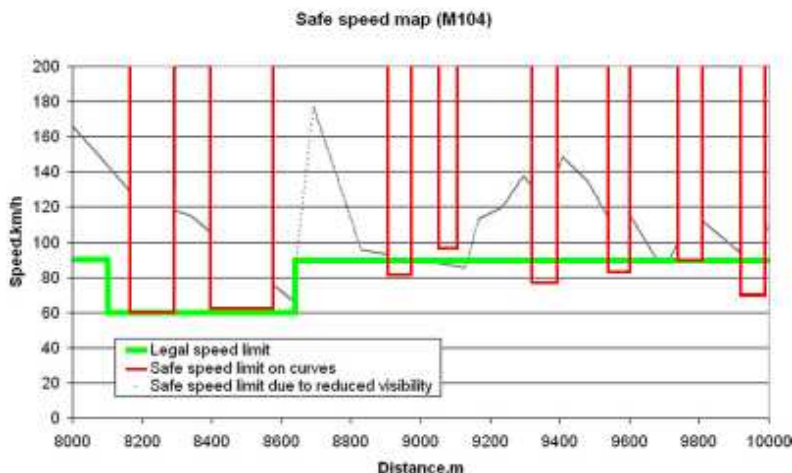


FIGURE 2.13 – Vitesse légale, vitesse adaptée en virage et vitesse adaptée à la visibilité.

Bien que la notion de visibilité ne soit pas clarifiée, il apparaît qu'elle n'impacte pas beaucoup le système et n'intervient dans la modulation de la vitesse qu'aux abscisses 9100 et 9700. En revanche dans les virages, le calcul d'une vitesse adaptée à l'aide du modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure renvoie une vitesse inférieure à la vitesse légale. On peut remarquer qu'il propose de manière dissociée les résultats des méthodes « distance d'arrêt à la distance de visibilité » et « modulation de vitesse en virage ». Il n'a pas encore appliqué de contrainte d'accélération sur le minimum des vitesses estimées pour en tirer un profil de vitesse de référence.

Les auteurs proposent réellement la mise en œuvre d'un ISA avec une interface homme machine sous la forme d'une indication colorée allant du vert au rouge. Si le conducteur est à une vitesse inférieure ou égale à la référence, l'indicateur est vert. S'il est estimé que le conducteur va devoir avec une décélération supérieure d'au moins 1 g aux standards de la vitesse de référence, l'indicateur passe au jaune. Si sa décélération dépassera de 2 g les standards, l'indicateur est orange et au delà de 5 g rouge. Les auteurs ont également étudié la portée en terme de leur ISA selon la méthodologie proposée dans [Carsten 05] décrite en section 2.2.5

2.2.4 Acceptabilité

[Fildes 91] fait bien apparaître que les individus répondent à de nombreuses considérations telles que la vitesse limite, la vitesse limite qu'ils jugeraient adaptée, leur vitesse perçue, leur connaissance des risques, leur prise de risque en fonction des raisons du déplacement, du risque d'être arrêté et des peines encourues. Les conducteurs ont en général conscience de rouler plus vite, et bien qu'ils identifient la vitesse comme un facteur de risque important, ils ne jugent pas leurs vitesses excessives « trop » risquées. Par exemple, 10 % à 30 % des gens en fonction des

groupes, déclarent ne pas estimer que rouler à 30 km.h^{-1} au dessus de la limite était dangereux.

Les auteurs en concluent que la perception du risque en fonction de la vitesse n'est pas bonne, il est perçu mais mal quantifié ou mal estimé par les humains en situation de conduite, ce, de façon variable en fonction de leur expérience. Il souligne que les paramètres influant sur la prise de risque au niveau personnel sont trop nombreux pour pouvoir être identifiés puis utilisés.

Comme souligné chapitre 1, section 1.1.3, p.11, l'exploitation des modèles par Antov ou par Carsten tient compte de la réalisation de la baisse des vitesses en fonction de la mise en place des systèmes d'aides à la conduite et de la législation. Il y a une différence entre l'évolution des vitesses légales et l'évolution réelle des vitesses ou entre les vitesses moyennes réelles et la pénétration sur le marché d'un ISA et son mode de fonctionnement (conseil, obligatoire).

Ces différences observées sont en partie dues à l'acceptabilité des modifications proposées. [Carsten 05] étudie le gain potentiel sur les accidents de l'introduction d'un ISA en fonction de son type de fonctionnement. Sachant qu'il est difficile de prendre en compte l'acceptabilité, il se place parfois dans le cas le plus favorable où la vitesse maximale est bridée quelles que soient les conditions, en mode contraint, il n'y a alors plus lieu de considérer l'acceptabilité mais seulement la pénétration sur le marché, ce qui simplifie les hypothèses.

Dans les études les plus précises, l'attitude des conducteurs vis-à-vis de modifications du code ou des vitesses légales est prise en compte avec des modèles tels que [Kweon 06] ou [Fleiter 06] en particulier, la volonté, ou le choix délibéré d'une prise de risque est pris en compte. Ce domaine est très étudié dans le domaine des sciences sociales, des sciences comportementales et des sciences cognitives, mais pas nécessairement appliqué aux ISAs et donc difficilement transposable.

Certains projets ont montré que les ISAs en mode contraint pouvaient avoir des taux d'acceptance faibles. Après avoir conduit dans des véhicules équipés, les conducteurs exprimaient des sentiments négatifs si forts que de 38 % à 70 % d'entre déclaraient qu'ils n'installeraient pas de limiteur de vitesse de ce type quel qu'en soit le prix [Varhelyi 98]. Les systèmes informatifs sont mieux acceptés mais sont nettement moins efficaces.

Dans [Blum 06] les différents apports de moyens non-techniques d'améliorer l'acceptance tels que l'information, l'éducation, les politiques de sécurité publiques ou les incitations économiques. Il montre que du point de vue technologique, des progrès dans l'efficacité peuvent être réalisés par l'adaptation des ISAs aux individus, en particulier en ce qui concerne leurs performances, leur état, leurs expériences. Il suggère que ça peut entre autres être réalisé au travers de paramètres tels que le temps de perception-réaction pour l'affichage des recommandations ainsi qu'une adaptation au style de conduite et des accélérations et décélérations tolérées.

2.2.5 Potentiel des systèmes intelligents d'adaptation de la vitesse

Les ISAs en mode contraint sont ceux qui présentent le plus important potentiel en termes de sécurité, mais les versions de conseil sont les plus simples à implanter. Il faudra anticiper que pour qu'un ISA en mode conseil atteigne son plein potentiel, l'acceptabilité doit être bonne afin d'obtenir le concours des conducteurs. Certains travaux tels [Parker 92] ont montré que lorsque les différentiels de vitesse sont trop importants, ils ne semblent pas justifiés ou ne sont pas compris par le conducteur. L'acceptabilité chute et donc la performance globale du système n'est pas maximisée. De même lors de modifications de vitesse légale sur une route, si le différentiel est trop important et tend à introduire de la variance dans les vitesses pratiquées, même en présence d'une baisse de vitesse moyenne ou de la V_{85} , la baisse d'accidentologie peut être négligeable, voire les effets attendus sur l'accidentologie inversés (hausse des accidents).

L'étude [Garber 88] analyse le taux d'accidents en fonction de la variance des vitesses pratiquées. La variance est minimale lorsque la différence entre vitesse de conception et vitesse

moyenne est inférieure à 15 km.h^{-1} . Pour des vitesses moyennes pratiquées entre 40 km.h^{-1} et 110 km.h^{-1} , la variance diminue avec l'augmentation de la vitesse moyenne. La variance est également plus grande s'il y a une inadéquation entre vitesse de conception et vitesse légale. L'évolution attendue du nombre d'accidents attendue en fonction de la variance est telle que :

$$N_{Acc} = 168 + 0,00273(\sigma V) \tag{2.14}$$

Avec σV la variance des vitesses en *mph* et N_{Acc} le nombre d'accidents par cent millions de miles parcourus.

Les différentes études n'ont pas porté sur un nombre suffisant de conducteurs ou n'ont pas duré assez longtemps pour observer les effets réels sur l'accidentologie. [Carsten 08] s'appuie tout de même sur des modèles tels que ceux de Taylor (modèle U2, cf. [Taylor 02]), de [Kloeden 01b], de [Nilsson 81, Nilsson 04] (modifié par [Elvik 04]) ou [Finch 94], qui sont des modèles décrivant l'évolution attendue du nombre d'accidents en fonction d'une baisse des vitesses pratiquées pour projeter le gain potentiel de l'expérience ISA-UK. La même démarche d'estimation du potentiel d'un ISA a été proposée en fonction des modes de fonctionnement et de la pénétration de telles technologies dans l'étude [Ehrlich 06]. Chacun de ces modèles a été établi à partir d'observations effectuées sur différents réseaux, il utilise donc les modèles correspondants pour calculer le gain potentiel tel qu'exposé dans la figure 2.14 :

Table 14: The models applied for the accident reduction analysis

Road Type	ISA Variant	Speed Limit					
		20 mph	30 mph	40 mph	50 mph	60 mph	70 mph
Unclassified roads	Advisory	U2	U2	U2	P	P	
	Voluntary	U2	KU	KU	P	P	
	Mandatory	U2	KU	KU	P	P	
B roads	Advisory	U2	U2	U2	KR	KR	
	Voluntary	U2	KU	KU	KR	KR	
	Mandatory	U2	KU	KU	KR	KR	
A roads	Advisory		U2	U2	KR	KR	P
	Voluntary		KU	KU	KR	KR	P
	Mandatory		KU	KU	KR	KR	P
Motorways	Advisory			U2	KR		P
	Voluntary			KU	KR		P
	Mandatory			KU	KR		P

Note: KR: Kloeden rural model
 KU: Kloeden urban model
 P: Elvik power model
 U2 model (Taylor et al, 2000)

FIGURE 2.14 – Modèles de relation vitesse (ou variation de vitesse) / accidents utilisés dans [Carsten 08].

De nouveaux concepts d'ISAs ont été proposés dans la recherche sur la sécurité routière. Sont qualifiés d'« ISA-Dynamiques » les systèmes ayant la capacité d'adapter la vitesse en temps réel en fonction de conditions extérieures changeantes. Par exemple, un ISA qui pourrait tenir compte de la présence de fort brouillard et limiterait la vitesse à 50 km.h^{-1} afin de se mettre en accord avec la législation dans un premier temps (cf. figure 2.14). Ou des systèmes plus complexes allant au-delà de la législation en prenant en compte des aspects de visibilité, d'adhérence ou de géométrie de la route.

En s'appuyant sur une évolution rural des vitesses moyennes avec les différents modes d'ISAs (du mode conseil au mode contraint avec bridage des vitesses, du mode légal au mode dynamique) et en envisageant une pénétration progressive de ces technologies dans le parc automobile, les

auteurs estiment des gains potentiels tant en terme de nombre d'accidents, que de vies sauvées ou de coûts matériels associés comme illustré sur la figure 2.15.

System type	Speed limit type	Predicted injury accident reduction		
		Low estimate (%)	Best estimate (%)	High estimate (%)
Advisory	Fixed	2	10	21
	Variable	2	10	22
	Dynamic	3	13	27
Voluntary	Fixed	5	10	21 ^a
	Variable	6	11	22 ^a
	Dynamic	10	18	27 ^a
Mandatory	Fixed	11	20	31
	Variable	12	22	33
	Dynamic	19	36	50

^a The high estimates for Voluntary ISA have been increased to the levels for Advisory ISA, rather than half the estimate for Mandatory ISA.

FIGURE 2.15 – Modèles de relation vitesse (ou variation de vitesse) / accidents utilisés dans [Carsten 08].

Afin d'améliorer ces estimations, [Agusdinata 07] propose de tenir compte de la grande différence d'accidentologie, de comportement vis-à-vis des vitesses et de prise de risque entre les jeunes conducteurs et les conducteurs expérimentés. Il propose de tenir compte, pour ces deux catégories, de la répartition du parc de véhicules utilisés et des distances couvertes. Il discute également de la possibilité d'imposer le mode contraint aux jeunes conducteurs alors qu'on ne proposerait que le mode informatif aux plus expérimentés. Sachant que les niveaux d'acceptabilité peuvent varier en fonction des modes de fonctionnement et des classes d'âge définies, il considère 16 scénarios avec des répartitions différentes de ces populations sur une route donnée, différents niveaux d'acceptabilité pour chacun de ces groupes et estime le niveau de satisfaction en comparant le niveau de performance (mesuré en gain sur le nombre d'accidents) aux performances maximales possibles de tels systèmes. L'ensemble des modèles d'accidentologie et de types de route sont testés et permettent de voir qu'en dessous de certains seuils d'acceptabilité et de conformation aux prescriptions, les effets sur l'accidentologie peuvent s'avérer beaucoup plus faibles que prévu. L'estimation des performances des systèmes est effectuée selon la méthodologie illustrée sur la figure 2.16

Divers effets néfastes potentiels ont déjà été anticipés dans les précédentes études sur les ISAs. Ce sont entre autres la surcharge ou la sous-charge de tronçons du réseau, la distraction, des effets néfastes sur le comportement du conducteur, ou des effets néfastes sur les interactions entre les conducteurs, en particulier lorsque l'un est équipé d'un ISA et l'autre non. Il reste de nombreux tests impliquant des individus afin de comprendre la portée des ISAs sur les pratiques de conduite et les gains réels qui peuvent en être attendus.

L'objectif de DIVAS est de développer un ISA en utilisant en temps réel des ressources telles que des données cartographiques ou des estimations embarquées des conditions de visibilité afin d'estimer un indice de risque et de proposer une vitesse adaptée à ces conditions. Nous utilisons entre autres un modèle de la dynamique du véhicule en interaction avec les actions du conducteur et des propriétés de la voie.

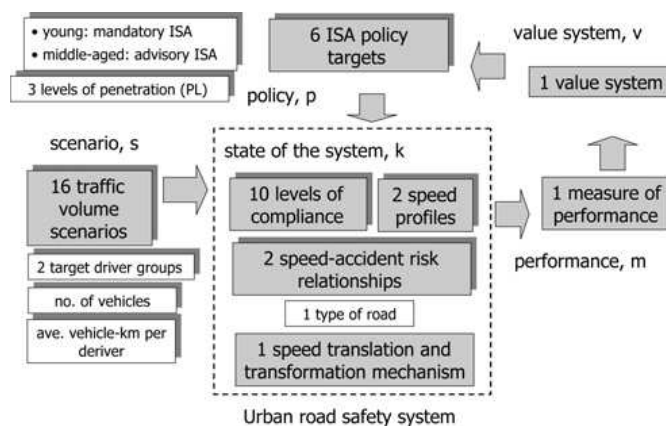


FIGURE 2.16 – Méthode d'évaluation de la satisfaction et de l'efficacité potentielle des ISAs selon [Agusdinata 07].

2.2.6 Bilan bibliographique et propositions

Nous avons présenté dans un premier temps les différentes notions de vitesse, vitesse légale, vitesse de conception, vitesse pratiquée et avons posé la question d'une vitesse de référence qui peut être conseillée. Les différentes notions de vitesse illustrent l'évolution des ISAs du conseil réglementaire à un conseil dynamique prenant en compte l'environnement routier. Nous pensons que la vitesse V_{85} , qui est une vitesse pratiquée et praticable dans de bonnes conditions répond aux attentes d'une vitesse de référence réaliste et acceptable, alliant à la fois des propriétés de sécurité et de mobilité. Étant tirée d'observations statistiques sur des vitesses pratiquées en conditions de référence, elle a l'avantage d'être la transcription par des humains du risque ressenti et intègre des paramètres qu'il serait très difficiles d'intégrer dans des modèles. Nous avons montré qu'il était possible d'utiliser une méthode simple et efficace d'estimation de profils de V_{85} sur des trajets.

Nous avons vu une approche probabiliste d'estimation de la survenue d'un accident sur une section telle que proposée dans [Lu 03]. Dans ce cas on dispose d'une pure estimation probabiliste mais l'estimation des paramètres influant sur l'accidentologie est tirée d'une étude de l'accidentologie relative des différents sites. Rapportée au nombre de véhicules circulant sur les tronçons, la probabilité estimée à partir de ces facteurs d'influence est extrêmement faible, de plus, la modulation de vitesse est globale sur le tronçon et non adaptée localement et il est difficile d'estimer la vitesse à proposer afin de réaliser une baisse moyenne des vitesses réelles permettant de ramener le niveau de risque à un niveau de référence.

L'approche présentée dans [Varhelyi 02] est intéressante car elle propose une méthode pour intégrer des paramètres tels que la distance de visibilité ou une modulation de l'adhérence pour le calcul d'une vitesse de conseil fondée sur une stratégie de distance d'arrêt. Elle conduit cependant à proposer des vitesses très basses dont on peut se demander si il est réaliste ou trop prudent. L'approche probabiliste de la survenue d'un choc dans le cas de la présence d'un obstacle sur la voie présentée par [Patte 09] peut être appliquée à des véhicules considérés individuellement mais s'appuie également sur une logique fondée sur la distance d'arrêt. Il propose néanmoins un modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure dans le calcul de la distance d'arrêt intéressant et permettant d'intégrer de nombreux paramètres. Les approches de [Glaser 04, Jimenez 08] sont fondées sur des considérations dynamiques du point de vue du véhicule et intègrent des aspects

de confort et d'accélération pour le point de vue conducteur.

Que ce soit pour les modèles décrivant le comportement du véhicule en ligne droite ou en virage, ces modèles peuvent être utilisés de deux manières différentes. Premièrement, nous disposons de modèles de dynamique du véhicule nous permettant d'estimer en temps réel une distance de freinage en fonction d'entrées que nous pouvons connaître ou fixer (caractéristiques géométriques de la route, caractéristiques du véhicule, caractéristiques propres aux conducteurs). Deuxièmement, en définissant un certain nombre de conditions de référence et en utilisant les caractéristiques de la route, on peut utiliser ces modèles afin d'estimer une vitesse de référence hors trafic lorsque la méthode d'estimation de la V_{85} n'a pas encore été mise en œuvre.

Dans les travaux [Charbonnier 07, Varhelyi 02, Patte 09] abordant les situations accidentogènes en ligne droite, la stratégie consiste à éviter tout impact. Ces trois modèles proposent une intégration croissante de paramètres de plus en plus complexes afin d'anticiper une vitesse de conseil répondant à toujours plus de contraintes. Ces vitesses, quelles que soient les paramètres d'entrée, s'appuient sur la possibilité pour le conducteur de pouvoir à tout instant freiner et s'arrêter avant de percuter un obstacle apparaissant sur la voie en limite de visibilité. Les vitesses de conseil proposées en ligne droite sont intéressantes mais conduisent souvent à proposer des vitesses très en deçà des vitesses réglementaires ou des vitesses pratiquées. Est-ce que ce sont des vitesses réalistes ? Seront-elles adoptées par les conducteurs ? Quelle est leur acceptabilité ?

Nous ne calculons pas une vitesse maximale possible selon un certain nombre de conditions tel que l'ont fait toutes les méthodes présentés (approche *bottom-up*). Nous proposons contrairement à ces travaux de considérer que dans les meilleures conditions (conditions de références, beau temps, route sèche, conducteur expérimenté, véhicule standard récent) la vitesse V_{85} estimée selon la méthodologie présentée section est la vitesse de conseil la mieux adaptée. Dès lors que les conditions se dégradent, que ce soit du point de vue infrastructure (adhérence), environnement (visibilité), véhicule (caractéristiques moins bonnes que la référence) ou conducteur (temps de réaction, pression sur le frein inférieures aux conducteurs de référence), la vitesse doit être modulée, la vitesse de conseil sera par conséquent nécessairement inférieure à la vitesse de référence. Cette approche *top-down* s'appuyant sur l'observation des vitesses pratiquées offrirait vraisemblablement une meilleure acceptabilité, donc une plus grande efficacité. L'utilisation des différents modèles exposés permettrait en revanche de prendre en compte des variations d'adhérence, de visibilité, de propriétés du véhicule et de caractéristiques du conducteur.

Nous abordons également différemment les objectifs en terme de sécurité et de scénario d'accident. La stratégie d'arrêt sur obstacle semble contraignante pour deux raisons. Premièrement un obstacle est susceptible d'apparaître à une distance nettement inférieure à la distance de visibilité (chute d'un arbre pouvant survenir n'importe où par exemple). Lors d'une sortie de voie résultant en un impact contre un obstacle rigide fixe, situation la plus courante et la plus risqué, sur quelle distance le conducteur aura-t-il pu freiner sur la voie avant de sortir de la voie, réduisant d'autant la vitesse à l'impact, principal facteur de gravité. Le deuxième défaut d'une méthode fondée sur l'arrêt sur obstacle, c'est qu'elle ne considère pas l'impact et ne prend pas en compte la gravité des chocs.

La méthode d'estimation de distances d'arrêt variables proposée dans [Patte 09] peut inspirer de multiples solutions à une estimation fondée sur le risque. Si on considère la distribution de distances d'arrêt présentées sur la figure 2.11, on peut prendre le parti de proposer de moduler les consignes de vitesses de telle sorte que la vitesse moyenne baisse et que la distribution de distances d'arrêt soit toujours inférieure à la visibilité. C'est encore une stratégie « zéro risque » visant à ce que tous les conducteurs puissent s'arrêter avant un obstacle apparaissant en limite de visibilité, scénario communément appelé « scénario mur de brique » dans la littérature. On pourrait également utiliser le modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure pour in-

dividualiser des propositions de baisse de vitesse visant à ramener chaque individu à la distance d'arrêt de référence, c'est à dire la distance minimale. Encore une fois dans le cadre d'un scénario mur de brique. Enfin, une solution alternative consiste à considérer que le choc va avoir lieu et qu'en fonction des caractéristiques du véhicule et du conducteur et de leur relation à l'infrastructure, ils percuteront l'obstacle à des vitesses différentes et sont donc soumis à des probabilités d'accidents plus ou moins graves, mesurables à l'aide des notions de gravité présentés chapitre 1.

C'est cette dernière hypothèse qui nous à inspiré une nouvelle proposition de prise en compte de la gravité. Si la gravité ne peut être prise en compte qu'en considérant l'accident, il nous faut considérer un ou des scénarios dans lesquels le choc se produira. Dans la mesure où la gravité dépend fortement de l'obstacle percuté, nous prendrons en compte des chocs contre différents types d'obstacles. Comme nous l'avons précisé, un conducteur peut voir surgir un obstacle n'importe où et peut freiner plus ou moins longtemps avant de percuter un obstacle. Nous avons choisi d'aborder le scénario d'accident comme un obstacle ayant une équiprobabilité d'apparition en avant en avant du véhicule. Ce scénario peut aussi fonctionner si on considère un conducteur en situation d'urgence qui entreprend un freinage d'urgence puis sort de la route et est confronté à un obstacle à proximité de sa sortie de voie. Dans ces scénarios, nous considérerons la potentialité d'un choc à n'importe quelle distance en avant du véhicule. Dès lors que nous considérerons ce choc, nous pourrons introduire une notion de gravité en fonction de la vitesse à l'instant du choc.

2.3 Méthode de calcul de la vitesse de conseil proposée

Nous présentons dans la suite notre méthode d'estimation du risque fondée sur l'idée qu'en tout point du trajet le conducteur peut être amené à rencontrer une situation d'urgence. Il entreprend un freinage d'urgence et peut percuter un obstacle à une distance variable devant lui. En considérant différents scénarios en fonction de l'obstacle percuté, de la vitesse à laquelle il est percuté (qui est fonction de sa distance), nous pouvons estimer quelle est la probabilité d'avoir un accident léger, sévère ou fatal. L'intégrale de ces probabilités d'accidents en fonction de la distance constitue ce que nous qualifions d'exposition au risque.

Nous proposons d'utiliser la méthodologie suivante, illustrée sur la figure 2.17 :

- En chaque point de la route nous disposons de la vitesse de référence ainsi que de la vitesse courante du conducteur.
- Nous envisageons qu'une situation d'urgence puisse se produire n'importe où le long du trajet et que le conducteur puisse être amené à entamer un freinage d'urgence face à cette situation.
- Les profils de vitesse des freinages d'urgence de référence et courant sont calculés :
 - pour un conducteur et un véhicule donné
 - connaissant la géométries locale de la route
 - connaissant l'adhérence en situation de référence (beau temps) et l'adhérence en situation courante
- Nous considérons un scénario type (choc contre obstacle rigide fixe, choc contre véhicule percuté de face ou par l'arrière)
- Nous considérons une équiprobabilité de percuter un tel obstacle en fonction de la distance.
- Nous sommes donc en mesure de calculer, dans les conditions de référence et dans la situation courante, une exposition au risque.
 - Sachant le profil de vitesse lors d'un freinage d'urgence, nous pouvons savoir à quelle vitesse le véhicule percuterait un obstacle en fonction de la distance.

- Connaissant la probabilité de blessure en fonction de la vitesse de choc, nous pouvons connaître la probabilité d'un accident de gravité donnée en fonction de la distance au choc après le début du freinage.
- L'exposition au risque est l'intégrale sur la distance de freinage de la probabilité de blessure pour un niveau de gravité donné (léger, sévère ou fatal)
- Si l'exposition au risque dans la situation courante est supérieure à l'exposition au risque en conditions de référence, nous calculons quelle vitesse devrait avoir le conducteur dans la situation courante de telle sorte que son exposition au risque ne soit pas supérieure à l'exposition au risque en conditions de référence.

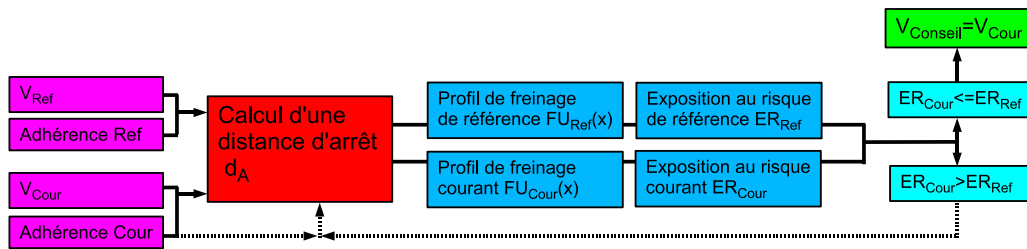


FIGURE 2.17 – Principe du calcul d'une vitesse de conseil.

Nous présentons en détail dans les sections suivantes les divers éléments que nous utilisons pour mettre en œuvre une telle méthode. Après avoir exposé cette méthode de calcul, nous l'appliquons à notre trajet en conditions de référence pour un conducteur roulant à la V_{85} , définissant ainsi sur notre trajet une exposition au risque de référence. Nous montrons ensuite comment cette méthode peut être appliquée en conditions dégradées de visibilité ou d'adhérence pour estimer une vitesse de conseil permettant de ramener l'exposition au risque en conditions courantes au niveau d'exposition de risque de référence.

2.3.1 Utilisation d'une vitesse de référence à moduler

Dans le cadre du projet DIVAS, un profil de V_{85} a été estimé selon la méthode proposée dans [Louah 05], décrite section 2.1. Ce profil a été calculé à partir de profils de vitesse de conducteurs experts ayant roulé hors trafic sur le trajet et à l'aide de 5 points de mesures ponctuels des distributions de vitesses réelles. Nous considérons qu'un profil de vitesse V_{85} comme celui dont nous disposons pour les routes départementales est représentatif de l'estimation du risque par un conducteur dans de bonnes conditions étant donné un certain nombre de contraintes (vitesse légale, véhicule, *etc.*). Ce profil de vitesse peut être parfois supérieur à la vitesse de consigne. C'est une vitesse pratiquée et praticable par la plupart mais nous ne pouvons pas dire que c'est la vitesse de référence que devraient adopter les usagers. En effet, la V_{85} est associée à une appréciation globale du risque par des êtres humains, elle n'est donc pas normée, mais c'est sûrement un indice du risque relatif ressenti le long du trajet.

Nous avons illustré sur la figure 2.3 le profil de vitesse V_{85} estimé en libre trafic le long de notre itinéraire de référence sur la RD 27. Il faut noter que ce trajet exclut les zones urbaines traversées, donc les arrêts complets du véhicule. Cette vitesse pratiquée est une vitesse que l'on pourrait raisonnablement conseiller, pourtant en l'adoptant, on ne peut pas dire qu'on ne s'expose à aucun risque. Si un conducteur fait une sortie de voie ou qu'un obstacle surgit devant lui, il peut avoir un choc plus ou moins grave.

2.3.2 Modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure

Parmi les travaux permettant d'estimer une vitesse recommandée, les modèles de dynamiques utilisent différentes variables d'entrée pour calculer la vitesse en situation courante ou en situation de freinage d'urgence (*FU*). Le profil de vitesse du *FU*, et donc la distance d'arrêt, peut être calculé en chaque point de l'itinéraire connaissant un certain nombre de paramètres liés :

- à l'infrastructure (profil de pente et d'adhérence par beau temps),
- au conducteur (un conducteur spécifique tel qu'un conducteur de 30 ans avec un $t_{PR} = 1,2 s$ ou le conducteur de référence dont le t_{PR} est le 95^e percentile des temps de réaction et tel que $t_{PR} = 2 s$),
- au véhicule (véhicule spécifique, équipé ou non d'ABS, de pneus spécifiques ou véhicule moyen).

Les caractéristiques géométriques de la route sont d'une importance majeure en ce qui concerne le comportement dynamique des véhicules sur la voie. De nombreuses sorties de voie sont la conséquence d'une mauvaise connaissance des interactions complexes entre la vitesse et ces caractéristiques. Par exemple, de nombreux conducteurs ne connaissent pas l'impact de la pente sur la distance de freinage ni les limites de contrôlabilité de leur véhicule en fonction de la vitesse dans un virage.

Les principales caractéristiques géométriques sont le rayon de courbure, la pente et le dévers. Ces caractéristiques sont considérées statiques car elles n'évoluent pas ou peu dans le temps. Elles sont supposées connues des gestionnaires de route lorsqu'ils ont participé à la construction et disposent du tracé. Elles peuvent sinon être estimées par des appareils de mesure tel que l'appareil VANI utilisé sur site de référence du projet. En ce qui concerne le rayon de courbure ou la pente, des méthodes informatiques permettent de le faire à partir du tracé en plan ou en profil. Une fois acquises, ces informations sont disponibles pour l'ensemble de la route. Elles peuvent être embarquées sous forme de cartes dans les véhicules ou elles peuvent être transmises par l'infrastructure tel que c'est le cas dans le cadre de DIVAS.

Toutes les caractéristiques de la route ne sont pas identiques. L'adhérence impacte fortement les distances de freinage et le contrôle du véhicule. Elle est essentiellement liée à la granularité de la surface de la voie, à la nature des pneus (lisses ou sculptés) et à la hauteur d'eau. Nous considérons que cette caractéristique est semi-statique, les propriétés de granularité de surface étant permanentes tandis que la présence d'eau est conjoncturelle. L'appareil de mesure GRIP-TESTER tracté par le véhicule VANI permet d'estimer l'adhérence en présence de 3 mm de hauteur d'eau pour un pneu standard. Sachant que l'adhérence de référence en conditions sèches est généralement considérée comme étant entre 0,9 et 1, nous utilisons le profil en conditions dégradées recalé entre 0,9 et 1 comme première estimation de l'adhérence de référence. Nous détaillerons ultérieurement comment nous utilisons les informations d'adhérence par temps de pluie.

Concernant le véhicule, la présence de l'ABS est de plus en plus courante dans les véhicules récents et peut être connue via le bus CAN du véhicule. L'état de gonflement des pneus est parfois également disponible, mais c'est le plus souvent sur des véhicules haut de gamme. Il n'existe pas de moyens d'estimation de l'état d'usure d'un pneu et de ses propriétés d'adhérence par temps sec et sur route mouillée. Nous considérons donc que le véhicule est entretenu et qu'il est équipé de pneus standards tels que décrits dans l'AIPCR [(TC1-SC) 09] et utilisé par l'appareil GRIPTESTER.

Concernant les caractéristiques du conducteur, nous pouvons prendre deux caractéristiques qui sont très impactantes sur la distance de freinage et le profil de vitesse durant le freinage. Ce sont le temps de perception-réaction du conducteur, que nous prenons égal à 1,2 s, valeur

courante pour un conducteur expérimenté ayant de bons réflexes. L'autre paramètre est la pression sur la pédale de frein. Les recommandations dans le domaine ayant évolué, il était d'usage antérieurement de ne pas la presser complètement afin de ne pas bloquer les roues. Depuis l'introduction de l'ABS, on conseille le contraire dans la mesure où l'ABS est plus performant que la plupart des conducteurs dans la recherche d'une sollicitation maximisée des capacités d'adhérence.

2.3.3 Calcul du profil de vitesse en freinage d'urgence (FU)

Après l'instant initial de survenue de la situation d'urgence, le conducteur a besoin d'un certain laps de temps pour analyser la situation et commencer à appuyer sur la pédale de frein. Durant ce temps de perception et de réaction noté t_{PR} , la distance couverte d_{PR} est telle que :

$$d_{PR} = t_{PR}V_0 \quad (2.15)$$

avec V_0 la vitesse en $m.s^{-1}$ et t_{PR} le temps de perception/réaction exprimé en secondes. Une fois que le conducteur a couvert cette distance à vitesse constante, le freinage d'urgence peut avoir lieu avec une vitesse initiale égale à V_0 . Afin de calculer ces profils de freinage d'urgence, nous différencions les freinages dans les sections de route droites des freinages dans les portions courbes.

Freinage en ligne droite

En ligne droite, toute l'adhérence mobilisable peut être utilisée afin de freiner le véhicule longitudinalement. L'accélération est exprimée comme une fraction de g , la valeur de l'accélération de la gravité au sol. L'accélération effectivement utilisée afin de freiner est calculée en tenant compte de l'accélération mobilisée par la pression sur la pédale de frein et la présence ou non d'ABS au travers du paramètre γ . Sachant que le conducteur n'a pas besoin de consacrer une partie de son adhérence pour se guider comme c'est le cas en courbe, toute l'adhérence sollicitée ne l'est que pour l'accélération longitudinale. L'accélération mobilisée correspond à une portion de l'adhérence mobilisable au travers de la sollicitation γ . L'accélération longitudinale mobilisée est :

$$Acc_{Lon}(x) = Acc_{Tot}(x) = -\gamma \cdot g(\mu(x) + p(x)) = \frac{V_{x+dx}^2 - V_x^2}{2dx} \quad (2.16)$$

avec x l'abscisse curviligne du véhicule, $\mu(x)$ l'adhérence en fonction de l'abscisse et $p(x)$ la pente en fonction de la position (positive en montée, négative en descente) et γ un paramètre lié à la pression sur la pédale de frein et la présence ou non d'ABS dans le véhicule. Nous utilisons $\gamma = 0,9$ en présence d'ABS et $\gamma = 0,7$ sans ABS selon les recommandations de [Patte 09].

L'équation 2.16 traduit que la décélération maximale correspond à la part de l'adhérence de la voie (adhérence et pente : $\mu(x) + p(x)$) que mobilise le couple conducteur véhicule (pression et présence d'ABS : $\gamma(V_0)$) avec :

$$\mu(x) = \int_x^{x+1} \mu(x)dx \quad \text{et} \quad p(x) = \int_x^{x+1} p(x)dx \quad (2.17)$$

En résolvant 2.16 on peut estimer la vitesse à une distance $dx = 1 m$ connaissant les conditions à l'origine $V_0 = V(0)$ et la décélération locale maximale, alors :

$$V(x+1, \mu(x+1), p(x+1), \gamma) = \sqrt{V(x)^2 - 2g\gamma(\mu(x) + p(x))} \quad (2.18)$$

Et le profil de FU mètre après mètre est :

$$\begin{aligned} V(1, \mu(1), p(1), \gamma) &= \sqrt{V(0)^2 - 2g\gamma(\mu(0) + p(0))} \\ V(2, \mu(2), p(2), \gamma) &= \sqrt{V(1)^2 - 2g\gamma(\mu(1) + p(1))} \end{aligned} \quad (2.19)$$

etc. jusqu'à $V(d_{Brak}) = 0$, l'arrêt du véhicule.

Freinage en courbe

Alors que le freinage dans les lignes droites permet au conducteur d'utiliser toute l'adhérence pour réduire sa vitesse longitudinale, le freinage en courbe requiert qu'il consacre une partie de cette adhérence afin de rester dans la voie. La distance de freinage est plus grande qu'en ligne droite (toutes choses égales par ailleurs). Nous utilisons un modèle simple de dynamique du véhicule afin de prendre en compte la nécessité de garder sa trajectoire. L'accélération latérale dépend du rayon de courbure de la route et de la vitesse. L'accélération latérale maximale est :

$$Acc_{Lat}(x) = \left| \frac{V(x)^2}{R(x)} \left(\mu(x) - \phi(x) \frac{R(x)}{|R(x)|} \right) \right| \quad (2.20)$$

avec $V(x)$ la vitesse en $m.s^{-1}$, $R(x)$ le rayon de courbure en fonction de l'abscisse curviligne (positive pour les virages à gauche, négative dans les virages à droite) et $\phi(x)$ est le dévers (positif si le centre de voie est plus élevé que l'extérieur, négatif sinon). Cette partie correspond à la part d'adhérence mobilisée afin de se maintenir dans la voie. Sachant que la décélération totale est bornée par un total d'adhérence disponible telle que :

$$Acc_{Tot}(x) = \sqrt{Acc_{Lon}^2(x) + Acc_{Lat}^2(x)} \quad (2.21)$$

Comme sur les lignes droites, l'accélération réellement mobilisée lors du freinage est calculée en tenant compte de la pression sur le frein et de la présence d'ABS au travers du paramètre γ et l'accélération longitudinale disponible restante pour freiner après cela est :

$$Acc_{Lon}(x) = -\gamma \sqrt{(g(\mu(x) + p(x)))^2 - \left(\frac{V(x)^2}{R(x)} \left(\mu(x) - \phi(x) \frac{R(x)}{|R(x)|} \right) \right)^2} \quad (2.22)$$

On peut remarquer que sur les sections droites, sachant que $R(x) = \infty$ l'équation 2.22 se résume à l'équation 2.16. Le calcul de la distance et du profil de FU est effectué comme pour le cas des lignes droites mais en considérant que le conducteur ne peut pas solliciter toute l'adhérence disponible pour freiner, il mobilise donc une partie de l'adhérence pour se guider puis sollicite une partie de l'adhérence restante pour freiner longitudinalement comme le retranscrit l'équation 2.22

Profil de freinage d'urgence

Nous recomposons le profil complet de freinage d'urgence entre la position initiale et la distance d'arrêt totale (d_A) tel qu'illustré sur la figure 2.18. La distance d'arrêt totale (d_A), de la survenue de la situation d'urgence jusqu'à l'arrêt complet du véhicule est la somme de la distance d_{PR} et de la distance de freinage à proprement parler d_{Brak} .

Nous obtenons par calcul le profil du freinage $V(x)$ et construisons la courbe de FU par parties telle que :

$$FU(x, V_0, t_{PR}, \mu(x), p(x), \gamma) = \begin{cases} V_0 & \text{si } x \in [0, V_0 t_{PR}] \\ V(x, \mu(x), p(x), \gamma) & \text{si } x \in]V_0 t_{PR}, d_A[\\ 0 & \text{si } x \in [d_A, \infty[\end{cases} \quad (2.23)$$

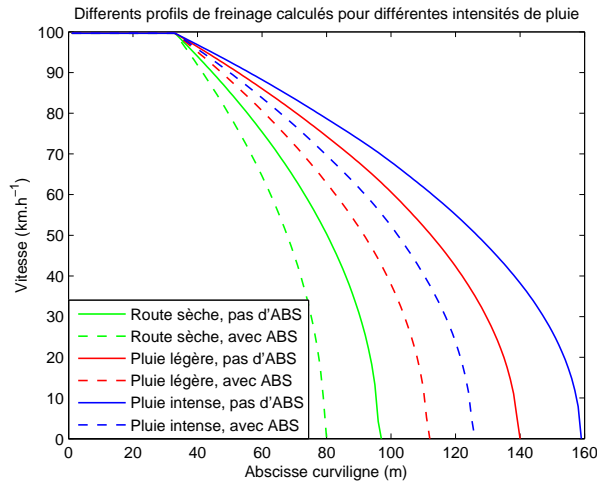


FIGURE 2.18 – Profil de FU dans différentes conditions d'adhérence en fonction de la présence ou non d'ABS.

Nous pouvons utiliser ce modèle (Eq. 2.23 afin d'obtenir un profil de vitesse tel que montré sur la figure 2.18) en faisant varier d'autres paramètres tels que le temps de perception-réaction, la sollicitation de freinage $\gamma_{(V_0)}$, l'adhérence dans différentes conditions. Comme nous pouvons le voir, une conjonction de paramètre dégradant la distance de freinage est susceptible de faire plus que doubler cette distance par rapport aux meilleures conditions rencontrées.

En conditions de référence, nous sommes en mesure d'estimer en temps réel en fonction de la position du véhicule un profil de distance d'arrêt. En conditions dégradées d'adhérence, il nous faudrait disposer en temps réel d'une estimation de l'adhérence pour appliquer le même processus. Nous montrerons ultérieurement comment cette barrière peut partiellement être levée.

2.3.4 Utilisation de statistiques de risque et de gravité

Connaissant le profil de vitesse qu'aurait le véhicule s'il entreprenait un freinage d'urgence, nous pouvons estimer quelle serait la vitesse du choc en fonction de la distance à laquelle l'obstacle est percuté. Nous allons présenter les ressources nous permettant d'introduire la notion de sévérité des traumatismes liés aux accidents dans la section suivante.

Nous allons estimer des probabilités d'accidents légers sérieux ou graves, ce qui suppose qu'il y aura choc contre les obstacles. Nous avons décrit dans le chapitre 1, section 1.1.3 que de multiples facteurs pouvaient impacter la gravité des accidents routiers. Il nous serait impossible de simuler au travers de scénarios la multiplicité des configurations de choc et de natures d'obstacles. Nous avons utilisé une mise à jour des données accidentologiques spécifique aux routes secondaires réalisée dans le cadre de DIVAS afin d'actualiser les données pour la France. Nous utilisons cette étude d'accidentologie pour distinguer les scénarios les plus vraisemblables et la traduction que

nous en faisons en terme d'estimation de la gravité. Nous montrons que le système est ouvert à une prise en compte spécifiques de données d'accidentologie locales et de facteurs supplémentaires dans la prise en compte de la gravité.

Utilisation de scénarios d'accidents

D'après l'ONISR « c'est sur les routes nationales et départementales que l'on enregistre le plus grand nombre de tués dans les accidents contre obstacles fixes (71,3 %) » « quel que soit le réseau le nombre de tués dans les accidents sans tiers en cause représente près de 40 % du nombre total de tués dans les accidents » et « c'est contre les arbres que l'on dénombre le plus de tués et c'est aussi dans ces accidents que la gravité est la plus forte ».

Nous nous intéressons aux accidents occurring en rase campagne pour un véhicule en conditions de trafic libre (interdistances supérieures à 3 secondes). Ils représentent 13 % des accidents de véhicule seuls (18 % des tués). Le plus important facteur de décès sur ces routes de rase campagne concerne les obstacles fixes : 1 154 tués en 2008 dont 518 tués sur des arbres ou des poteaux à la suite de sorties de voies, aussi nous intéressons nous en premier lieu aux chocs contre obstacles rigides fixes.

Nous disposons d'une étude d'accidentologie réalisée dans le cadre de DIVAS recensant les mécanismes d'accidents ayant eu lieu sur des routes bidirectionnelles. Ces scénarios peuvent être très spécifiques, tant du point de vue des causes de l'accident, du ou des véhicules impliqués, du ou des obstacles contre lesquels le véhicule s'accidente. Contrairement à de nombreuses études d'accidentologie s'intéressant à la nature des conducteurs (sexe, gamme d'âge, taille, corpulence). Pour le projet, les types d'accidents ont été segmentés en s'intéressent en premier lieu à la localisation (section courante, intersection) et aux circonstances (choc contre un autre véhicule, sortie de voie avec choc contre obstacle, *etc.*). Les causes des accidents font encore des sous groupes qui peuvent être transversaux dans les classes précédentes, ce sont les causes des accidents (endormissement, situation d'urgence ou de panique à l'origine d'une perte de contrôle, prise de conscience d'un danger sur la voie).

L'étude d'accidentologie dans DIVAS [Bisson 09] souligne qu'on recense 12 % d'accidents (18 % des tués) impliquant un véhicule seul en ligne droite et 13 % (20 % des tués) un véhicule seul en courbe, ce qui veut dire qu'un quart des accidents est constitué par la perte de contrôle d'un véhicule seul qui termine sa course dans l'accotement, en ligne droite ou en courbe. Si on regroupe selon notre typologie entre les chocs contre d'autres véhicules à l'arrêt ou très lents sur la voie, les chocs frontaux contre les autres véhicules et les sorties de voies avec choc contre un obstacle, on observe des répartitions égales d'environ 32 %, 30 % et 30 %, le reste représentant des cas marginaux tels les chocs contre des animaux.

Nous n'avons pas d'intérêt spécifique pour les causes de l'accident. En revanche un certain nombre de ces accidents aboutissent à la même situation, choc contre obstacle rigide fixe ou choc contre véhicule de face ou par l'arrière. L'étude de DIVAS sur l'accidentologie nous donne l'analyse complète des scénarios d'accident et du déroulement de la situation d'urgence. Nous avons identifié trois scénarios se produisant hors intersection, ils ont des causes multiples mais les conséquences sont partagées équitablement en trois catégories de choc : contre un « obstacle rigide fixe » contre un véhicule de face et contre un obstacle à l'arrêt (la plupart du temps un véhicule à l'arrêt).

Utilisation de statistiques de gravité

Le ΔV est défini comme le changement de vitesse subi par le compartiment conducteur durant une phase de collision d'un véhicule à moteur. Nous avons décrit chapitre 1, section 1.1.3 que le ΔV est fréquemment utilisé afin de caractériser la gravité d'un accident car il approxime bien la vitesse de la « seconde collision » celle qui survient entre le conducteur et l'habitacle et qui cause les blessures de l'occupant. Bien sûr, ces courbes sont indicatives et les auteurs rappellent que pour des conducteurs allant de 20 km.h^{-1} à 30 km.h^{-1} on peut trouver des conducteurs légèrement, sérieusement et fatalement blessés. Bien que l'effet de la ceinture ait été pris en compte, d'autres variables peuvent influencer sur la gravité des accidents tels que : l'âge, le sexe, le lieu et le type d'impact, la position du conducteur, la taille, la raideur la forme et le poids du véhicule, la présence d'airbags ou d'autres systèmes de sécurité et le temps avant intervention des secours.

Nous utilisons des statistiques d'accidentologie ainsi que des courbes reliant vitesse de choc et sévérité des accidents tirée de [Richards 09] pour des chocs frontaux (figure 2.19).

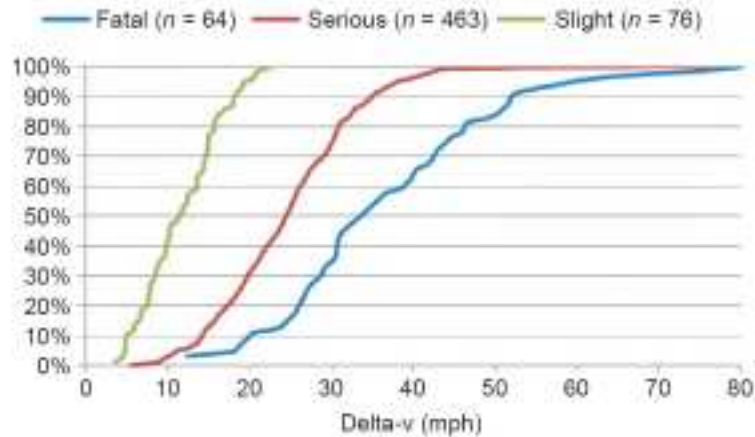


FIGURE 2.19 – Courbes de probabilité d'accident en fonction de ΔV pour des impacts frontaux d'après [Richards 09].

Parmi les trois scénarios,

- lorsque nous considérons un obstacle rigide fixe, que nous considérons que le véhicule est complètement stoppé par l'obstacle, nous assimilons alors la vitesse à l'instant de l'impact au ΔV des courbes de probabilité d'accidents données par [Richards 09].
- Si nous considérons un scénario d'accidents tel qu'un choc contre un véhicule à l'arrêt sur la voie, nous pouvons utiliser l'approximation suggérée par [Patte 09] que les deux véhicules après le choc ont tous deux une vitesse égale à la moitié de la vitesse à l'instant du choc. Nous utiliserons alors les courbes de la figure 2.19 mais en considérant un ΔV égal à la moitié de la vitesse à l'instant du choc.
- Si on considère le traitement du scénario de choc frontal avec une autre véhicule, nous ne pouvons détailler les multiples hypothèses de choc (poids relatif, vitesse relative, orientation, hauteur de caisse). Nous simplifions ce scénario en considérant que nous percutons de face un véhicule identique au notre roulant à la même vitesse que nous. Dans le cas parfait d'un choc frontal entre deux véhicules identiques, les deux véhicules sont stoppés identiquement et réciproquement, ils restent tous deux immobiles et commencent à s'écra-

ser dès l'instant du choc et passent de leur vitesse initiale à une vitesse finale nulle comme pour un obstacle rigide fixe. Nous pouvons donc utiliser telles qu'elles les courbes données figure 2.19.

Afin de disposer de fonctions continues, nous avons fait une approximation des courbes de probabilité d'accident en fonction de la gravité (Probability of Injury, PI) proposées par [Richards 09] par des sigmoïdes telles que :

$$PI_{Grav.} = \frac{a_{Grav.}}{1 + e^{-\frac{x-b_{Grav.}}{m_{Grav.}}}} \quad (2.24)$$

On obtient trois jeux de paramètres (un par courbe) qui concernent les accidents légers, sévères et les accidents fatals. Nous montrons dans la figure 2.20 les courbes approximées par les fonctions sigmoïdes.

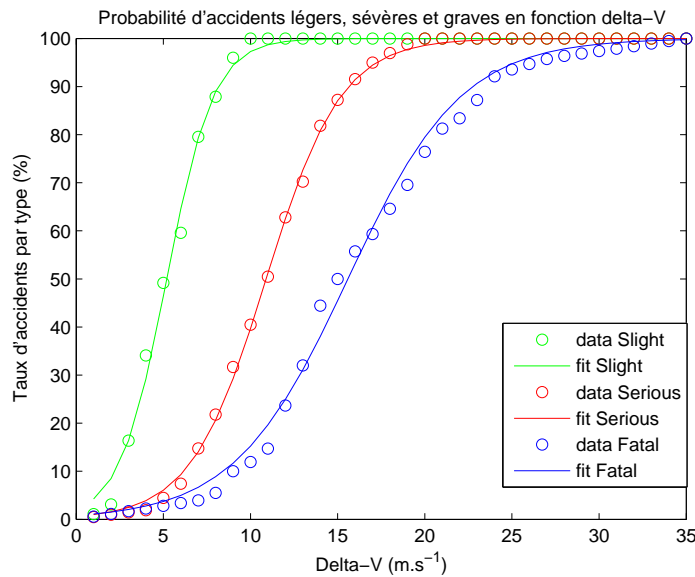


FIGURE 2.20 – Approximation par des sigmoïdes des données relevées dans [Richards 09] présentées figure 2.19.

Nous avons utilisé les courbes de [Richards 09] car elles étaient récentes et pouvaient être intégrées à nos scénarios. Mais les études sont nombreuses et il serait envisageable de redéfinir les scénarios et de trouver des courbes de gravités en correspondance. Il serait également envisageable qu'en fonction de l'utilisation de la ceinture ou de la présence d'airbag ou non à bord du véhicule, on utilise dans le système le jeu de courbes correspondantes comme en propose [Wood 07] et que nous avons exposées figure 1.13, Chap. 1, Sec. 1.1.3, p. 20.

2.3.5 Estimation d'une exposition totale au risque

Lors de la sortie de voie, nous considérons l'adhérence hors de la voie comme nulle et l'obstacle proche de la voie. Le véhicule percute donc l'obstacle à une vitesse proche de celle qu'il avait lors de la sortie de voie. Tous ces scénarios d'accidents réels relevés peuvent donc être résumés à des scénarios dynamiques du type : freinage d'urgence sur la voie puis choc. L'accident type pourrait être la route bordée de platanes, suite à une situation d'urgence, le conducteur peut

freiner sur la voie puis sortir de la voie après 50 m et percuter un platane comme il pourrait sortir après 10 m de freinage et percuter un platane.

Nous illustrons sur la figure 2.21 le profil de vitesse durant un freinage d'urgence (en noir et axes des ordonnées à gauche) pour des conditions de référence et un conducteur roulant à $V_0 = 15 \text{ m.s}^{-1}$ soit 54 km.h^{-1} . Sur la même figure nous faisons apparaître la probabilité d'avoir un accident léger PI_{Leger} , sévère PI_{Severe} ou grave PI_{Grave} si le conducteur percute un obstacle rigide fixe de manière frontale durant le *FU*.

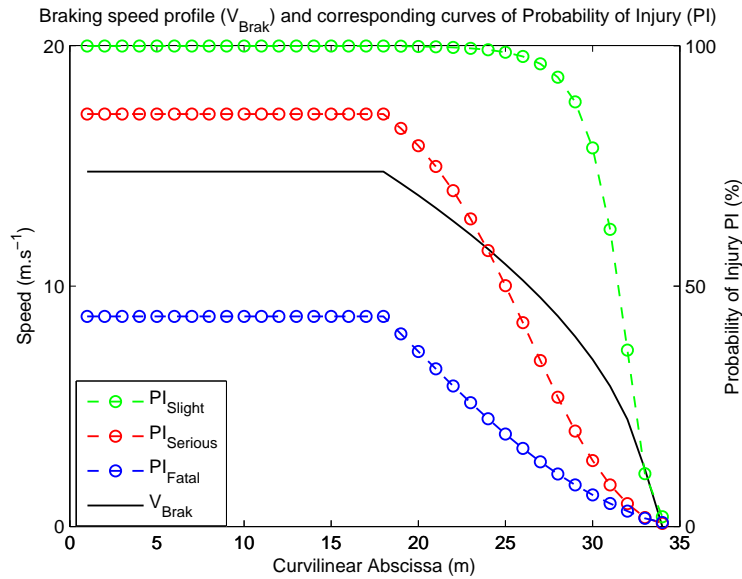


FIGURE 2.21 – Profil de freinage d'urgence V_{Brak} (avec $V_0 = 14.8 \text{ m.s}^{-1}$) et composition par des courbes de probabilité de blessure légère, sévère ou fatale tirées de [Richards 09] présentées figure 2.19.

Nous qualifions d'exposition à un risque d'accident léger, sévère ou grave, l'intégrale de probabilité d'accident d'une gravité donnée entre l'instant de survenue de l'accident et la distance d'arrêt. Cela correspond à l'aire sous les courbes pointillées de la figure 2.21.

Connaissant la vitesse de référence sur un trajet, la V_{85} ou une vitesse issue d'un modèle telle la vitesse V_{SAVV} , l'adhérence de référence en conditions de route sèche, ainsi que les caractéristiques géométriques de la route, nous sommes en mesure d'estimer en chaque point du trajet le profil de vitesse lors du *FU*. Nous sommes donc en mesure d'estimer en chaque point du trajet une exposition au risque d'accident léger, sévère ou fatal pour des scénarios de choc contre obstacle rigide fixe, choc contre autre véhicule de face et choc contre véhicule à l'arrêt.

Nous pouvons noter que la probabilité d'accident léger est pratiquement tout le temps de 100 % entre 0 et 26 m. Le risque d'accident fatal en revanche est inférieur à 50 %, même si le véhicule percutait immédiatement l'obstacle sans avoir commencé à freiner. Il semble évident que lorsque les vitesses seront très basses, l'ensemble de la courbe de probabilité d'accident fatal sera très faible voir nulle quelque soit la distance du choc. Inversement lors des freinages d'urgence à très haute vitesse, la courbe de probabilité d'accident léger sera à 100 % sur pratiquement toute la distance de freinage à l'exception des derniers mètres comme c'est le cas sur la figure 2.21, c'est à dire quand les vitesses de choc sont inférieures à 10 m.s^{-1} comme on peut le voir sur la figure 2.20.

Cela nous amène à considérer qu'il n'est effectivement pas très utile de moduler la vitesse en fonction du risque d'accident fatal aux très basses vitesses et qu'il n'est pas très utile de moduler la vitesse en fonction du risque d'accident léger aux très hautes vitesses. Nous ne voulons pas fonder l'ensemble du système sur une considération trop prudente telle que « en traitant les accidents légers, on traite à fortiori les accidents plus graves », ce qui tend à se rapprocher à la logique de « zéro risque » des autres systèmes. Inversement, nous ne voulons pas négliger les situations à basse vitesse en ne considérant que les accidents fatals.

Nous proposons donc que le système soit auto-adaptatif et tienne compte de la ou des gammes de sévérité d'intérêt en fonction de la vitesse du véhicule. À basse vitesse les recommandations concernant les accidents légers sont plus prises en compte et à haute vitesse les risque d'accidents fatals seraient plus pris en compte. Si nous considérons la moyenne de la probabilité entre 0 et la distance d'arrêt sur la figure 2.22(a), la moyenne pour le risque fatal est d'environ 12 %, elle est d'environ 30 % pour le risque sévère et d'environ 83 % pour le risque léger. Lorsque cette moyenne tend vers 0, c'est que l'événement est très improbable (événement accident fatal à basse vitesse par exemple) et quand elle est très élevée comme c'est le cas pour le risque léger dans la figure c'est que l'événement est très probable (si on entreprend un *FU* à haute vitesse qui doit résulter en un choc contre un obstacle rigide fixe, il est fort probable que la gravité soit au moins légère). Les moyennes très élevées (proches de 100 %) ou très basses (proches de 0 %) ne donnent pas d'informations pertinentes utiles à la modulation de vitesse.

La pondération des scores entre les divers niveaux de gravité peut être réalisée à l'aide de l'équation 2.25. Les trois coefficients de pondération sont normés pour faire une somme unitaire et leurs comportements relatifs sont illustrés sur la figure 2.22(b) le long du trajet pour un conducteur roulant à la V_{85} tel qu'illustré figure 2.3, p. 38.

$$\alpha_{Fa} = \frac{\min(\overline{PI_{Fa}}, 100 - \overline{PI_{Fa}})}{\min(\overline{PI_{Sl}}, 100 - \overline{PI_{Sl}}) + \min(\overline{PI_{Se}}, 100 - \overline{PI_{Se}}) + \min(\overline{PI_{Fa}}, 100 - \overline{PI_{Fa}})} \quad (2.25)$$

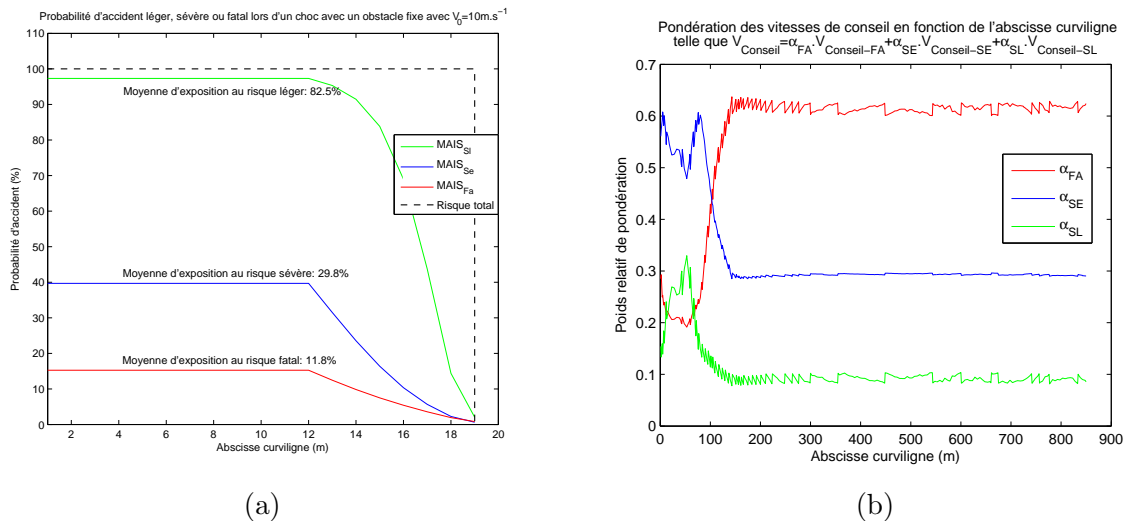


FIGURE 2.22 – (a) Moyenne d'exposition au risque en fonction de la gravité à basse vitesse lorsque $V_0 = 10 \text{ m.s}^{-1}$ (b) Pondération des facteurs de prise en compte d'un niveau de gravité d'intérêt.

Lorsque les vitesses sont inférieures à environ 50 km.h^{-1} en début de parcours, c'est la probabilité d'accident sévère qui servira principalement dans le calcul de modulation de vitesse en

fonction de l'exposition au risque. Au-delà de 50 km.h^{-1} c'est principalement les informations sur le risque de mortalité qui seront considérées. Nous n'avons pas sur notre trajet de vitesses inférieures à 35 km.h^{-1} , vitesse en dessous de laquelle c'est le risque d'accident léger qui prime dans le poids d'une vitesse de conseil d'exposition au risque égale. Pour les vitesses supérieures à 90 km.h^{-1} (toute la fin du trajet) les proportions sont constantes, ce qui est logique étant donné que les moyennes d'exposition aux risques légers et sévères sont alors toutes deux proches du risque total.

Comme nous l'avons fait remarquer, ces trois scénarios peuvent regrouper la quasi totalité des types d'accidents sur routes secondaires. Et s'ils ne sont sûrement pas équiprobables du point de vue de la localisation, ils le sont en répartition globale. Nous proposons d'estimer une exposition au risque totale en considérant une pondération à parts égales de l'exposition au risque selon ces trois scénarios. Nous illustrons sur la figure 2.23 l'exposition à un risque fatal pour un FU initié à $22,5 \text{ m.s}^{-1}$. Comme nous l'avons dit précédemment nous considérons la même gravité en cas de choc contre obstacle rigide fixe et choc contre véhicule de face et nous considérons en revanche une gravité correspondant à la moitié de la vitesse à l'instant du choc pour les chocs contre les autres véhicules. La figure 2.23 est un exemple de composition de la probabilité d'accident fatal pour trois scénarios à proportions égales ($PI_{Fa-Front} = PI_{Fa-Obst.Fixe}$ et en première approximation $PI_{Fa-Arr}(\Delta V) = PI_{Fa-Obst.Fixe}(0.5.\Delta V)$). Nous pouvons faire de même pour chaque niveau de gravité, légère, sévère ou fatale.

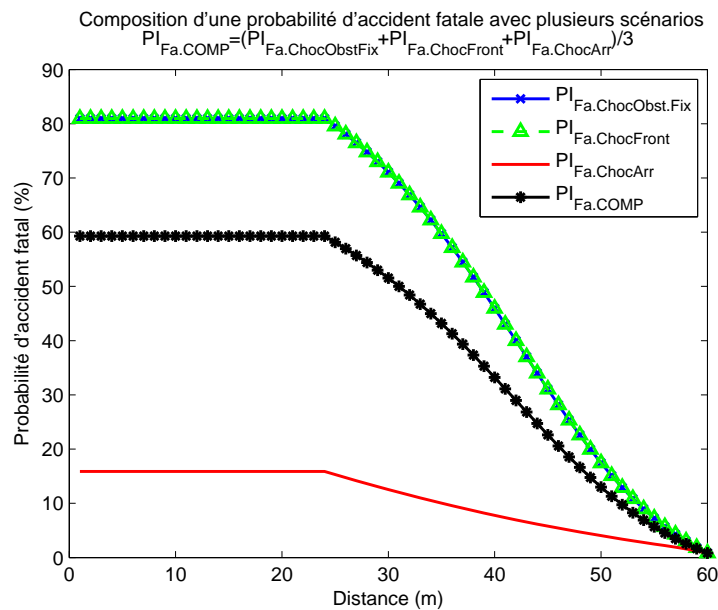


FIGURE 2.23 – Composition d'une probabilité d'accident avec différents scénarios.

Dans la suite, pour des raisons de simplicité et d'intelligibilité, nous illustrons les résultats d'estimation de probabilité d'accident dans diverses conditions à l'aide des courbes de probabilité d'accident fatal. Mais la logique d'une pondération des résultats des différents types d'accidents est appliquée sur le plan calculatoire.

Modulation de la vitesse en conditions dégradées

Nous nous plaçons dans la situation d'un trajet réel s'effectuant en conditions dégradées par rapport à la situation de référence. Ces conditions dégradées peuvent être liées à l'infrastructure, à l'environnement, au conducteur et au véhicule. Elles peuvent néanmoins être différenciées selon qu'il s'agit de conditions permanentes (« défaut » du conducteur ou du véhicule : temps de réaction particulièrement long ou mauvais pneumatiques) ou de conditions ne pouvant être estimées qu'en temps réel (« défaut » de l'infrastructure ou de l'environnement : baisse d'adhérence par temps de pluie ou baisse de la visibilité météorologique).

Nous avons vu qu'un certain nombre de paramètres étaient variables. Nous pourrions utiliser la méthode afin de comparer l'exposition au risque entre un véhicule équipé d'ABS et l'autre non ou entre un conducteur jeune et rapide et un conducteur plus âgé ayant de moins bons réflexes. Mais tel n'est pas l'objectif de cette méthode. Nous souhaitons l'utiliser afin de moduler les vitesses dans deux conditions que nous avons identifiées comme particulièrement dangereuses : les situations d'adhérence et de visibilité dégradée. Notre objectif consiste à proposer une vitesse de conseil telle qu'en conditions dégradées l'exposition au risque en un point du trajet ne soit pas supérieure à ce qu'elle est en conditions de référence.

Modulation de la vitesse en conditions d'adhérence dégradées

Dans le cadre du projet DIVAS, la difficulté que nous avons rencontrée consiste à estimer l'adhérence en conditions dégradées. Nous avons montré des exemples en se fondant sur l'adhérence avec 1 mm de hauteur d'eau sur la voie mesurée par l'appareil de caractérisation de l'infrastructure VANI. Nous avons considéré que nous pouvions estimer en première approximation un profil d'adhérence de référence en recalant le profil sous pluie dans une gamme de valeurs caractéristique des conditions sèches. Mais nous souhaitons pouvoir obtenir une estimation de l'adhérence en fonction de diverses conditions de pluie.

D'après l'étude fournie par Michelin [Spetler 08] dans le cadre du projet, il est possible de connaître l'adhérence en fonction de la hauteur d'eau pour un pneu donné. La hauteur d'eau sur la route varie fortement en fonction de la quantité de pluie, de la rugosité de la surface et de la température une fois que la pluie s'est arrêtée. Nous ne disposons pas encore de méthode embarquée à même de caractériser la hauteur de pluie sur la route dans l'environnement du véhicule. En revanche nous disposons d'une solution alternative. En utilisant un modèle d'estimation de l'adhérence en fonction de la hauteur d'eau nous pouvons estimer l'adhérence en temps réel à un moment donné sur la route. La hauteur d'eau sera mesurée par des modules de bord de voie répartis et affinée en temps réel par une estimation centrée sur le véhicule. Certaines méthodes embarquées existent et permettent d'estimer la présence de pluie en temps réel [Gormer 09, Halimeh 09, Cord 10], nous pouvons les coupler en présence de pluie avec les relevés des serveurs de bord de voie qui sont équipés de stations météo. Nous interpolons la mesure d'intensité de la pluie qui est une des entrées permettant d'estimer l'adhérence à l'aide du modèle de Michelin. D'autres méthodes fondées par exemple sur l'utilisation de traitement d'images avec des filtres polarisants permettent quant à elles d'estimer la présence d'un sol mouillé en amont du véhicule, ainsi même en absence de pluie la hauteur d'eau peut être prise en compte avec le temps passé depuis la dernière pluie et la température ambiante pour estimer la hauteur d'eau résiduelle selon le modèle proposé par Michelin.

Comme on peut le voir sur la figure 2.25, une baisse d'adhérence entraîne un allongement de la distance de freinage (figure 2.25 (a)), mais en plus, la vitesse à une même distance est supérieure donc la gravité potentielle du choc supérieure (figure 2.25 (b)).

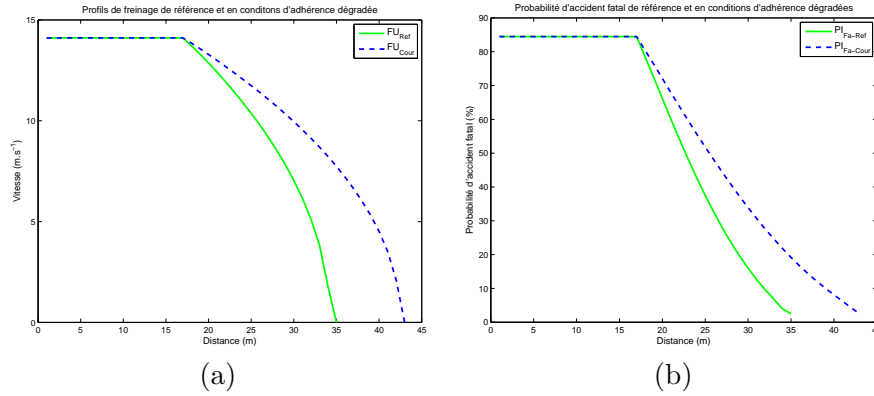


FIGURE 2.24 – Profil de FU en conditions dégradées d'adhérence (a) et « sur-risque » fatal associé (b).

L'objectif de la vitesse de conseil étant de parvenir à une exposition cumulée au risque (assimilée ici à l'intégrale sous les courbes de gravité en fonction de la distance). Nous cherchons donc une vitesse $V_{0-Consail}$ telle que :

$$\int_0^{d_A} PI_{Grav.}(FU_{Ref}(V_0, \mu_{Ref}(x), p(x), t_{PR-Ref}, \gamma_{Ref})) dx = \int_0^{d_A} PI_{Grav.}(FU_{Cons}(V_{Cons}, \mu_{Cour}(x), p(x), t_{PR-cour}, \gamma_{Cour})) dx \quad (2.26)$$

Si nous disposons d'informations sur les caractéristiques réelles du conducteur nous pouvons les utiliser dans le modèle d'estimation du profil de vitesse du FU courant ou du FU de conseil.

Notre stratégie est exposée dans la figure 2.25 en un point du trajet. Nous utilisons une procédure de dichotomie afin de déterminer la vitesse de conseil en conditions dégradées telle que l'intégrale de probabilité de blessure en conditions dégradées soit équivalente à l'intégrale de probabilité de blessure en condition de référence.

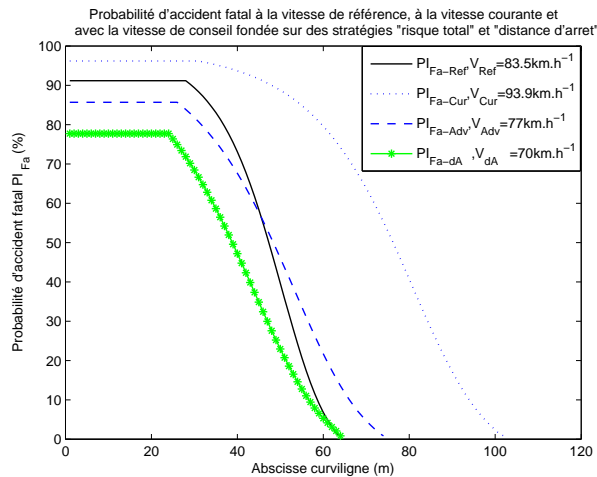


FIGURE 2.25 – Probabilité d'accident fatal lors d'un freinage d'urgence en fonction de la vitesse initiale et de la distance du choc contre un obstacle rigide fixe.

Nous présentons dans la figure 2.25 en trait plein la probabilité de blessure fatale en conditions de référence pour un conducteur roulant à la vitesse de référence $V_{85} = V_{Ref} = 83.5 \text{ km.h}^{-1}$ sur route sèche. Dans cet exemple le conducteur roule à une vitesse excessive dans la situation courante, nous comparons l'intégrale de probabilité de blessure dans la situation de référence et dans la situation courante (ligne pointillée, $V_{Cour} = 93.9 \text{ km.h}^{-1}$ et 1 mm de hauteur d'eau). L'exposition courante étant supérieure à l'exposition de référence, nous calculons une vitesse de conseil initiale $V_{Cons} = 77 \text{ km.h}^{-1}$ telle que le profil de freinage d'urgence présente la même exposition totale au risque que dans la situation de référence. On notera que comme la situation courante se passe sous la pluie les distances de freinage sont rallongées, et même avec la vitesse de conseil $V_{Cons} = 77 \text{ km.h}^{-1}$ la distance de freinage reste plus longue que dans les conditions de référence (74 m contre 64 m). Cela s'explique par le fait qu'avec une vitesse inférieure, un obstacle très proche serait percuté un peu moins vite. Le sur-risque induit par une distance de freinage un peu plus longue est compensé par le sous-risque concernant les chocs potentiels à faible distance.

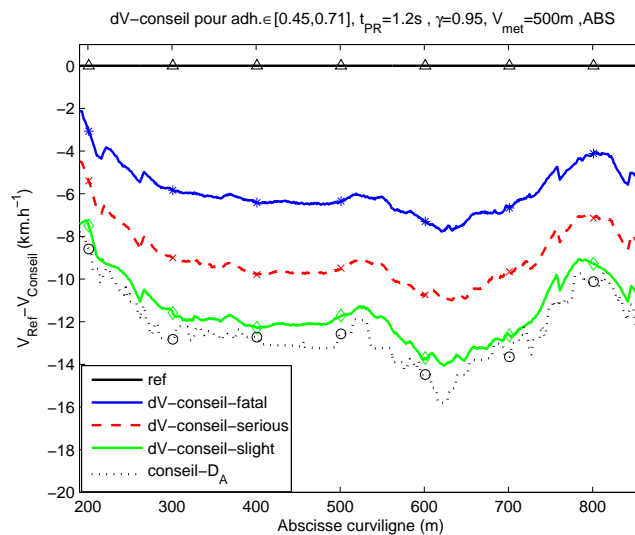


FIGURE 2.26 – Différence de vitesse entre vitesse de référence et vitesses de conseil calculées selon différents critères en présence d'1 mm d'eau sur la route.

Nous présentons également la probabilité de blessure fatale obtenue avec une stratégie « zéro-risque » telle que proposée par [Charbonnier 07, Varhelyi 02, Jimenez 08] (ligne d'astérisques). Cette méthode conduit à proposer une vitesse initiale telle que la distance d'arrêt courante soit égale à la distance d'arrêt de référence (64 m). Comme nous l'attendions, l'utilisation d'une telle stratégie conduit à proposer des vitesses encore plus basses, ici $V_{dA} = 70 \text{ km.h}^{-1}$.

En n'importe quel point du trajet, le risque dans la situation courante et le risque de référence sont comparés. D'après cette comparaison nous pouvons proposer une vitesse de conseil limitant l'exposition au risque au niveau de référence. Nous montrons dans la section suivante des profils de vitesse complets calculés sur tout un trajet en fonction de différentes conditions dégradées.

Nous illustrons sur le trajet de le RD27 quelle serait la proposition de vitesse de conseil en présence d'une route mouillée par 1 mm de hauteur d'eau. Nous donnons une vitesse de conseil différente pour chaque niveau de gravité. Nous utilisons le même conducteur et le même véhicule sous pluie qu'en conditions de référence. Nous illustrons également sur la figure 2.25 quelle serait

la vitesse proposée V_{d_A} en utilisant une stratégie fondée sur la distance d'arrêt (le conducteur sous pluie doit avoir en un point du trajet la même distance d'arrêt en conditions dégradées qu'en conditions de référence).

Modulation de la vitesse en conditions de visibilité dégradées

Nous introduisons pour l'instant notre méthodologie de prise en compte de la distance de visibilité. Nous ne détaillons pas pour le moment comment nous estimons cette distance de visibilité ni de quoi elle dépend, cela fait l'objet du chapitre 3, « Estimation de la visibilité routière ». Nous considérons pour illustrer la méthode des conditions de brouillard dense telles que la visibilité est bornée à une valeur constante sur l'itinéraire.

Le brouillard dégrade essentiellement la visibilité. Les statistiques nationales d'accidents montrent une augmentation de la gravité moyenne des accidents survenant dans le brouillard, ce qui signifie que les conducteurs percutent les obstacles à des vitesses plus élevées. Nous avons choisi d'adapter les calculs de gravité potentielle en considérant que la probabilité d'être blessé conservait une valeur constante au-delà de la limite de visibilité tel que nous l'illustrons pour un brouillard laissant au conducteur 100 m de visibilité dans la figure 2.27. La probabilité de blessure d'une gravité donnée est fixée comme constante de la limite de visibilité jusqu'à la distance d'arrêt totale, $PI_{Grav.}(x > V_{met}) = PI_{Grav.}(V_{met}) = Cte$. La présence de brouillard ou d'un élément bridant la visibilité n'a pas d'impact sur les vitesses de conseil si la distance d'arrêt est inférieure à la distance de visibilité dans le brouillard.

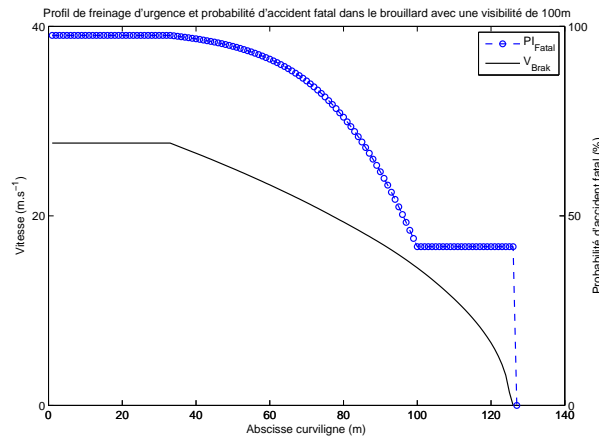


FIGURE 2.27 – Profil de freinage d'urgence (échelle de droite en $m.s^{-1}$) et probabilité d'accident fatal dans le brouillard avec une distance de visibilité de 100m (échelle de gauche en %).

Nous considérons que le conducteur ne peut pas anticiper ce qu'il ne voit pas, dans l'exemple de la figure 2.27, si un obstacle est à 110 m, le conducteur ne débutera sa manœuvre d'urgence qu'une fois l'obstacle à portée visuelle, il ne lui reste donc que 100 m pour freiner et il percute l'objet à 110 m à la même vitesse qu'il aurait percuté un obstacle à 100 m à l'origine.

Nous montrons sur la figure 2.28 un exemple de profil de vitesse en *FU* ainsi que les conséquences sur l'exposition à un accident fatal de la modulation de vitesse en présence de brouillard. Le brouillard est d'une densité telle qu'il ne laisse qu'une portée visuelle de 50 m au conducteur.

Ici encore, on peut voir que la stratégie diffère de la stratégie distance d'arrêt ou « zéro risque », puisque même à la vitesse de conseil, le véhicule peut avoir une distance de freinage

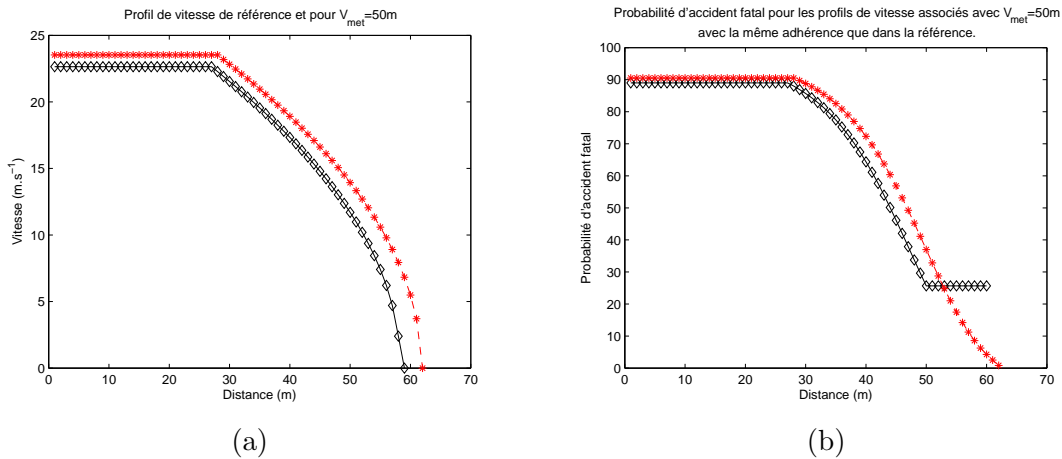


FIGURE 2.28 – (a) Profil de vitesse de référence et de conseil et (b) probabilités d’accident fatal associées pour $V_{met} = 50 m$.

légèrement supérieure à la distance de visibilité. Mais si un choc se produisait dans cette zone, il ne serait vraisemblablement pas très grave et le sur-risque associé au brouillard qui persiste est compensé par la vitesse légèrement moindre qui peut avoir une portée positive sur la gravité des accidents se produisant à proximité.

Nous pouvons dans le cas du brouillard illustrer sur la figure 2.29 le comportement des vitesses de conseil, sur une portion de la RD27, en fonction de la gravité, en présence de brouillard avec une visibilité de $90 m$, avant que nous ne les combinions comme proposé à l’aide de l’équation 2.25.

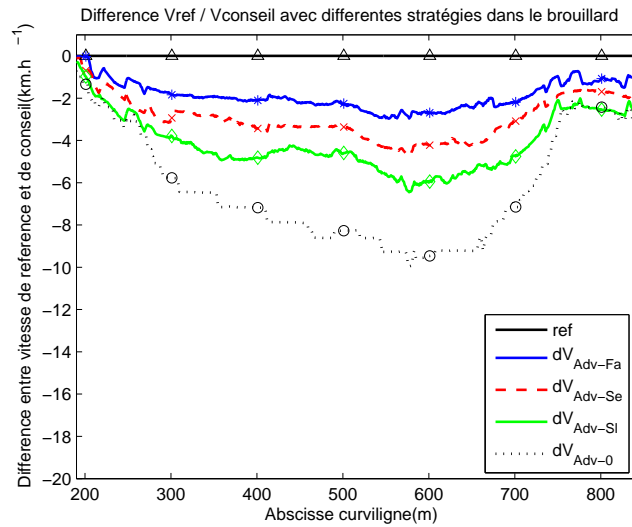


FIGURE 2.29 – Différence de vitesse entre vitesse de référence et vitesses de conseil calculées selon différents critères dans un brouillard avec une distance de visibilité de $90 m$.

Finalement nous pouvons illustrer le résultat final dans différentes conditions dégradées par rapport aux conditions de référence. Nous pouvons tenir compte de dégradations propres au véhicule ou au conducteur, à l’infrastructure et à l’environnement. Nous pouvons faire cela simultanément. Nous montrons sur la figure 2.30 le profil de vitesse final calculé selon la méthodologie

présentée lorsque les conditions d'adhérence et de visibilité se dégradent simultanément.

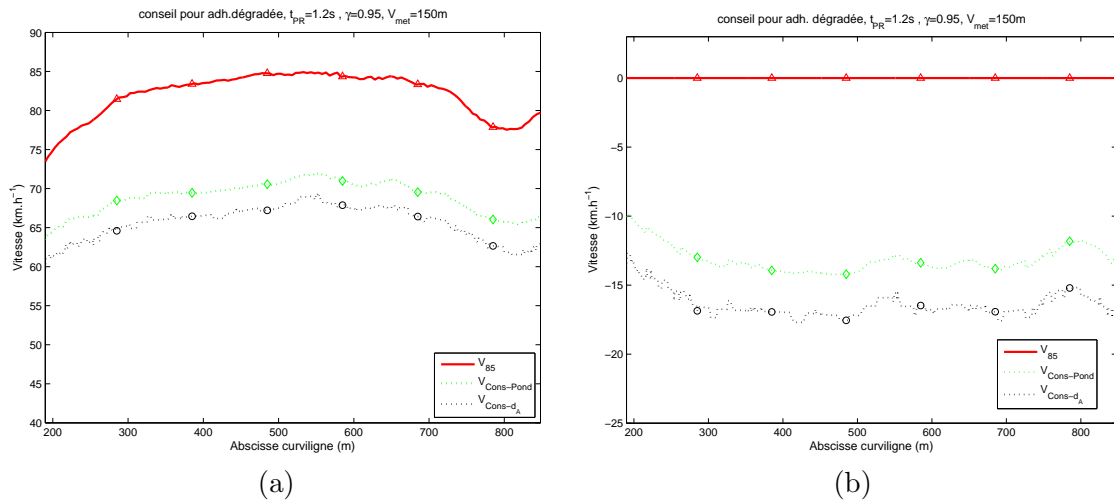


FIGURE 2.30 – (a) Profil de vitesse de référence, vitesse de conseil pondérée et vitesse de distance d'arrêt (b) différentiel de vitesse entre la vitesse de référence et les vitesses de conseil avec une adhérence dégradée et une visibilité de 150 m.

2.4 Bilan et perspectives

Nous avons proposé une nouvelle interprétation du risque comme l'intégrale de probabilité d'accidents plus ou moins graves selon un scénario générique en freinage d'urgence. Nous n'avons pas souhaité rentrer dans un niveau plus détaillé d'accidentologie du point de vue des scénarios (chocs multiples, processus de déclenchement de l'accident, configuration précise lors du choc, *etc.*). En revanche, nous pouvons utiliser plus finement les études d'accidentologie afin de rattacher au mieux la variété des scénarios réels observés à nos scénarios génériques.

En proposant une adaptation de la vitesse en fonction de la gravité, nous réalisons une analyse du risque entendu comme le produit d'une probabilité et d'une gravité. Nous avons montré que cette méthode pourrait être enrichie en ajoutant de nombreux paramètres (propres au véhicule, aux pneus, au conducteur).

Nous avons montré que notre méthode d'estimation du risque pouvait prendre en compte aussi bien des paramètres conducteurs (t_{PR}), véhicule (présence d'ABS, pneus) ou de conditions extérieures comme une mauvaise adhérence ou une distance de visibilité limitée. Nous n'avons pas précisé pour l'instant comment était interprétée la distance de visibilité. Dans nos calculs nous avons considéré du brouillard de jour et avons utilisé la notion de distance de visibilité météorologique avec des distances comprises entre 50 m et 150 m. Les vitesses proposées semblent raisonnables, elles se situent par définition entre la vitesse de référence V_{85} et la vitesse calculée selon le critère distance d'arrêt, déjà étudié dans le domaine et jugé ici trop contraignant.

Cette méthode peut être enrichie par des données spécifiquement adaptées aux traitements (par une définition conjointe des scénarios génériques à prendre en compte et de courbes de gravité associées, pour les piétons ou les animaux par exemple ou pour des classes de véhicules différents). Pour cela nous aurons plus de précisions une fois que nous aurons défini précisément les paramètres auxquels nous avons accès (à partir du bus CAN, présence ou absence d'ABS, estimation possible du temps de la pression moyenne d'un conducteur ? connaissance de l'état

des pneumatiques par exemple).

Nous envisageons la probabilité de choc contre un obstacle comme équiprobable en avant du véhicule. Nous n'utilisons pas une cartographie d'obstacle en proximité de voie ou sur la voie (par la détection temps réel des obstacles sur la voie, de leur nature et de leur distance). Il serait envisageable, si les informations étaient disponibles à l'avenir, de moduler en temps réel nos préconisations de vitesses en fonction d'une densité moyenne d'obstacle en bord de voie par exemple, des obstacles potentiels sur la voie ou de leur dangerosité potentielle (obstacles rigides fixes, panneaux et mobilier « léger » barrières, distance à la voie, *etc.*). L'intérêt serait de rendre compte de la différence de risque d'accident en sortie de voie entre une ligne droite bordée de platanes placés à 3 m en bord de voie et une route entre des champs sans fossé de séparation ni barrière (le risque de choc contre obstacle est très faible mais le risque de retournement existe toujours) ou encore une route bordée d'une barrière de sécurité.

D'après [Blum 06] l'acceptabilité pourrait être meilleure par une meilleure information et un individualisation du conseil. Nous pouvons individualiser le conseil si besoin est et nous pouvons également décrire au conducteur les dangers qui sont associés à une proposition de modulation, pour une meilleure compréhension des facteurs de risque et une meilleure tolérance aux propositions faites.

Nous avons décrit les facteurs à prendre en compte dans l'accidentologie et les moyens d'obtenir des résultats efficaces. Nous avons montré que les ISAs présentaient un fort potentiel pour intervenir sur l'accidentologie et que cette problématique s'appliquait particulièrement bien en rase campagne où les problèmes dynamiques (et donc liés aux vitesses pratiquées) sont plus nombreux que les problèmes de trafic. Nous avons montré qu'il nous fallait renseigner un certain nombre de paramètres en entrée du modèle. Si certains de ces paramètres peuvent être fixés *a priori* en considérant un conducteur et un véhicule de référence typiquement. D'autres aspects, d'ordre conjoncturels ne peuvent être estimés qu'en temps réel. C'est le cas de deux paramètres impactant fortement la conduite et les capacités de freinage que sont l'adhérence et la visibilité. Nous avons évoqué différentes méthodes permettant d'estimer l'adhérence à partir d'informations que l'on est en mesure d'acquérir par la fusion de données de capteurs de bords de voie et de capteurs embarqués pour alimenter le modèle d'adhérence de Michelin. En revanche nous ne sommes pas rentré dans le détail en ce qui concerne la notion de visibilité et les moyens de l'estimer. C'est l'objectif des deux prochains chapitres. Le premier décrivant les différentes notions recouvertes par le terme de visibilité et les modèles psychophysiques et physiques associés. Le suivant entrera dans le détail des méthodes d'estimation de la visibilité embarquées utilisant le traitement d'images.

Visibilité routière

Nous avons introduit dans le chapitre précédent deux notions centrales dont il faut tenir compte dans l'étude des risques routiers : l'adhérence et la visibilité. L'adhérence nécessite d'une part la connaissance de paramètres statiques ou lentement dynamiques tels que la nature du pneu considéré, la micro et la macro-texture de la route et d'autre part la connaissance de paramètres dynamiques tels que la hauteur d'eau sur la route. Nous pouvons faire une analogie avec les connaissances requises pour prendre en compte et estimer la visibilité routière. Alors que certains aspects de la visibilité routière sont statiques ou faiblement dynamiques tels que les notions de visibilité géométrique et photométrique, d'autres sont au contraire hautement dynamiques tels que la visibilité atmosphérique. Cette dernière est influencée par la pluie ou le brouillard, qui sont des événements localisés dans le temps et dans l'espace. Elle requiert donc une estimation dynamique.

La visibilité est un concept jugé du point de vue humain. Cela implique donc de comprendre quels sont les paramètres déterminants de la vision humaine en situation de conduite. Cela nécessite également de se placer dans le cadre de scénarios dans lesquels on cherche à savoir si un humain est en mesure de voir la route, de détecter un autre véhicule ou un obstacle. La visibilité routière caractérise la visibilité de la voie et de ses marquages lorsque l'on s'intéresse au guidage, mais elle peut caractériser la visibilité sur obstacles routiers lorsque l'on s'intéresse à la sécurité du conducteur. Lors de la définition ou l'exploitation de scénarios routiers afin de caractériser la visibilité, nous nous sommes focalisé sur la distance de visibilité sur obstacle, qui nous semble la plus adaptée aux analyses d'itinéraires à risque. Nous présenterons les outils, modèles et scénarios permettant d'estimer des distances de visibilité sur obstacle dans différentes configurations de route, de luminosité et de météorologie. Nous détaillerons les paramètres déterminants de ces modèles et comment nous alimentons les bases de données et les modèles dans le cadre coopératif du projet DIVAS.

La visibilité joue un rôle particulièrement important dans la mesure où la vision est le moyen privilégié de prise d'informations utilisé par les conducteurs pour percevoir leur environnement [Sivak 96]. Nous abordons la notion de visibilité routière en distinguant deux catégories : la visibilité structurelle et la visibilité conjoncturelle. Nous allons dans la suite clarifier ces deux aspects de la visibilité routière, établir leurs interactions et présenter les méthodes et outils qui permettent de les estimer. Enfin, nous présenterons des applications de l'estimation de la visibilité le long de trajets réels sur route secondaire et sur piste fermée.

3.1 Les différentes composantes de la visibilité routière

Le vocabulaire de la visibilité est très riche et les définitions de distances ou de concepts de visibilité, nombreux [Brémond 07]. Une étude des principaux documents officiels de recommandations pour l'aménagement routier [ARP 94, IIS 98, ICT 00, ICT 09] fait apparaître une dizaine de définitions différentes, ayant pour point commun d'être fonctionnelles, c'est-à-dire dépendantes d'un scénario ou d'une situation d'usage de la route. Ainsi, dans l'ARP (Aménagement des Routes Principales [ARP 94]), on distingue la visibilité sur virage, sur obstacle localisé sur la voie, en intersection ou pour le dépassement. Ces notions se sont diversifiées avec les situations et les aménagements. Dans [ICT 09], on trouve les notions de visibilité sous ouvrage, en angle saillant, aux points d'entrée et sortie. Ces différentes notions mêlent aussi bien visibilité géométrique, photométrique et atmosphérique. Nous clarifions dans la suite comment nous interprétons ces aspects.

La distance de visibilité géométrique définit généralement la distance maximale à laquelle un objet est visible sans être masqué par l'environnement. L'objet pris en compte en fonction du scénario peut être : la voie elle-même, un véhicule sur la voie, un piéton ou quelque objet que ce soit (panneau de signalisation, pneu, *etc.*). Comme nous l'avons souligné dans le chapitre 2, les normes de construction des routes récentes et l'établissement des limites de vitesses associées tiennent compte de la topographie de la route pour des aspects liés à la dynamique et à la visibilité. Si aujourd'hui la visibilité géométrique sur autoroute est très bonne (théoriquement supérieure à 280 m), il n'en est pas de même sur le réseau secondaire pour lequel les préceptes sécuritaires de construction fondés sur la visibilité n'existaient pas encore ou ne pouvaient pas être appliqués. Des points durs du point de vue de la visibilité géométrique subsistent et demandent une prise en compte particulière, assurée entre autres par des modulations locales des vitesses limites. La connaissance de ces points durs a donné lieu au développement d'outils de caractérisation de la visibilité géométrique que nous présentons dans la suite.

La visibilité photométrique est la capacité qu'aura un humain à détecter ou identifier un objet de caractéristiques photométriques données dans son environnement. Par association, la distance de visibilité photométrique est la distance maximale à laquelle cet objet peut être détecté dans son environnement. De même que les normes de construction des routes intègrent des aspects de visibilité géométrique, les normes de fabrication de nombreux équipements de la route et des véhicules intègrent des aspects photométriques comme critères de performances. Ainsi, les marquages, panneaux de signalisation et les feux de véhicules tiennent compte de normes photométriques dans les processus de développement et de fabrication. À la différence des routes, ces divers équipements peuvent être plus facilement modifiés ou changés afin de s'adapter aux nouvelles normes en vigueur. Ils sont aussi plus sensibles à une altération temporelle de leurs propriétés assurant leur visibilité. Pour ces raisons, divers équipements de contrôle et de diagnostic ont été développés afin d'analyser leurs caractéristiques. Nous présentons l'exploitation qu'on peut faire des mesures de ces matériels en conjonction avec des modèles de photométrie des objets et des modèles de vision humaine, ce, afin d'estimer la visibilité photométrique.

Nous nous sommes intéressés à la visibilité structurelle afin de comprendre les limites de visibilité propres à l'infrastructure et à ses équipements. C'est cette visibilité qui peut servir de guide à l'établissement de limites de vitesses limites en conditions idéales (pas de trafic, temps clair). Jusqu'alors, nous n'avons pas considéré de milieu participant et avons considéré que l'atmosphère était transparente. Nous abordons ensuite l'interaction de la visibilité structurelle et de la visibilité atmosphérique afin de comprendre le sur-risque induit par des conditions météorologiques dégradées. La distance de visibilité atmosphérique est la capacité à détecter ou identifier un objet donné, dans une scène donnée en présence d'une atmosphère dégradée.

3.2 Visibilité géométrique

3.2.1 Masquages de la route par son profil en long

Nous avons évoqué dans le chapitre 2 que les processus de construction des routes modernes répondaient à des contraintes de sécurité parmi lesquelles des contraintes de visibilité géométrique. Nous avons également précisé que ces contraintes étaient exprimées dans le cadre d'un scénario générique dit d'« arrêt sur obstacle ». Nous détaillons ici comment ces contraintes sont traduites en termes d'aménagement et de construction des voies et quels sont les outils et les méthodes permettant d'estimer la distance de visibilité géométrique. Dans le cadre de notre problématique, c'est le fait que les routes secondaires n'aient pas toujours bénéficié de ces normes de construction qui rend indispensable le développement d'outils dédiés à l'estimation de la distance de visibilité géométrique.

En section courante (hors intersection, hors agglomération) la visibilité géométrique hors trafic est structurellement limitée en haut de côtes ainsi que dans les virages. Les scénarios considérés pour estimer la visibilité structurelle considèrent toujours un véhicule seul et une cible dans le cadre d'une topographie de la route donnée et de son environnement proche.

En haut de côtes, la portée visuelle du conducteur peut être limitée au-delà du sommet comme illustré figure 3.1. Les paramètres impactant la visibilité géométrique sont la hauteur des yeux du conducteur, la hauteur de la cible et le rayon de courbure du profil en long de la route tel qu'illustré sur le schéma ci-dessous tiré du guide d'aménagement des voies [Vertet 06].

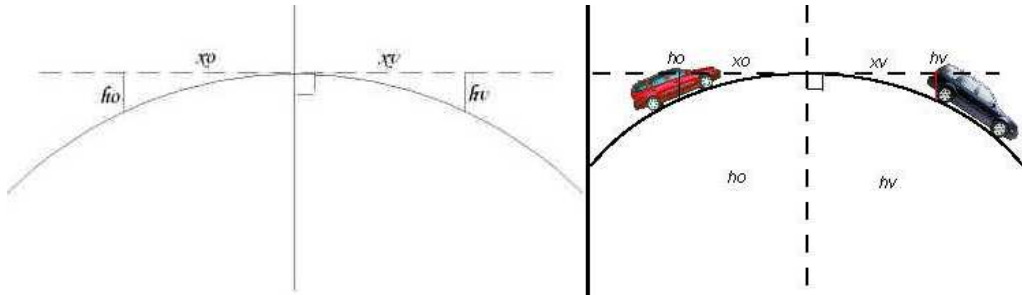


FIGURE 3.1 – Visibilité géométrique en haut de côte.

Le scénario de « visibilité sur obstacle » prend en compte deux hauteurs de référence. La première est la hauteur des yeux du conducteur qui est fonction de la hauteur d'assise du véhicule considéré. Elle peut être très différente qu'il s'agisse d'un véhicule léger ou d'un camion ; on considère en général une hauteur de 1 m pour les véhicules légers. La deuxième est la hauteur de la cible considérée, qui peut être prise à 0,35 m si l'on considère la hauteur d'un obstacle quelconque sur la voie ou d'un panneau triangulaire de pré-signalisation, 0,6 m si l'on considère la hauteur courante des feux arrières d'un véhicule ou enfin 1 m si l'on considère un véhicule en sens opposé. La distance de visibilité géométrique est alors telle que :

$$D \simeq \sqrt{2R} \left(\sqrt{h_o} + \sqrt{h_v} \right) \quad (3.1)$$

avec h_o et h_v la hauteur des yeux du conducteur et de la cible et R le rayon de courbure de la route selon son profil en long.

Selon ce calcul, la distance de visibilité sur des obstacles à différentes hauteurs en fonction du rayon du profil en long est illustré sur la figure 3.2.

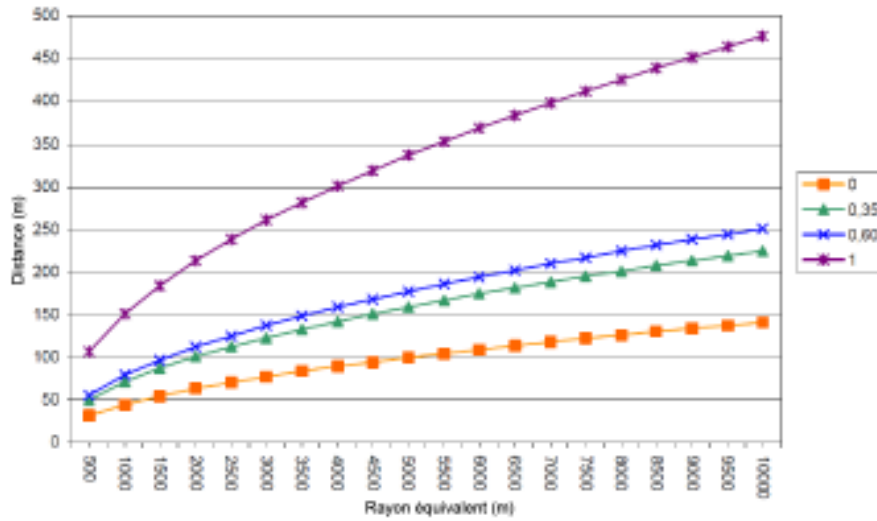


FIGURE 3.2 – Distance de visibilité sur obstacle en fonction du rayon du profil en long et de la hauteur de l’obstacle.

Nous voyons que lorsque le rayon du profil en plan est proche de 500 m, la distance de visibilité vaut entre 35 m et 110 m en fonction de la hauteur de l’obstacle considéré. Lors de l’exploitation de telles informations et de telles normes lors de la construction et l’aménagement de la voie, si l’on considère le pire scénario (visibilité sur un obstacle de 0,35 m de haut), il ne semble pas raisonnable de limiter la vitesse en utilisant le scénario d’« arrêt sur obstacle » car on briderait alors la vitesse des conducteurs à environ 25km.h^{-1} . Une solution potentielle serait une augmentation du rayon du profil, mais le coût d’un arasement de la côte serait prohibitif. En définitive, la route ne sera pas modifiée et seule la mise en place de panneau de prévention ou d’une limite de vitesse locale est envisageable.

Les bas de côtes sont présumés ne pas poser de problèmes de limitation de la visibilité géométrique de jour, en revanche de nuit ils peuvent borner la portée des phares. Mais le problème n’est pas considéré comme dû à la géométrie de la route car il n’est pas lié à un masquage, il est considéré comme étant d’ordre photométrique.

3.2.2 Masquages de la route par le profil en plan de la route

Concernant la visibilité en virage, on considère par convention un virage à droite en « U » (ligne droite, virage à courbure constante puis ligne droite), la visibilité géométrique d’un tel virage étant généralement plus faible que dans les virages à gauche du fait de la marge offerte par la voie de gauche. On considère également qu’un masque vertical (mur, arbres, etc.) suit la courbure de la route et bride la visibilité géométrique. Les schémas de la figure 3.3 illustrent la situation. La hauteur de l’obstacle ou de l’observateur ne sont pas prises en compte et les paramètres déterminants sont le rayon de courbure du virage, le dégagement latéral du masque par rapport au bord de voie, la position du conducteur par rapport au bord de voie ainsi que celle de l’obstacle.

D’après la figure 3.3(b), la distance de visibilité géométrique en virage est alors telle que :

$$D = \sqrt{e_1^2 + 2Re_1} + \sqrt{e_2^2 + 2Re_2} \quad (3.2)$$

avec R le rayon de courbure, e_1 la distance du conducteur au masque vertical (supposé ici suivre le rayon de courbure) et e_2 la distance de l'obstacle au masque vertical (cf. Fig.3.3(b)). En général on considère l'œil du conducteur à 2 m du bord de voie et l'obstacle au centre de la voie (environ $1,8\text{ m}$). La distance e_1 étant la somme de la distance du conducteur au bord de voie et du dégagement latéral du masque par rapport au bord de voie ; de même en ce qui concerne l'obstacle.

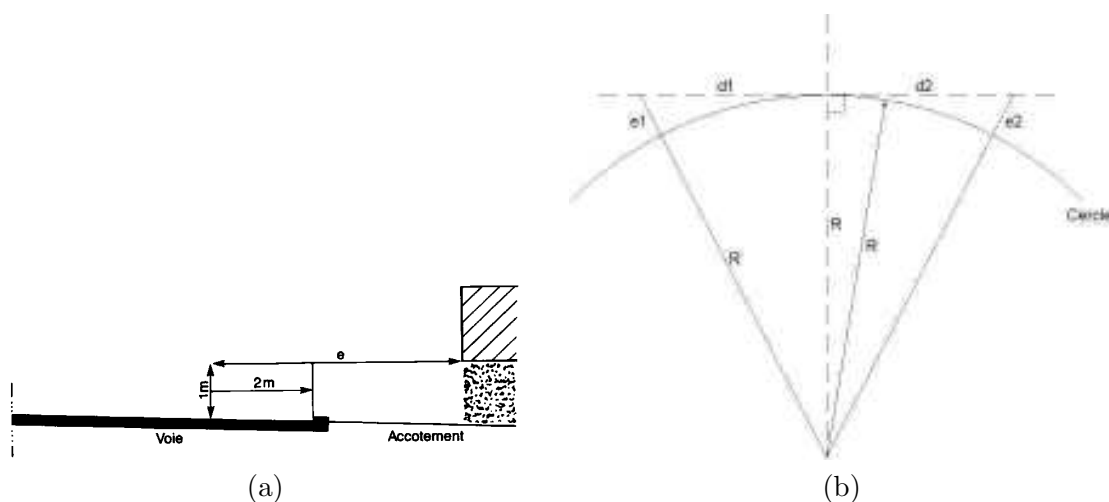


FIGURE 3.3 – Estimation de la visibilité géométrique à partir du tracé en plan d'un virage et évolution de la visibilité géométrique à l'abord d'un virage en fonction du sens de parcours.

De deux choses l'une, soit la route est en cours de construction et ces normes permettront de définir quelle devra être la distance minimale entre le bord de voie et un masquage en tenant compte de la vitesse réglementaire envisagée et du rayon de courbure de la voie. Soit la route est déjà construite, on constate qu'il existe un point dur concernant la visibilité géométrique, en général une signalisation locale permettra de prévenir les conducteurs du danger potentiel. C'est sur le réseau secondaire qu'on a le plus de besoins d'outils permettant de faire diagnostic de la visibilité géométrique.

Bien que l'on parle de visibilité structurelle en virage, celle-ci étant liée à l'environnement de bord de voie, elle peut avoir une évolution conjoncturelle, en particulier en ce qui concerne la végétation (champs ou arbres ayant des variations saisonnières ou en fonction des périodes de taille ou de récolte). Selon ce calcul, la distance de visibilité sur obstacle en fonction du dégagement latéral entre le bord de voie et l'accotement masquant la route est illustré sur la figure 3.4 :

On notera qu'une augmentation, même faible du dégagement latéral apporte une augmentation importante de la visibilité géométrique (10 m de visibilité en plus environ pour 1 m de dégagement latéral supplémentaire).

Ces contraintes de sécurité associées à la visibilité lors de la construction des routes modernes nous donne une méthodologie pour l'estimation et la compréhension des paramètres influant sur la visibilité géométrique. Les routes du réseau secondaire n'ont en général pas bénéficié de telles normes de construction et on ne peut présumer de la visibilité géométrique en fonction du type de route. Ce manque de connaissance de la visibilité géométrique réelle a donné lieu ces dernières années au développement d'outils d'estimation de la visibilité géométrique réellement disponible.

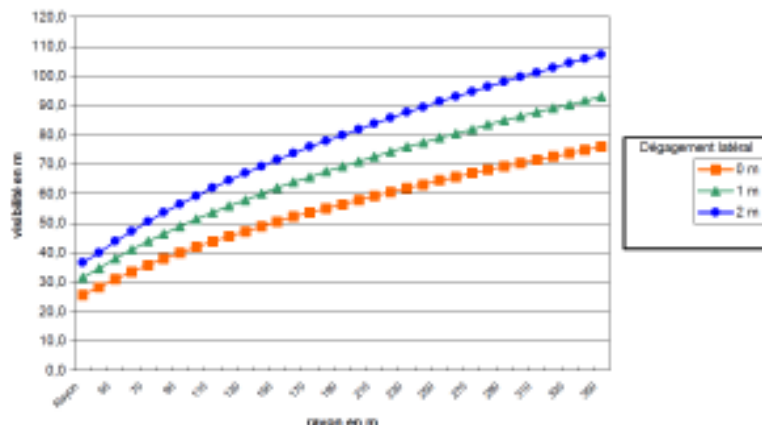


FIGURE 3.4 – Distance de visibilité sur obstacle en fonction du rayon du virage et de la distance entre le bord de voie et un masque vertical.

3.2.3 Outils de diagnostic de la visibilité géométrique

Outre les considérations théoriques présentées précédemment permettant d’estimer grossièrement la visibilité géométrique à partir de connaissance topographiques et environnementales de la route, plusieurs outils dédiés à une appréciation plus fine de cette notion ont été développés.

Une méthode développée par le LRPC de Saint-Brieuc, VISULINE, consiste en deux véhicules géoréférencés se suivant sur la route et reliés par une liaison radio. Pour chaque position du véhicule suiveur sur la route, le véhicule le précédant avance jusqu’à ce qu’il ne soit plus visible, on relève alors la distance de visibilité géométrique, puis le véhicule suiveur est avancé à sa position suivante (*cf.* Fig. 3.5).

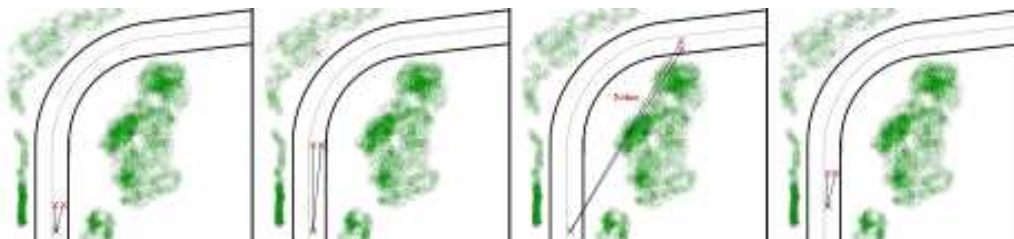


FIGURE 3.5 – Méthode d’estimation de la visibilité sur obstacle (ici deux feux). La cible est progressivement avancée jusqu’à disparition complète puis la même méthode est appliquée après avoir avancé le point d’observation.

Ce processus, bien que parfaitement adapté à la situation car il est appliqué en conditions écologiques (véhicules réels se déplaçant sur la voie, jugement humain de la part du conducteur du véhicule suiveur) est lourd en termes de coût et de temps. De plus, il demande de bloquer la voie sur laquelle les véhicules circulent.

Des méthodes plus récentes s’appuyant sur une modélisation 3D plus ou moins complète de l’environnement routier à l’aide de véhicule auscultateurs, permettent d’estimer *a posteriori* la distance de visibilité géométrique. L’une de ces méthodes, exposée dans [Tarel 09] consiste en une analyse d’images de scènes routières acquises par une caméra monoculaire embarquée dans

un véhicule. Une première phase de traitement consiste en une segmentation de la scène entre espace navigable et environnement routier par propagation et apprentissage non-supervisé des pixels de route (Cf. Fig 3.6). Le masque situé dans la partie supérieure de l'image 3.6(a) est utilisé à chaque image pour apprendre les propriétés d'intensité et de couleur des pixels « non route » et le masque situé dans la partie inférieure sert lui à l'apprentissage des pixels appartenant à la voie (pixels « route »).

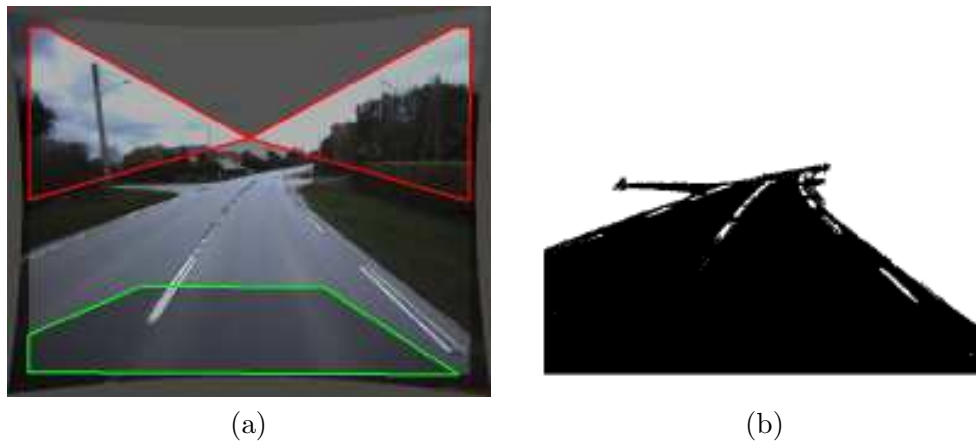


FIGURE 3.6 – (a) Image source et zones d'apprentissage de l'espace roulable et de l'environnement, (b) après segmentation de la voie.

Une fois la route segmentée, en se fondant sur une hypothèse « monde plan », la distance du plus lointain point de la route (le plus haut dans l'image) est calculé à l'aide de l'équation 3.3.

$$D = \frac{Hf}{h_y(v - v_h)\cos(\theta)} \quad (3.3)$$

avec H la hauteur de la caméra en mètres, f sa focale en mm, h_y la hauteur d'un pixel en mm, θ l'angle de tangage, v_h l'indice de la ligne image contenant la ligne d'horizon et v l'indice de la ligne contenant le point considéré.

Les résultats de la méthode d'estimation de la ligne d'horizon et de segmentation de la voie sont illustrés dans la figure 3.7 (a) et (b). Cette méthode mono-caméra renseigne sur la visibilité géométrique de la chaussée bien que l'assertion « monde plan » en limite la portée aux routes planes. Elle peut aisément être embarquée sur un véhicule auscultateur roulant à la vitesse limite autorisée. Il faut toutefois que la voie ne soit pas occupée par du trafic, ce qui pourrait également fausser l'estimation de la distance de visibilité.

Cette méthode a ultérieurement été affinée dans [Charbonnier 10] par l'utilisation d'un capteur stéréoscopique. La méthode est assez similaire : extraction de la voie, identification des bords de voie dans les deux vues, estimation du profil de chaussée puis estimation du point le plus distant appartenant à la voie. L'utilisation de la stéréo permet de s'abstraire de l'hypothèse « monde plan » et des erreurs associées à celle-ci dans le cas où la route n'est pas plane. L'estimation de la distance du point de la route le plus lointain est améliorée par l'utilisation de la stéréo ainsi que par une correction de la déformation géométrique de la caméra. Elle reste cependant sensible au masquage de la route par d'autres véhicules.

Ces méthodes d'analyse d'images ne permettent toutefois pas d'obtenir une distance de visibilité en considérant un obstacle à une hauteur et un positionnement donnés sur la voie, ce qui correspond aux scénarios retenus dans la réglementation présentés en section 3.2.



FIGURE 3.7 – (a) Image source, (b) après segmentation et extraction des lignes de fuite.

D'autres méthodes d'estimation de la distance de visibilité géométrique s'appuient sur la 3D. Le processus consiste en une acquisition haute résolution de l'ensemble des coordonnées relatives de l'environnement de la voie à l'aide d'outils tels que des LIDARS. Un véhicule géoréférencé est équipé d'un ou plusieurs LIDARS. Il permet de numériser l'environnement avec une plus ou moins grande précision, souvent liée à sa vitesse de déplacement, à la distance des points visés par le ou les LIDARS et à la technologie des LIDARS (circulaire, linéaire, mono-plan, multi-plans, fréquence de balayage, précision matérielle). À partir des nuages de points mesurés et placés dans un référentiel commun, l'environnement est reconstruit *a posteriori* après une phase de facettisation du nuage de points. Une fois l'environnement facettisé, on peut placer virtuellement un observateur ainsi qu'une cible à des hauteurs et des positions données et vérifier par une méthode de lancer de rayon qu'il n'y a pas d'obstacle obstruant la vue. Pour chaque position d'observateur on recule la cible virtuelle jusqu'à ce qu'il y ait obstruction de la vue, la distance de visibilité est alors relevée comme la plus grande distance à laquelle la cible était visible. On peut voir sur la figure 3.9 le nuage de point acquis par le véhicule LARA3D du Centre de Robotique des Mines ParisTech ainsi que l'environnement reconstruit après facettisation [Goulette 06].



FIGURE 3.8 – Résultat de la détection de voie et de l'estimation de la position de la ligne d'horizon.

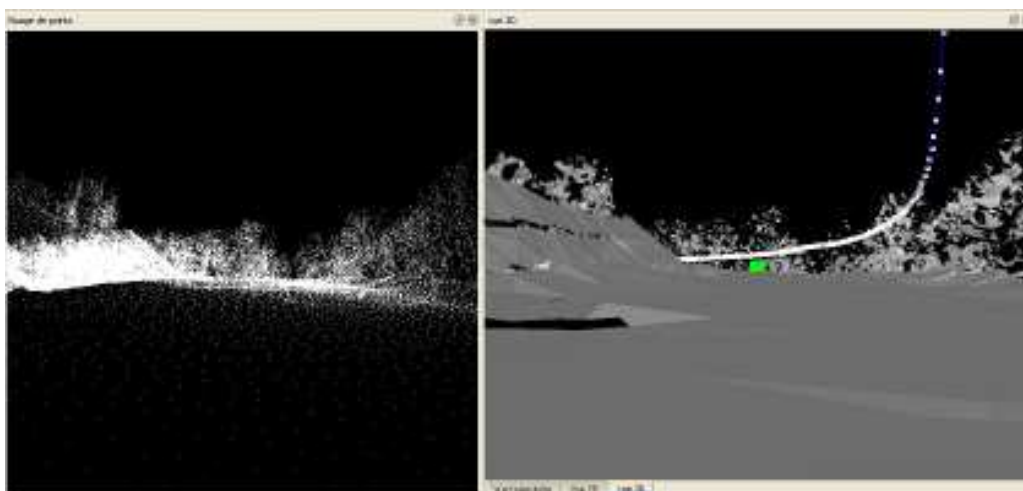


FIGURE 3.9 – Nuage de points acquis par le véhicule LARA3D et environnement après facettisation.

L'intérêt de telles méthodes réside dans le fait qu'une fois l'environnement reconstruit, on peut simuler tout type de cible (véhicule, feux de véhicules, piétons, *etc.* à n'importe quelle position (centre de voie, bord de voie, *etc.*). On peut ainsi estimer différentes notions de visibilité géométrique telles que la visibilité de la voie ou la visibilité sur obstacle.

Ces outils ont également donné lieu à la proposition de nouvelles estimation de la visibilité telles que le pourcentage de visibilité de cibles volumiques en virage, calcul difficile à effectuer par des méthodes écologiques avec observateurs et cibles réelles sur site.

En revanche une des limites rencontrées, qui se situe en amont de l'estimation de la visibilité géométrique, est dans la reconstruction de l'environnement et la facettisation. Trois situations sont particulièrement complexes, premièrement, le trafic sur la route masquera régulièrement l'environnement et le stationnement en ville pourra se révéler très gênant. Deuxièmement, les environnements végétaux ne sont pas des grands objets à facettes simples comme les bâtiments et peuvent présenter des parties non pleines (donc pas de point enregistré puisque le rayon issu du LIDAR ne rencontre aucun obstacle). Enfin, certains objets tels que piquets, panneaux ou arbustes sont problématiques car ils ne sont couverts que par peu de points d'acquisition. Ils sont donc difficiles à identifier en tant qu'objets indépendants et peuvent être facettisés en association avec leur environnement proche, donnant lieu à la création de parois (facettes) n'ayant pas d'existence réelle. Dans ces circonstances, les facettes peuvent biaiser l'estimation de la distance de visibilité géométrique.

3.2.4 Intégration de la visibilité géométrique

Comme nous l'avons souligné précédemment, les routes secondaires n'ont pas, ou peu, bénéficié des normes et méthodes de construction des routes tenant compte de la visibilité géométrique. Afin de suivre les requêtes politiques demandant une baisse de l'accidentologie, la compréhension de l'impact de la distance de visibilité sur l'accidentologie aussi bien que la mise en adéquation des vitesses locales en rapport avec l'offre de visibilité est nécessaire. Le développement d'outils de grand rendement ne nécessitant pas l'interruption du trafic et permettant d'estimer la distance de visibilité géométrique est pertinent pour les gestionnaires de ces voies. Le problème de

la saisonnalité de la végétation ou de tous les événements à même de modifier la distance de visibilité géométrique subsiste. La mise en adéquation des vitesses avec l'offre de visibilité est un problème permanent.

Cette méthodologie de traitement en 3D offre en revanche plusieurs perspectives intéressantes telles que des possibilités d'observer différents scénarios (visibilité de l'arrière d'un véhicule, des feux d'un véhicule précédent, d'un pneu sur la chaussée) ou de personnaliser l'estimation (position réelle sur la voie, hauteur réelle du point de vue). La méthode de calcul est itérative, elle demande donc un temps de calcul variable en fonction de la configuration géométrique des scènes. Il n'est pas envisagé de faire un calcul de visibilité au niveau du serveur opérationnel à chaque requête de véhicule. Cela pourrait représenter une charge calculatoire très importante en fonction du trafic de la route. En revanche, on peut précalculer des distances de visibilité géométrique pour différentes hauteurs de point de vue et utiliser les données adéquates en fonction du véhicule, ou à défaut, la hauteur moyenne 1,20 m.

Lorsqu'un objet n'est pas masqué par un obstacle, il n'en est pas pour autant visible. On doit alors considérer des notions de vision humaine ainsi que les propriétés photométriques de la scène et de l'objet considéré, c'est ce qu'on appelle la visibilité photométrique et que nous détaillons dans la suite.

3.3 Visibilité photométrique

Dès lors qu'un objet n'est pas masqué se pose la question de savoir s'il est visible au sens de « est-il perceptible ? ». Cette question intègre les propriétés photométriques des objets ainsi que la configuration et la géométrie des éclairages de la scène, mais ceci est indissociable de la perception visuelle humaine. Un élément central déterminant la visibilité d'un objet est son contraste par rapport à son fond. Le contraste entre un objet et le fond sur lequel il apparaît doit être suffisant pour le rendre détectable ou identifiable, un objet de même luminance que le fond ne sera pas visible. Nous allons détailler les conditions requises pour qu'un objet soit photométriquement visible dans une scène.

3.3.1 Contraste et visibilité

La notion de visibilité est très complexe dans le domaine de la vision humaine. Elle fait intervenir des notions de taille (associée à l'acuité visuelle), de contraste, de position dans le champ visuel, de temps d'observation et d'analyse, de tâche (détection, identification) ou encore de charge mentale. De plus, la vision humaine est un domaine non seulement physique et physiologique, mais le cadre de la tâche de vision en situation de conduite, les connaissances *a priori* (de l'itinéraire, du véhicule), l'expérience et la charge cognitive peuvent également influencer.

Dans ce cadre très large qu'est la vision humaine, des études telles que [Blackwell 46] nous renseignent sur le rôle central du rapport entre contraste et visibilité. Pour un temps de présentation donné et une probabilité de détection (généralement fixée à 50 %), il a montré que le taux de détection dépendait du contraste de la cible par rapport à son fond. Selon Blackwell, le contraste est exprimé tel que :

$$C = \frac{|L_0 - L_f|}{L_f} = \frac{\Delta L}{L_f} \quad (3.4)$$

avec L_0 la luminance de l'objet et L_f la luminance du fond. Lorsque la différence ΔL est juste suffisante pour que l'objet soit perçu, on parle de seuil différentiel de luminance, noté ΔL_s . Cette

différence de luminance juste suffisante pour permettre la perception de l'objet définit un niveau de visibilité unitaire. Lorsque la différence de niveau entre l'objet et le fond est supérieure au seuil différentiel de luminance, le niveau de visibilité augmente. À ce seuil différentiel de luminance ΔL_s est associé un contraste seuil C_s , contraste juste suffisant pour la détection. Le niveau de visibilité (VL ou « Visibility Level ») est donc défini tel que :

$$VL = \frac{\Delta L/L_f}{\Delta L_s/L_f} = \frac{\Delta L}{\Delta L_s} = \frac{C}{C_s} \quad (3.5)$$

Il est possible d'adapter la notion générique estimée en laboratoire de probabilité de détection d'objet à la tâche de conduite et à la probabilité de détection d'un obstacle sur la voie. Pour faire le parallèle, il faudra en général considérer que la tâche de conduite est plus complexe que la tâche estimée en laboratoire car associée à une autre activité. En pratique lorsqu'un éclairage est dimensionné afin d'assurer les conditions visuelles d'une tâche, voire le confort visuel dans le cadre d'une tâche, on vise des niveaux de visibilité nettement supérieurs à 1 [Mayeur 10]. De plus, dans le cadre d'études orientées sur la sécurité on vise en général des taux de détection plus élevés que 50 %. Dans le domaine de l'éclairage pour les routes, selon les scénarios pris, il est courant de viser un niveau de visibilité égal ou supérieur à 7 afin de prendre en compte le décalage entre une tâche visuelle conventionnelle et la tâche de conduite et un taux de détection de 99,9 % (*c.f.* [Adrian 87, CIE 92]).

On trouve couramment une autre définition du contraste qui a été donnée dans [Michelson 27] à la suite d'expériences utilisant des mires composées d'alternances de bandes noires et blanches de fréquences spatiales variables :

$$C_m = \frac{L_n - L_b}{L_n + L_b} \quad (3.6)$$

avec L_n la luminance des bandes noires et L_b la luminance des bandes blanches. Cette définition est symétrique entre les contrastes positifs et négatifs, C_m étant toujours compris dans $[0;1]$. Elle est adaptée aux expériences sur des mires de fréquences spatiales pour lesquelles la luminance d'adaptation est plus proche de $(L_n + L_b)/2$ que de L_n . Bien qu'elle ne soit pas adaptée spécifiquement à notre problème, cette définition du contraste et les expériences associées ont permis de montrer que non seulement le contraste était important mais que la fréquence spatiale de l'objet l'était aussi. C'est ainsi que l'on a pu obtenir des courbes telles que la fonction de sensibilité au contraste de l'œil humain (CSF, Contrast Sensitivity Function) telle que présentée sur la figure 3.10.

Ainsi pour les objets dont la taille angulaire est très petite (quelques minutes d'arc), la différence de luminance ΔL nécessaire pour un taux de détection donné varie comme l'inverse du carré de la taille angulaire de l'objet (loi de Ricco). Pour les objets de taille angulaire supérieure (à partir d'un degré), le seuil de luminance nécessaire à un taux de détection donné est proportionnel à la luminance de fond (loi de Weber). Pour que 50 % des sujets détectent un objet de taille suffisante, il faut au minimum que celui-ci ait un contraste de 1 % avec son fond. On trouvera dans la littérature des seuils différentiels de contraste de 2 % ou 5 %, ils correspondent soit à une probabilité de détection supérieure à 50 % (90 % de taux de bonnes détection avec 2 %) soit à une tâche plus complexe tel qu'une tâche d'identification (50 % d'identification d'un objet dans un temps de 0,3 s'il présente un contraste supérieur à 5 %).

Les possibilités d'application de la CSF aux situations réelles découlent de la théorie de Fourier de la décomposition d'un signal en fréquences. Dans le domaine de la détection d'objets, les basses fréquences correspondent à la silhouette de l'objet sur le fond tandis que les hautes

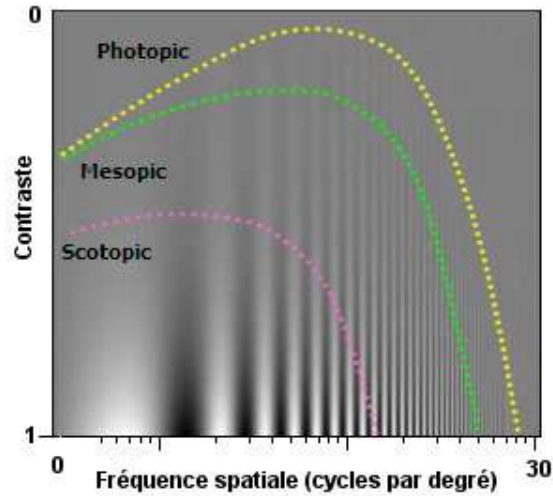


FIGURE 3.10 – Sensibilité au contraste du système visuel humain dans différentes conditions d’illumination.

fréquences correspondraient aux détails fins composant l’objet. Si les fréquences spatiales composant l’image rétinienne de la cible ont un contraste suffisant, c’est à dire qu’ils se situent sous la courbe de la figure 3.10, cela signifie que cette fréquence spatiale est détectée, sinon elle n’est pas vue. Une application à la détection de contours visibles a été proposée dans [Hautière 06a].

Un modèle de visibilité plus complet intégrant des aspects de durée de la tâche de vision, de taille angulaire de l’objet, d’âge du sujet et de taux de détection a été proposé [Adrian 89]. Le seuil différentiel de luminance est exprimé comme :

$$\Delta L_s = C \left(\frac{\Phi^{\frac{1}{2}}}{\alpha} + L^{\frac{1}{2}} \right)^2 \cdot F_{cp} \cdot F_a \cdot F_t \quad (3.7)$$

avec C , une constante dépendant du taux de détection souhaité (1 pour 50 %, 2,6 pour 99,9 %). Φ , α et L sont des fonctions dépendantes de la luminance de fond données par Adrian. Les facteurs F_{cp} , F_a et F_t sont des facteurs calculés à partir de fonctions empiriques destinés à prendre en compte la positivité du contraste (objet plus clair ou plus sombre que le fond), l’âge de l’observateur et le temps de présentation du stimulus ou de la scène. C’est à ce jour le modèle de performances visuelles en détection le plus couramment utilisé pour estimer la visibilité photométrique d’un objet, même si des travaux plus récents pourraient le remettre en cause [Mayeur 10].

3.3.2 Outils de diagnostic de la visibilité photométrique

Le niveau de visibilité VL est utilisé à la fois dans le dimensionnement des éclairages des routes ainsi que dans le domaine de l’éclairage automobile. Différentes méthodes peuvent être utilisées afin d’estimer le niveau de visibilité de la signalisation horizontale, verticale ou d’obstacles potentiels tels des piétons, vélo/motocyclistes ou d’objets potentiellement dangereux car peu visibles tels des pneus au milieu de la chaussée.

De manière générale, c'est la visibilité géométrique plutôt que la visibilité photométrique de jour qui limite la visibilité routière. De plus, les méthodes de calcul de visibilité photométrique ou du niveau de visibilité (*VL*) sont essentiellement mises en œuvre afin d'apprécier quel serait l'impact d'une modification des propriétés photométriques de l'infrastructure ou des sources de lumière sur la détectabilité ou la lisibilité de l'environnement routier au sens large (marquages, panneaux, obstacles potentiels).

Dans les différentes mises en œuvre de calculs du niveau de visibilité, les propriétés des objets intervenant dans les scénarios doivent être relevées. Les moyens utilisés sont principalement des relevés de luminance permettant d'alimenter un modèle tel que celui d'Adrian. Il existe des méthodes manuelles. Celle présentée dans [Gibbons 05] utilise un luminancemètre qui permet de mesurer la luminance de différents points des cibles (piétons, cyclistes ou pneu sur la route) ainsi qu'en différents points de l'environnement proche entourant l'objet considéré. Concernant les autres paramètres du modèle, la taille angulaire est calculée connaissant la taille réelle de l'objet et sa distance de visualisation. Cela peut se révéler assez complexe et lourd expérimentalement lorsqu'il s'agit d'estimer la taille angulaire d'un piéton ou d'un cycliste. De plus ces objets ne sont pas standardisés, il peut s'avérer nécessaire de multiplier les expérimentations avec des piétons vêtus différemment. Concernant la luminance de fond, son estimation peut également se révéler complexe lorsque celui-ci n'est pas de luminance constante [Brémond 10].

Des expérimentations telle que celle présentée dans le rapport de l'opération de recherche du LCPC PALM [Fournela 10] utilisent des méthodes automatiques semi-supervisées afin de qualifier le niveau de visibilité d'éléments de la chaussée dans différentes conditions d'éclairage de jour. La méthode requiert l'utilisation d'un vidéo-luminancemètre capable d'acquérir des images en luminance de l'environnement, ce qui permet d'alléger le dispositif expérimental et de faire une exploitation à plus grand rendement qu'avec des méthodes manuelles. Les objets d'intérêt (différents types de marquages horizontaux) sont qualifiés en fonction de leur niveau de visibilité dans différentes conditions atmosphériques. Le principal inconvénient tient à la résolution limitée de l'appareil de mesure. La résolution angulaire du vidéo-luminancemètre limite l'exploitation des informations de luminance d'objets tels que les marquages à 30 m si on souhaite conserver plusieurs points de mesure strictement inclus dans l'objet. Cet outil permet de comparer relativement entre eux les marquages dans différentes conditions, mais ne permet pas d'estimer la distance maximale de visibilité photométrique du fait de sa limite de portée.

Pour palier à cette problématique de mesure des objets distants, l'utilisation de modèles photométriques (des sources de lumières et des objets) permet d'estimer la distance de visibilité photométrique de certains objets, en particulier de nuit. C'est sur cette méthode de calcul développée dans le cadre du projet VIZIR [Dumont 09] que nous nous appuyons pour estimer la distance de visibilité photométrique de nuit. Nous mesurons le coefficient de rétro-réflexion de la route grâce à l'appareil à grand rendement mlpc@ECODYN permettant de faire des acquisitions jusqu'à 110 km.h^{-1} . Cet appareil développé à l'origine pour la qualification photométrique des marquages routiers peut être utilisé pour mesurer le coefficient de rétro-réflexion de la chaussée. Il fonctionne de jour comme de nuit grâce à sa lumière modulée et fournit une mesure du coefficient de rétro-réflexion tous les 40cm (angle d'éclairage de $1,24^\circ$ et de mesure de $2,29^\circ$ tel qu'illustré sur la figure 3.11). Ces mesures sont ultérieurement utilisées dans un modèle prenant en compte l'intégration par un modèle de vision humaine des paramètres photométriques d'une scène. On peut ainsi estimer les niveaux de visibilité des objets en fonction de leur positionnement et estimer la distance à laquelle l'objet n'est plus suffisamment visible comme nous le détaillons dans la suite.

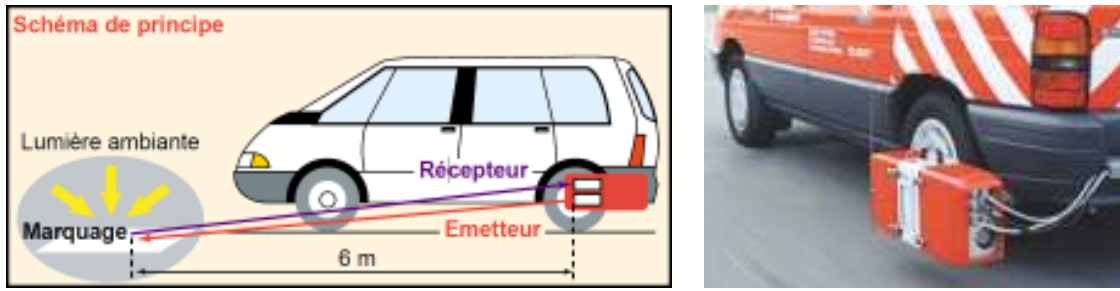


FIGURE 3.11 – Véhicule de mesure de rétro-réflexion mlpc®/ECODYN.

3.3.3 Calcul du profil de visibilité photométrique de nuit

Nous pouvons estimer le niveau de visibilité d'un objet en fonction de la distance d'observation selon la méthodologie exposée initialement dans le rapport final de l'action de recherche Européenne COST [COST-331 99]. Cette estimation est possible en utilisant le modèle d'Adrian et en connaissant une source et les propriétés photométriques des objets éclairés ainsi que de leur environnement. Cette méthode se fonde initialement sur l'utilisation d'un modèle simplifié de feu de véhicule (source de lumière d'intensité lumineuse constante en fonction de la direction) et considère une route de coefficient de rétro-réflexion fixé. Cette méthode a ultérieurement été affinée dans [Dumont 09], entre autres par l'utilisation de diagrammes directionnels d'intensité tirés d'études de feux réels ainsi que par l'utilisation de mesures de rétro-réflexion de la route. Cette méthode offre ainsi une solution pratique de diagnostic de la visibilité photométrique d'une infrastructure donnée.

Dans le cadre d'un scénario « du pire » (*i.e.* un pneumatique sur la route, objet sombre et assez petit mais suffisant pour provoquer un accident en cas de choc), en s'appuyant à la fois sur le modèle d'Adrian, sur la connaissance des propriétés photométrique des sources de lumière (feux avant) et sur des mesures de rétro-réflexion de la route et de réflexion de l'obstacle potentiel, nous pouvons estimer la distance à laquelle cet obstacle peut-être visible sur la route. Nous estimons donc une notion de distance de visibilité photométrique sur obstacle.

D'après l'étude [Schoettle 01] concernant les feux avant de véhicules, nous disposons du diagramme directionnel d'intensité médian pondéré par les ventes de véhicules légers en Europe. Considérant, d'après la loi d'Allard, que l'éclairement décroît avec le carré de la distance, nous connaissons l'éclairement reçu par la cible et par le sol en fonction de la distance :

$$E = E_g + E_d = \frac{I_g + I_d}{d^2} \quad (3.8)$$

avec E en *lux*, l'éclairement reçu par la cible (nous considérons l'éclairement reçu par le sol au pied de celle-ci égal à l'éclairement de la cible), E_g et E_d les éclairements dus aux feux gauche et droite en *lux*, I l'intensité de chaque feu dans la direction de la cible en *cd* et d la distance entre le feu et l'objet en *m*.

Connaissant l'éclairement reçu par la cible et par le sol, on peut calculer la luminance de ces deux objets. Nous connaissons le coefficient de réflexion de l'obstacle, considéré comme lambertien (pneu de coefficient de réflexion fixé à 8 %) et nous connaissons le facteur de rétro-réflexion mesuré de la chaussée. Nous estimons les luminances de l'obstacle et de la route à son endroit telles que :

$$L_o = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left(\frac{I_g + I_d}{d^2} \right) \quad \text{et} \quad L_f = R \cdot \left(\frac{I_g + I_d}{d^2} \right) \quad (3.9)$$

avec L_o et L_f la luminance de l'obstacle et du fond en $cd.m^{-2}$, ρ le coefficient de réflexion de l'obstacle et R le coefficient de rétro-réflexion en $cd.m^{-2}.lux^{-1}$.

Connaissant la luminance de l'obstacle, du sol à son endroit ainsi que la distance et les dimensions de l'obstacle (permettant de calculer l'angle sous lequel il est vu), nous pouvons calculer le contraste entre l'objet et son fond par l'équation 3.4 ainsi que le seuil différentiel de luminance suffisant pour que l'objet soit détectable par l'équation 3.7. Enfin, nous calculons le niveau de visibilité VL donné par l'équation 3.7 en fonction de l'âge de l'observateur et du temps d'exposition.

$$C = \frac{|L_o - L_f|}{L_f} = \left| \frac{\rho}{\pi R} - 1 \right| \quad (3.10)$$

Comme nous ne cherchons pas à caractériser la visibilité des objets, mais à calculer la distance de visibilité photométrique dans un scénario donné, nous pouvons chercher, pour un âge donné et un temps de présentation donné, quelle est la distance maximale à laquelle l'obstacle serait clairement détecté et identifié en posant un niveau de visibilité minimum tel que $VL = 7$. On obtient ainsi des distances de visibilité photométrique de nuit pour un scénario dangereux : un pneu sur la voie.

Les courbes de la figure 3.12 tirées de [Dumont 09] illustrent l'évolution de cette distance de visibilité sur obstacle en fonction de l'âge de l'observateur pour un temps de présentation de 0,2 s (Fig. 3.12(a)) ainsi que la distance de visibilité photométrique de cet objet en plein phares (*high-beams*) et en codes (*low-beams*) (Fig. 3.12(b)).

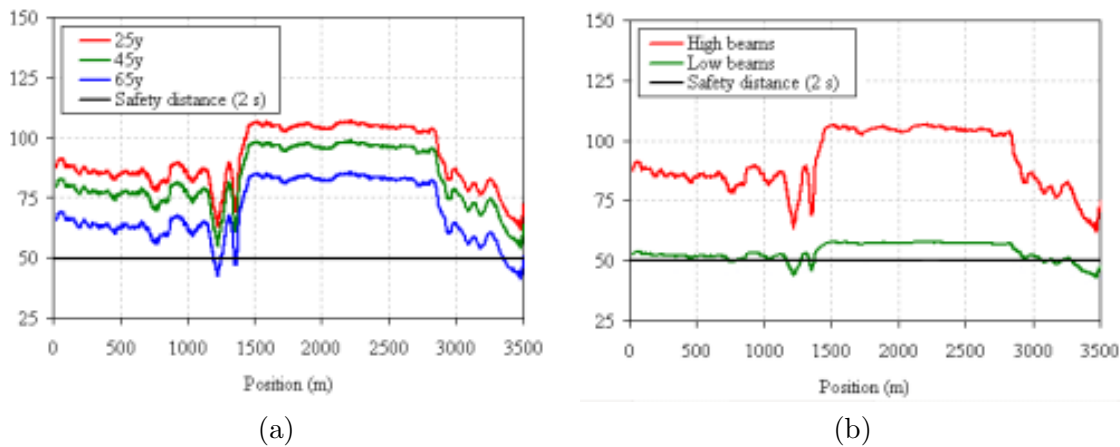


FIGURE 3.12 – Distance de visibilité photométrique en fonction de l'âge du conducteur (a) et en fonction du type de feux pour un conducteur de 25 ans (b) d'après [Dumont 09].

Nous voyons que dans un scénario difficile tel que la détection d'un pneu sur la voie de nuit, la distance de visibilité photométrique est en général inférieure ou égale à 100 m avec les pleins phares et tend vers une cinquantaine de mètres avec les codes (plus ou moins la portée des codes), ce qui est faible en regard des vitesses pratiquées et des distances d'arrêt correspondant à ces vitesses.

Nous avons effectué ce calcul selon la même procédure que celle exposée dans [Dumont 09] en utilisant les mesures de rétro-réflexion de la chaussée effectuées par l'appareil de mesure mlpc@ECODYN sur la RD786. Nous obtenons une distance de visibilité photométrique de nuit le long d'un trajet donné en conditions nominales (temps clair). Cette distance de visibilité

photométrique est présentée sur la figure 3.13 pour deux types de feux avant différents, un conducteur jeune dans les conditions de référence.

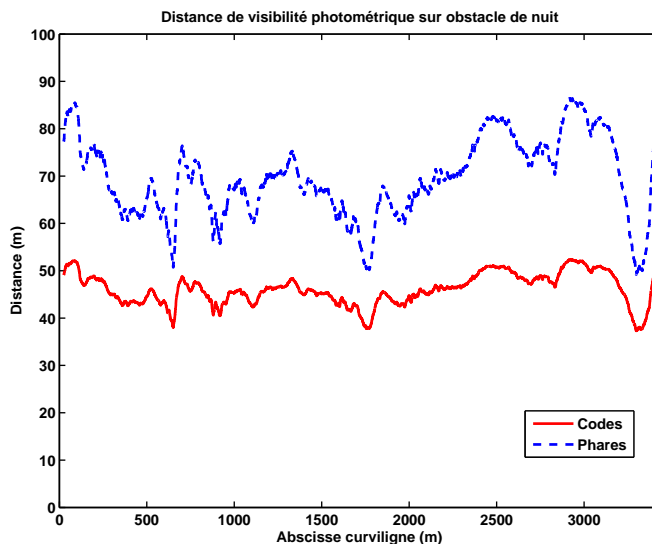


FIGURE 3.13 – Distance de visibilité photométrique de nuit sur obstacle (pneu) sur la RD-786 avec codes et pleins phares.

Il semble normal de disposer d'une meilleure distance de visibilité photométrique en pleins phares qu'avec les codes. On peut voir néanmoins que sur cette portion de voie, lorsque le véhicule roule en codes, la distance de visibilité peut chuter d'environ 20 % entre la maximum (52 m) et le minimum (37 m). En plein phares, la distance de visibilité peut diminuer de 45 % en fonction du lieu entre le maximum (86 m) et le minimum (49 m).

3.3.4 Intégration de la visibilité photométrique

Les éléments de visibilité géométrique et photométrique que nous avons présentés nous permettent, selon un certain nombre d'hypothèses et dans le cadre de scénarios bien définis, d'estimer si un obstacle de taille donnée sur la route peut être perçu par un conducteur dans des conditions normales d'observation. Diverses applications de ces travaux menés dans le cadre de projets tels que SARI-VIZIR ou DIVAS, ont permis d'estimer indépendamment la visibilité géométrique le long d'un trajet ou la visibilité photométrique d'un obstacle tel qu'un pneu de jour comme de nuit le long d'un trajet.

Afin d'estimer la visibilité photométrique, nous avons utilisé des données types (diagramme d'émission moyen des feux de véhicules légers et hauteur moyenne des feux) pour un conducteur type âgé de 30 ans dans le cadre d'un scénario dit « du pire » (pneu sur la route). À présent que nous disposons d'un modèle, nous pouvons calculer la visibilité photométrique pour différents modèles de feux réels ou pour des conducteurs d'âges différents. Cette méthode étant itérative, il semble plus approprié de procéder à ces calculs avant de renseigner les serveurs de base de données. En revanche, il est envisageable de pré-calculer des distances de visibilité photométriques en tenant compte de diverses variables d'intérêt telles que le type de feux utilisés (codes, pleins phares, phares anti-brouillard). Lorsque le modèle d'estimation du risque aura besoin d'utiliser une distance de visibilité photométrique, si la nature des feux réellement utilisés par le conduc-

teur est renseignée, on utilisera les données correspondant au type voire au modèle de feux. Dans le cas où le type et le modèle ne sont pas renseignés on pourra utiliser une distance standard calculée pour un véhicule léger moyen (hauteur de feux de 60 cm) avec ses pleins phares (utilisés par temps clair pour un véhicule seul).

Ces notions de visibilité ont été décrites comme structurelles car elles correspondent à une notion de visibilité dans de bonnes conditions de conduite pour un véhicule seul. La visibilité structurelle le long d'un trajet est en tout point le minimum des visibilités géométrique et photométrique.

Nous allons à présent parler d'une dernière notion de visibilité qui est dite conjoncturelle, c'est la visibilité atmosphérique qui dépend d'événements extérieurs tels que la présence de pluie ou de brouillard. En présence de telles dégradations des conditions météorologiques, les aspects de matière et de texture ainsi que les contrastes perçus peuvent être abaissés. La visibilité peut alors chuter en dessous de la visibilité structurelle en conditions nominales. Nous détaillons dans la suite comment ces effets peuvent être pris en compte pour estimer la visibilité réellement disponible pour le conducteur en chaque point de son trajet.

3.4 Visibilité atmosphérique

En pratique, la visibilité atmosphérique ou visibilité météorologique est définie comme la plus grande distance à laquelle il est possible de voir et d'identifier à l'œil nu un objet étendu sur le ciel à l'horizon de jour, et une source lumineuse diffuse d'intensité modérée de nuit.

La distinction des conditions diurnes et nocturnes conduit à l'utilisation de deux distances de visibilité. Dans le vocabulaire international de l'éclairage [CIE 87], la « portée visuelle » est utilisée de jour, et la « portée lumineuse » est utilisée de nuit. Une troisième distance de visibilité est également introduite. La « portée optique météorologique » permet de faire le lien entre les deux notions précédentes.

3.4.1 Définitions et standards

De jour : la portée visuelle

La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a donné comme définition de la portée visuelle météorologique de jour « la plus grande distance à laquelle un objet noir de dimensions convenables peut être reconnu de jour sur le ciel à l'horizon ». Le processus physique à l'origine de la perte de contraste est de type additif. La lumière réfléchiée par l'objet en direction de l'observateur sera composée d'une part de plus en plus grande de la lumière du ciel au fur et à mesure de son trajet dans l'atmosphère. La luminance des objets tend vers celle du ciel en fonction de leur distance, les objets n'ont plus un contraste suffisant par rapport au fond et ne sont donc plus discernables au-delà d'une certaine distance.

Ces propriétés sont décrites par la loi de Koschmieder [Koschmieder 24, Middleton 52] décrivant la luminance d'un objet L en fonction de sa luminance propre L_0 , de la luminance du ciel L_f , de la distance d et du paramètre d'extinction du brouillard k .

$$L_s(d) = L_0 \cdot e^{-kd} + L_f \cdot (1 - e^{-kd}) \quad (3.11)$$

Elle est utilisée afin d'estimer la distance de visibilité de jour, car elle correspond à l'atténuation atmosphérique du contraste C entre l'objet, de luminance L , et le fond sur lequel il se détache de luminance L_f . Le contraste étant calculé toujours selon l'équation 3.4. Cette atténuation de la luminance d'un objet peut être mise en relation avec la loi de Koschmieder l'a proposé

[Duntley 48], qui exprime que le contraste apparent C d'un objet observé sur le ciel à l'horizon, à une distance d'observation donnée d est relié au contraste C_0 de cet objet lorsqu'il est observé à courte distance et au coefficient d'extinction atmosphérique k que l'on suppose uniforme :

$$C = C_0 \cdot e^{-kd} \quad (3.12)$$

L'intérêt de cette loi est qu'elle exprime directement l'atténuation du contraste en relation avec le paramètre d'extinction k et la distance d'observation. Si nous considérons un objet noir ($L_0 = 0$) sur fond de ciel, par temps clair cet objet présentera un contraste de 1. En présence d'un brouillard de coefficient d'extinction $k = 0,03 \text{ m}^{-1}$, son contraste à 50 m sera tel que $C(50, 0, 03) \simeq 22 \%$ et à 100 m il sera tel que $C(100, 0, 03) \simeq 5 \%$. Si nous considérons la limite de détectabilité à 5% comme c'est l'usage en France, l'objet est juste visible à 100 m en présence d'une atmosphère perturbée.

De nuit : la portée lumineuse

De nuit, la définition ne s'appuie pas sur la visibilité d'objets réfléchissants mais sur des sources de lumière. « La portée lumineuse est la distance la plus grande à laquelle un feu donné peut être reconnu dans des conditions d'observation déterminées, avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil d'éclairement sur l'œil de l'observateur » (définition tirée de [CIE 87]).

La portée lumineuse est la distance à laquelle un observateur distingue une source d'intensité donnée. Le processus est ici essentiellement de type soustractif, la lumière provenant d'une source est atténuée au fur et à mesure de sa traversée de l'atmosphère jusqu'à ce qu'elle présente une intensité si faible qu'elle ne soit plus « juste discernable » par l'observateur. Cela est illustré par la formule ci-dessous pour un éclairement rétinien minimum E et une source donnée d'intensité I , d est la portée lumineuse.

$$E = \frac{I}{d^2} e^{-kd} \quad (3.13)$$

La portée optique météorologique

Quant à la portée optique météorologique V , elle est « la longueur d'un trajet dans l'atmosphère sur lequel le flux lumineux d'un faisceau quasi parallèle de rayonnement, émanant d'une source lumineuse de température de couleur 2700 K , est réduit de 95% ».

La valeur de l'atténuation a été choisie de telle sorte que ce terme conduise à une mesure approximative de la visibilité (météorologique) définie précédemment, pour un seuil de contraste C_s fixé arbitrairement à 5% , quoique les anglo-saxons utilisent plutôt un seuil de 2% . C'est la raison pour laquelle la notation V a été attribuée à ce paramètre. La portée optique météorologique est reliée au coefficient d'extinction atmosphérique k , que l'on suppose uniforme, par la formule $e^{-kV} = C_s$, qui s'écrit plus couramment pour un seuil de contraste de 5% :

$$V = -\frac{1}{k} \ln(0,05) \simeq \frac{3}{k} \quad (V = -\frac{1}{k} \ln(0,02) \simeq \frac{3,9}{k} \text{ pour les anglo-saxons}) \quad (3.14)$$

En définitive, pour un brouillard de nuit de coefficient d'extinction $k = 0,03 \text{ m}^{-1}$ donné, la distance de visibilité météorologique de jour sera telle que $V_{met} = 3/k = 100 \text{ m}$. On ne sera en capacité de distinguer un obstacle noir sur fond de ciel qu'à 100 m environ. Dans ce même brouillard, la portée optique météorologique sera également telle que $POM = 3/k = 100 \text{ m}$. Un

faisceau lumineux parallèle sera atténué de 95 % par environ 100 m de traversée d'atmosphère. Mais rien ne nous indique à quelle distance serait visible un obstacle de nuit.

Ces définitions et modèles sont les outils de base servant à décrire la physique de l'atmosphère, que ce soit la pluie, le brouillard, la neige, le smog ou la fumée. Les différents appareils de mesure se fondent sur une estimation du coefficient d'extinction afin d'estimer une distance de visibilité météorologique de jour ou une portée optique météorologique de nuit. Bien que dans la pratique, on qualifie le plus souvent le brouillard par un terme de distance, cette distance ne doit pas être interprétée de la même manière en fonction des conditions d'illumination.

Nous allons dans la suite détailler les effets de la pluie et du brouillard sur la visibilité. Nous présentons les modèles utilisés pour décrire et qualifier ces deux phénomènes. Enfin nous montrerons que nous pouvons intégrer visibilité photométrique et visibilité atmosphérique en combinant les divers modèles.

3.4.2 Effets de la pluie sur la visibilité

Composition de la pluie

La pluie est caractérisée par la chute d'hydrométéores à hauteur du sol. Dans les nuages, les conditions de température et de pression poussent l'eau, à l'état gazeux dans l'air, à se condenser. Après sa condensation autour de noyaux de condensation tels que des poussières, les particules (qui peuvent être à l'état de neige, de glace ou d'eau) chutent et l'eau passe sous forme liquide avant de percuter le sol. Les gouttes ainsi formées ont des diamètres variant de 0,5 mm à plus de 6 mm. Les gouttes de pluie sont sphériques la plupart du temps, la tension superficielle étant la force la plus importante s'exerçant sur la goutte. Elle peut prendre une forme écrasée sur la face inférieure lorsque leur volume augmente à cause des frottements aérodynamiques. Lorsque la goutte tend à avoir un diamètre proche de 6 mm ou supérieur à 6 mm, elle tend à s'étaler puis à se scinder en de multiples gouttelettes de tailles inférieures [Villiermaux 09]. Des gouttes plus grosses peuvent également apparaître dans le champ de pluie à la suite d'aggrégations lors de leur parcours dans l'atmosphère.

Il existe de nombreuses méthodes permettant de calculer la distribution granulométrique de la pluie. Ces méthodes ont le plus souvent été étudiées dans l'optique de mieux comprendre l'érosivité que génère la pluie, puis plus tard le fonctionnement des systèmes d'irrigation par pulvérisation. D'autres recherches plus récentes se focalisent sur les propriétés de perturbation des ondes électromagnétiques en présence de pluie (domaine supérieur à 1GHz). Elles se concentrent alors sur la mesure de paramètres propres à la pluie tels que le diamètre moyen, la densité volumétrique des gouttes, le diamètre de Sauter de la distribution de gouttes (diamètre d'une goutte dont le rapport volume/surface est le même que pour l'ensemble de la distribution de particules). Ces études se focalisent sur la transmission, à longue distance, d'ondes électromagnétiques dont les fréquences les rend plus sensibles au phénomène d'atténuation que les ondes de la lumière visible pour lesquelles l'atténuation est très faible (le phénomène de dispersion subsiste et on peut dire en un sens qu'un signal est également atténué).

Le modèle de distribution de tailles de gouttes le plus couramment utilisé et présenté figure 3.14, a été proposé dans [Marshall 48] tel que :

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (3.15)$$

avec D , le diamètre des gouttes en mm, $N(D)$ la concentration de gouttes par intervalle de diamètre (entre D et $D + dD$) et par mètre cube, N_0 , une constante telle que $N_0 = 0,08 \text{ cm}^{-4}$ et Λ

une fonction associée à la densité de pluie telle que $\Lambda = 3,67/D_0$ où D_0 est le diamètre médian des gouttes comptant pour la moitié du volume d'eau recueilli.

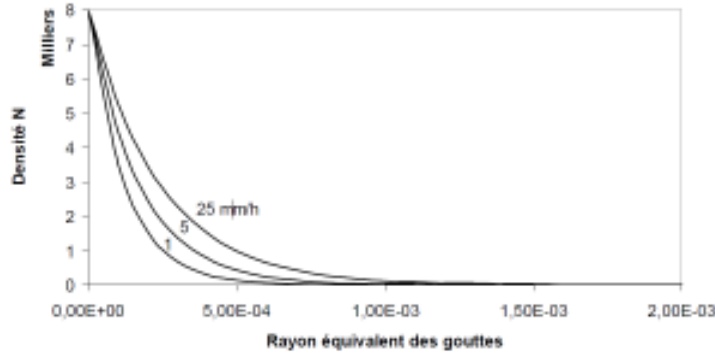


FIGURE 3.14 – Distribution de tailles de gouttes de pluie d'après [Marshall 48].

On considère en général que les gouttes au niveau du sol ont une vitesse constante car elles ont atteint leur vitesse terminale. Celle-ci dépend de leur diamètre et de leur masse (donc de leur volume, donc de leur diamètre), de telle sorte que leur vitesse est :

$$V_{term}(a) = 9,4 \left(1 - e^{-1,57 \cdot 10^3 a^{1,15}} \right) \quad (3.16)$$

L'étude [Morris 77] rapporte que le principale facteur de dégradation de la visibilité est l'eau présente sur le pare-brise. En outre cette eau a tendance à dégrader l'acuité visuelle par une augmentation de l'angle visuel. La dégradation de la visibilité de jour avec essuie-glaces est proportionnelle à l'intensité de la pluie. De nuit, la taille des gouttes est importante et les petites gouttes nuisent plus à la visibilité. Enfin, bien que la vitesse des essuie-glaces n'améliore pas sensiblement les performances visuelles en présence d'une pluie moyenne, leur non-utilisation conduit à une dégradation inacceptable de la visibilité.

Modèles d'interaction de la pluie avec la lumière

Les interactions de l'eau avec la lumière peuvent être classées en différentes catégories : les effets du rideau de pluie ou des gouttes de pluie sur la transmission de la lumière et les effets résultants de la pluie et de son effet mouillant sur les objets d'une scène.

Lors de la traversée d'une atmosphère contenant des gouttes d'eau, le coefficient d'absorption de l'eau est faible pour la lumière visible comme illustré sur la figure 3.15 tirée de [Hale 73]. La lumière n'est pas absorbée mais essentiellement diffusée. Que ce soit en présence de pluie ou de brouillard, les effets sur les longueurs d'onde du visible ont été jugés négligeables, la taille et la variété des particules de tels milieux poly-dispersés étant nettement supérieure aux longueurs d'ondes mises en jeu [Coleman 50]. Les effets des gouttes de pluie peuvent être analysés en utilisant les outils de l'optique géométrique.

Les effets du rideau de pluie sur la transmission de la lumière sont néanmoins étudiés à l'aide des modèles classiques de transmission atmosphérique. L'extinction est décrite par la loi de Beer-Lambert. L'éclairement E produit par un faisceau parallèle d'intensité I donnée traversant l'atmosphère décroît exponentiellement avec la distance d d'observation. Cette loi permet de



FIGURE 3.15 – Absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde d'après [Hale 73].

décrire le comportement de la pluie par un seul paramètre qui est son coefficient d'extinction, généralement noté k exprimé en m^{-1} .

$$E = I \cdot e^{-kd} \quad (3.17)$$

On peut également l'exprimer par la notion de transmissivité, soit la proportion d'énergie lumineuse transmise sur une distance d :

$$T = e^{-kd} \quad (3.18)$$

Les travaux présentés dans [Ulbrich 85] ont permis d'établir une relation entre le coefficient d'extinction k et l'intensité de pluie P en $mm \cdot h^{-1}$ telle que :

$$k = 2,12 \cdot 10^{-4} P^{0,68} \quad (3.19)$$

Comme nous l'avons dit précédemment, la portée optique météorologique est atteinte lorsque le seuil différentiel de contraste est abaissé à 5 % selon les standards Français. Il s'en suit que pour atteindre un tel seuil de luminance, il faut $e^{-kd} = 0,05$. Dans le cas d'une pluie intense telle que l'intensité est de $100 mm \cdot h^{-1}$ et selon le modèle d'atténuation présenté dans l'équation 3.19, la portée optique météorologique serait limitée à environ 600 m. Il faudrait une pluie d'une intensité proche de $300 mm \cdot h^{-1}$ pour limiter la portée optique météorologique en dessous de 400 m, distance de visibilité météorologique standard à partir de laquelle on considère une dégradation de visibilité.

Si les effets de la pluie sur la transmission atmosphérique sont faibles, il n'en demeure pas moins d'autres effets pouvant nuire à la perception. Les gouttes d'eau quasi-sphériques chutant dans l'atmosphère se comportent telles des lentilles boules. Elles renvoient une image inversée du demi-espace situé derrière elles du point de vue de l'observateur (champ angulaire d'environ 165° d'après [Garg 04] comme illustré figure 3.16). Dès lors, il s'ensuit que chaque goutte transmet aussi bien les plus hautes que les plus basses luminances de la scène. L'effet résultant est que sur un fond noir chaque goutte sera « porteuse » de luminances plus importantes que son fond, mais sur un fond de ciel, chaque goutte sera « porteuse » des plus basses luminances de la scène. Ainsi, bien que le bilan énergétique puisse être quasi nul, les contrastes de l'ensemble des objets de la scène sont réduits.

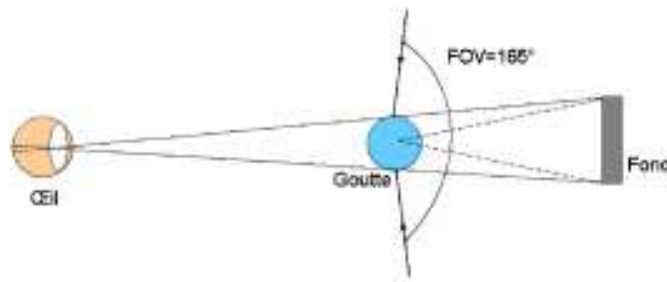


FIGURE 3.16 – Schéma correspondant à l'effet de lentille boule d'une goutte sphérique.

Cet effet n'a pas été quantifié ni décrit précisément dans la littérature. Il est complexe car il dépend de multiples paramètres tels que la taille des gouttes, leur position relative par rapport à l'observateur et à la scène, aussi bien pour l'image de la scène qu'elles transmettent que pour leur distance à l'observateur. De plus, comme l'observateur ne suit en général pas les gouttes des yeux, à l'image d'une caméra de temps d'intégration donné, les gouttes sont visibles sous la forme de traînées dont la longueur dépend du temps d'intégration de l'œil ou de la caméra, de la vitesse des gouttes et de leur distance à l'observateur.

Un dernier effet qui peut être classé dans la catégorie du voile atmosphérique généré par la pluie n'est pas propre à la chute d'eau mais au fait que la route soit mouillée et que les véhicules précédents ont tendance à soulever et à diffuser l'eau de la route dans l'atmosphère. Ces effets peuvent être ressentis en champ proche par une diffusion d'eau entourant le véhicule précédent et gênant la visibilité des autres voies et de la route à plus grande distance tel qu'illustré sur la figure 3.17. Ce même effet peut avoir des conséquences d'ordre macroscopique et créer un voile curviligne qui suit en long le trajet de la route, donnant une impression de tunnel de bruine ou de brouillard. Ces effets sont surtout liés à la nature de la surface de la route (dense ou poreuse), à la quantité et à la vitesse des véhicules circulant sur la voie ainsi qu'à la qualité de leurs pneumatiques [Maycock 66].



FIGURE 3.17 – Exemple issu de projections d'eau causées par un poids-lourd sur une chaussée respectivement dense et poreuse.

Effets sur la visibilité de la pluie sur le pare-brise

De même que les gouttes se comportent comme des lentilles boules lorsqu'elles sont quasi-sphériques, sur un pare-brise, elles peuvent se comporter comme des lentilles fish-eye qui focalisent un champ large de l'espace en arrière plan. Cet aspect est toutefois fortement dépendant des propriétés hydrophiles ou hydrophobes de la surface du pare-brise, ces propriétés varient fortement en fonction de l'état de propreté du pare-brise (bien plus hydrophile lorsqu'il est propre) tel qu'illustré sur la figure 3.18.

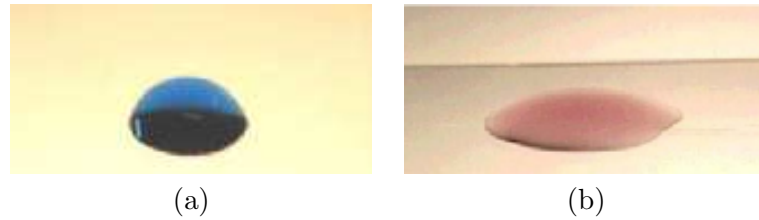


FIGURE 3.18 – Étalement d'une goutte sur une surface hydrophobe (a) ou hydrophile (b).

Dans [Halimeh 09], les auteurs présentent un modèle des interactions d'optique géométrique produites par une goutte posée sur un pare-brise tel qu'illustré dans la figure 3.19.

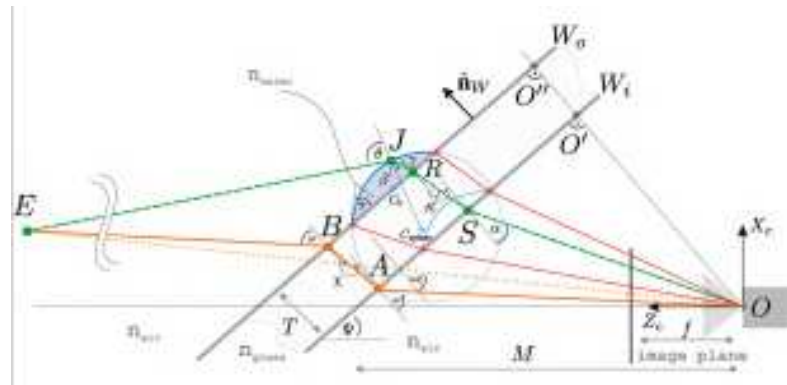


FIGURE 3.19 – Modèle d'optique géométrique d'interaction d'une goutte sur un pare-brise d'après [Halimeh 09].

La présence d'eau sur le pare-brise pose un triple problème. Premièrement, les gouttes opèrent un masquage de certains détails de l'environnement. Deuxièmement, elles se comportent comme des lentilles de type fish-eye, statiques la plupart du temps à moins de très grosses pluies (pour lesquelles on atteint le niveau d'écoulement laminaire) et ont tendance à faire baisser les contrastes de la scène. Enfin, les gouttes sur le pare-brise nécessitent l'emploi d'essuie-glaces qui peuvent perturber la perception en situation de conduite.

Comme on peut le voir sur la figure 3.20, les gouttes ont un effet qui peut masquer la scène ou déstructurer les bords francs. De plus, les patches blancs de la charte utilisée sont entachés de points noirs alors que les patches noirs de la charte sont entachés de traces blanches, réduisant localement le contraste des objets. Ces effets sont très complexes à quantifier car ils sont très dépendants de la scène de fond (l'angle d'ouverture de ces pseudo lentilles fish-eye embrassant une scène bien plus large que la charte de gris seule). Ces effets sont valables de jour comme de nuit. Mais en conditions nocturnes et en particulier dans un environnement éclairé (lampadaires,

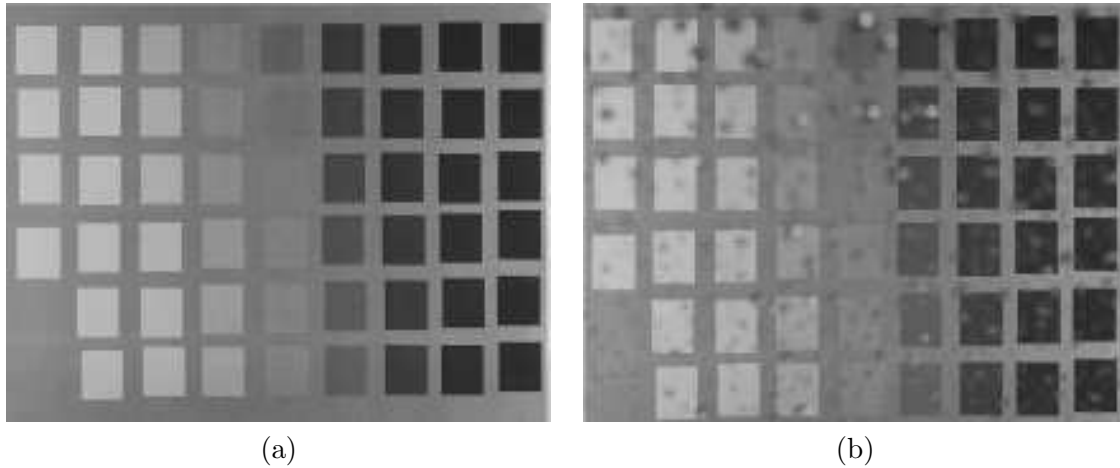


FIGURE 3.20 – Image d’une charte derrière un pare-brise sans gouttes (a) et avec gouttes de pluie non focalisées (b).

véhicules en sens opposé), chaque goutte sera porteuse d’un ou plusieurs reflets spéculaires des sources de lumière, tapissant ainsi le pare-brise de points lumineux, ce qui peut avoir pour effet de remonter notablement la luminance d’adaptation de l’œil, et d’amoinrir d’autant les capacités du conducteur à voir des éléments sombres.

Ces effets n’ont à notre connaissance jamais été quantifiés précisément dans la littérature. Une étude de la portée visuelle de détection de voitures sur la voie en conditions de pluie de jour a néanmoins été présentée dans [Bhise 81]. Les auteurs observent une réduction significative des distances de visibilité en présence de pluie, cette réduction étant corrélée avec le niveau d’intensité de la pluie. De plus la réduction semble plus prononcée lorsque les véhicules roulent que lorsque les véhicules sont statiques. Les auteurs expliquent cette différence par la plus grande quantité de pluie recueillie par le pare-brise en fonction de la vitesse. D’après ces expérimentations, les auteurs ont proposé un modèle de dégradation de la distance de visibilité tel que :

$$D = c_0(rt)^{-c_1} e^{c_2 L_f} \quad (3.20)$$

avec L_f la luminance de fond (généralement luminance du ciel), le produit rt désigne l’accumulation de pluie sur le pare-brise avec r l’intensité de la pluie et t la période de passage des essuie-glaces et c_0 , c_1 et c_2 des coefficients positifs d’ajustement du modèle aux données.

Les gouttes d’eau qui se déposent sur le pare-brise ont deux sources principales que sont la pluie et les projections dues aux autres véhicules, la résultante de chacun de ces effets est assez proche. Les projections dues à un véhicule peuvent néanmoins résulter en un apport instantané d’une quantité d’eau nettement supérieure à l’apport usuel de la pluie et gêner un peu plus la vue temporairement. L’eau provenant d’un véhicule précédent peut également retomber sur le pare-brise. En général, les gouttes d’eau sont alors plus fines du fait de l’éclatement par le pneu de l’eau en micro-gouttelettes. Le véhicule suiveur peut être confronté à une bruine permanente lors du suivi de véhicules sur route mouillée. L’ensemble de ces projections issues du sol sont en général plus sales que les gouttes de pluie ou tout du moins plus chargées en diverses particules et molécules drainées par l’eau du sol, mais les effets sur la perception visuelle de la route ne sont vraisemblablement pas de premier ordre.

Effets de la pluie sur l'environnement

Outre les effets du rideau de pluie et des gouttes sur le pare-brise, la dernière catégorie des effets négatifs de la pluie sur la visibilité routière concerne les modifications d'aspect et de texture de l'environnement et plus spécifiquement de l'infrastructure. La présence d'eau modifie les aspects de différents surfaces telles que la surface de la route, la signalisation horizontale et verticale. La présence d'eau modifie le comportement photométrique de ces différents matériaux, les rendant plus sombres, plus clairs ou plus spéculaires selon les conditions d'observation et la nature des matériaux.

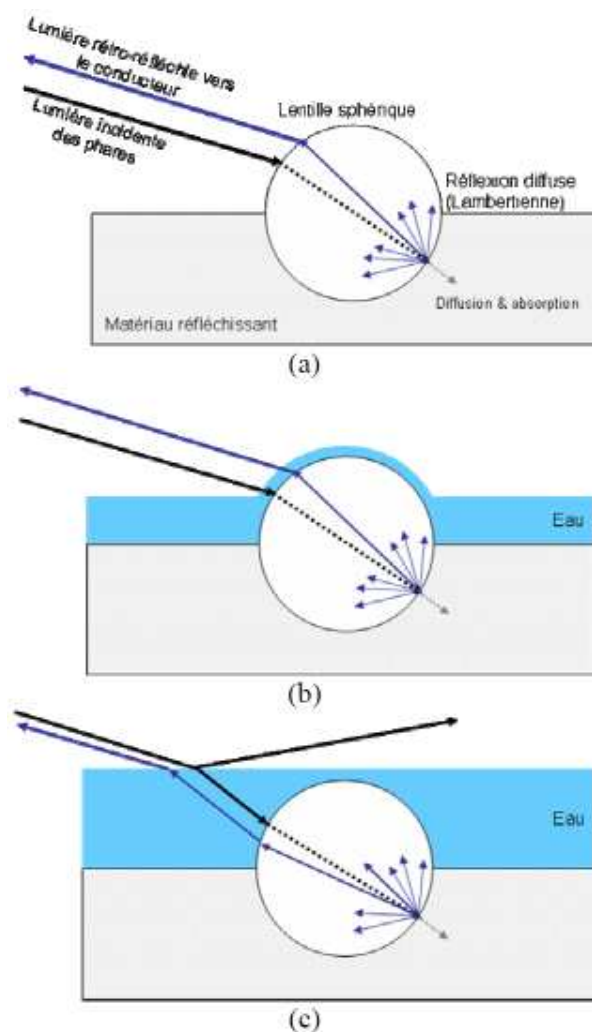


FIGURE 3.21 – Interactions entre la lumière et les billes de verre des marquages lorsque la chaussée est (a) sèche, (b) humide (c) mouillée.

Les principaux problèmes identifiés concernent la modification du comportement photométrique de la surface de la route et des marquages routiers car l'eau peut s'accumuler et former une couche temporaire se superposant au matériau. Concernant la surface de la route, la présence d'un film d'eau rend la surface plus spéculaire. Une plus grande part des rayons lumineux incidents est renvoyée dans le plan d'incidence. Ainsi, le matériau paraît plus sombre de jour si

l'observateur n'est pas dans le plan d'incidence de la lumière. À l'opposée, la route peut refléter la lumière du ciel en angle rasant ou refléter le soleil lors de situations de contre-jour, ce qui peut résulter en une inversion des contrastes des marquages (marquages noirs sur une route très claire). De nuit, la lumière des feux d'un véhicule est reflétée par la couche d'eau et le sol paraît plus sombre pour le conducteur, de plus la lumière des feux des véhicules en sens opposé peut se refléter sur le sol et éblouir le conducteur.

Concernant les marquages, ceux-ci peuvent avoir la même tendance que la route à refléter le ciel ou le soleil de face, les contrastes diminuent alors drastiquement, au point de ne plus distinguer route et marquages dans les pires situations. De nos jours, les marquages sont conçus pour avoir une réponse spécifique en rétro-réflexion afin d'assurer leur visibilité de nuit. Pour ce faire, les fabricants emploient des micro-billes de verre de haut indice de réfraction afin que la lumière provenant d'une source de lumière soit renvoyée au maximum vers celle-ci (cf. Fig. 3.21(a)), permettant ainsi au conducteur de les voir à distance à l'aide de ses feux. Lors de la présence d'un film d'eau, la lumière issue des feux du véhicule est d'une part reflétée par la couche d'eau, d'autant plus que les feux sont bas et éclairent selon un angle rasant. Mais la faible partie de la lumière atteignant les marquages et renvoyée par les micro-billes dans la direction d'incidence peut rester prisonnière de la couche d'eau, celle-ci se comportant tel un guide d'onde et empêchant la sortie de la lumière de la couche d'eau du fait du passage d'un matériau d'indice de réfraction plus important ($n_{eau} \simeq 1,33$) vers un matériau d'indice de réfraction plus faible ($n_{air} \simeq 1$) comme illustré sur la figure 3.21(b,c).

3.4.3 Effets du brouillard sur la visibilité

Physique du brouillard

Composition du brouillard

Le brouillard est constitué de particules composées principalement d'eau sous forme liquide ou solide en suspension dans l'air. L'air qui compose notre atmosphère contient une plus ou moins grande quantité d'eau sous forme de gaz. Dans certaines conditions de température et de pression, une masse d'air donnée ne pourra conserver l'eau à l'état gazeux si la température de l'air s'approche de son point de rosée. Dans ce cas une partie de l'eau sous forme gazeuse se condense. C'est ce phénomène qui donne lieu aux nuages, à la brume ou au brouillard.

Si ces trois phénomènes sont essentiellement identiques (des particules d'eau ou de glace en suspension dans l'air), ce qui distingue la brume et le brouillard des nuages est la proximité du sol. Pour ce qui est de la différence entre le brouillard et la brume, une brume est un brouillard de faible densité dans lequel la visibilité est supérieure au kilomètre. On parlera de brouillard lorsque la visibilité est réduite à moins d'un kilomètre. Quoi que dans le domaine routier, on considère la visibilité dégradée lorsqu'elle est réduite à 400 m ou moins.

Lors de la condensation de l'eau dans l'air, la présence de particules hygroscopiques dans l'air est nécessaire (poussière, fumée, pollution etc.). Ces particules servent de noyaux de condensation sans quoi les gouttelettes ne se formeraient pas. Donc en plus des particules d'eau, le brouillard contient également différentes particules de taille microscopiques qui servent de support à la condensation de l'eau.

Types de brouillard

- On distingue les différents types de brouillard par les processus qui mènent à leur formation :
- le brouillard de rayonnement est le plus fréquent, il se produit en général en fin de nuit par ciel clair lorsque le sol est froid. L'air est refroidi et atteint son point de rosée. Ce processus donne des brouillards pour lesquels les gouttes sont « petites », avec des diamètres distribués autour d'un mode compris entre $1 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$.
 - le brouillard d'advection se produit lors du passage d'une masse d'air chaud et humide au dessus d'une surface froide (terre ou mer), il donne lieu à des brouillards contenant des gouttes plus grosses avec des diamètres distribués autour d'un mode compris entre $10 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$.
 - le brouillard d'évaporation est produit par une évaporation rapide d'une masse d'eau (rivière, lac *etc.*) qui se recondense au contact d'air plus froid au dessus de l'eau.
 - le brouillard de pente est produit par le contact entre une masse d'air et un relief qui contraint la masse d'air. Lorsque le volume d'air se détend, sa température baisse et la vapeur d'eau qu'il contient se condense.

Physiquement, les brouillards sont usuellement décrits par deux paramètres physiques que sont la distribution de tailles de gouttes qui le composent et la densité volumique d'eau dans l'air. La distribution de tailles de gouttes qui composent les brouillards est en général considérée comme étant unimodale. On considère que le brouillard est formé de particules ayant des tailles allant de $0,1 \mu\text{m}$ à $50 \mu\text{m}$. Le modèle le plus couramment utilisé pour décrire cette distribution a été proposé par Deirmendjian et est de type loi gamma modifiée [Deirmendjian 69] :

$$n(r) = Ar^\alpha \exp(-br^\gamma) \quad (3.21)$$

avec $n(r)$ le nombre de gouttelettes par unité de volume, r le rayon des gouttelettes, A , α , b et γ sont des paramètres permettant d'ajuster le modèle aux observations. [Shettle 79] on a proposé une typologie des brouillards en quatre classes fondées sur ce modèle de distribution granulométrique.

	Modèle	A	α	b	γ	$r_m(\mu\text{m})$	$N(\text{cm}^{-3})$
Advection	1	0,027	3	0,3	1	10	20
	2	0,066	3	0,375	1	8	20
Rayonnement	3	2,373	6	1,5	1	4	100
	4	607,5	6	3	1	2	200

FIGURE 3.22 – Paramètres de distributions granulométriques d'après Shettle et Fenn, r_m est le mode de la distribution de rayons, N est le nombre total de particules, A , α , b , γ sont les paramètres du modèle de loi gamma proposée par Deirmendjian 3.21.

L'utilisation de tels paramètres conduisent à des distributions telles qu'illustrées sur la figure 3.23. Les modèles 1 et 2 sont caractéristiques respectivement de brouillards d'advection denses et modérés tandis que les modèles 3 et 4 sont représentatifs respectivement de brouillard de rayonnement denses et modérés.

Les paramètres de la loi décrivant ces distributions dépendent du mode de formation du brouillard et de son stade d'évolution (les plus grosses gouttes se forment en dernier et sont les premières à disparaître). En général, plusieurs processus de formation concourent à former

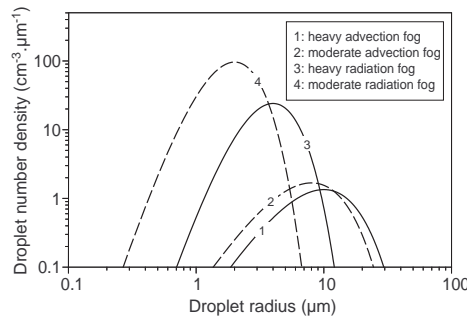


FIGURE 3.23 – Modèles granulométriques de type loi gamma modifiée utilisés par [Shettle 79] pour des brouillards d’advection (1 et 2) et des brouillards de rayonnement (3 et 4).

une nappe de brouillard. L’un de ces processus est prépondérant et préside globalement à la distribution de tailles de gouttes tandis que l’autre enrichit la gamme de tailles présentes. Des gouttelettes de moins de $3 \mu\text{m}$ sont en pratique rarement observées dans les brouillards complètement développés.

Interaction du brouillard avec la lumière

Lors de la traversée de l’atmosphère par la lumière, les ondes électromagnétiques qui la composent peuvent interagir avec les particules en suspension dans l’air. En l’occurrence, dans le brouillard, la lumière interagit avec l’eau, mais également avec les diverses particules hygroscopiques.

L’extinction est l’atténuation du signal résultant de deux phénomènes concomitants que sont l’absorption et la diffusion. L’absorption décrit la transformation de l’énergie lumineuse en énergie calorifique, alors que la diffusion est le phénomène par lequel une onde se trouve dispersée dans des directions différentes de la direction de propagation de l’onde incidente.

Dans le cadre du brouillard, les particules étant des gouttelettes d’eau, l’absorption est faible et le coefficient d’extinction est essentiellement dû à la diffusion. L’extinction est décrite comme pour la pluie par la loi de Beer-Lambert présentée dans les équations 3.17 et 3.18, p. 95. L’éclairement E produit par un faisceau parallèle d’intensité I donnée traversant du brouillard de densité k décroît exponentiellement avec la distance d d’observation. Le coefficient k décrit le brouillard (ou toute autre atmosphère perturbée) par son interaction énergétique avec la lumière, en particulier dans le cas d’un faisceau dirigé. Dans le cas d’une source ponctuelle plongée dans le brouillard, il faudra composer cette loi avec la loi d’Allard décrivant l’éclairement produit par une source ponctuelle en fonction de la distance d’observation. On aura alors une extinction décrite par :

$$E = \frac{I}{d^2} e^{-kd} \quad (3.22)$$

Nous venons de voir l’impact énergétique d’une couche d’atmosphère de profondeur d sur un faisceau lumineux selon le modèle de Beer-Lambert. Cela ne tient compte que de l’effet sur les rayons dans la direction d’incidence mais ne reflète pas l’impact du brouillard sur la géométrie d’une source (le modèle de Beer-Lambert n’explique pas la présence de halos). De plus ce modèle ne tient pas compte de l’énergie retransmise selon la direction d’incidence. Cette énergie dépend

de la taille des gouttes. Plus elles sont grosses, plus la quantité de lumière diffusée vers l'avant est importante lors d'interactions entre la lumière et une gouttelette.

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une particule, la lumière est diffusée dans différentes directions. La distribution de lumière selon ces directions correspond à ce que l'on appelle la fonction de diffusion ou fonction de phase de la particule. Les gouttes de brouillard étant en suspension dans l'air, elles sont de forme sphérique et la fonction de phase est symétrique par rapport à la direction d'incidence. Dans ce cas, la fonction de phase est décrite par l'angle α entre la direction d'incidence et la direction observée. avec θ' et ϕ' la direction d'incidence du

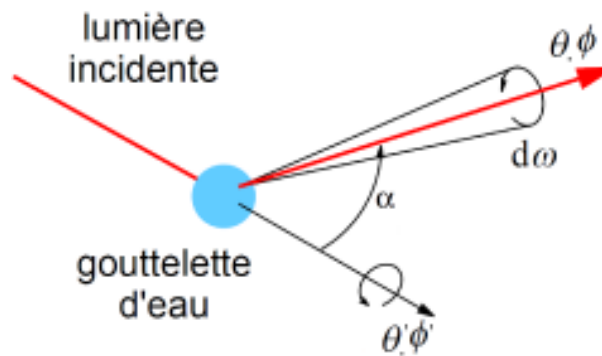


FIGURE 3.24 – Diffusion de la lumière par une gouttelette d'eau.

flux par rapport à la surface de la goutte, le flux sortant est réémis dans un cône d'angle solide $d\omega$ dans la direction θ et ϕ . Par symétrie sphérique, on peut résumer le système à un seul angle d'incidence θ' et un seul angle de sortie θ .

Le modèle de fonction de phase le plus couramment utilisé a été proposé dans [Henyey 41] :

$$P(\cos \alpha) = \frac{1 - q^2}{2(1 + q^2 - 2q \cos \alpha)^{3/2}} \quad (3.23)$$

où $q \in [-1; 1]$ est la diffusion en avant du milieu ou « facteur d'asymétrie ». Pour des particules de très petite taille induisant une diffusion isotrope $q \simeq 0$. Pour des grosses particules diffusant la lumière dans la direction d'incidence ($\theta = \theta'$, $\alpha = 0^\circ$), $q \simeq 1$. Lorsque q tend vers -1 la rétro-diffusion de la lumière en direction de la source ($\theta = -\theta'$, $\alpha = 180^\circ$) est prépondérante.

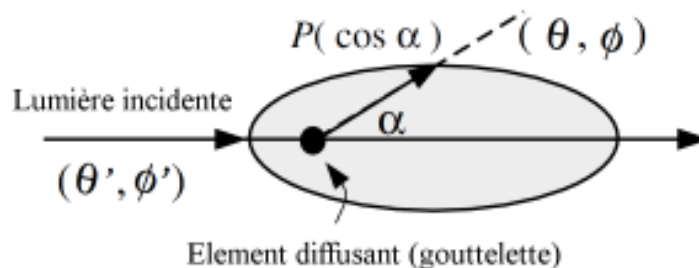


FIGURE 3.25 – Logarithme de l'indicatrice de la fonction de phase d'une gouttelette selon le modèle de Henyey-Greenstein avec $q = 0.65$.

Une indicatrice telle que présentée figure 3.25 est issue d'une des modèles les plus simples et les plus usités (*cf.* Eq. 3.23), la forme de l'indicatrice de fonction de phase est en réalité bien plus complexe. L'utilisation de la théorie de Mie prenant en compte l'ensemble des interactions (réflexion, réfraction, interférences) entre la lumière et une gouttelette est nécessaire afin de mieux décrire la diffusion [Wiscombe 80]. La théorie de Mie permet en outre d'estimer une fonction de phase équivalente en cas de milieux poly-dispersés. Celle-ci est la résultante des fonctions de phases calculées en fonction des tailles de gouttes et pondérée par la distribution de tailles de gouttes présentes dans l'atmosphère. La figure 3.26 illustre la fonction de phase équivalente d'un brouillard poly-dispersé avec une distribution granulométrique mesurée dans brouillard d'advection.

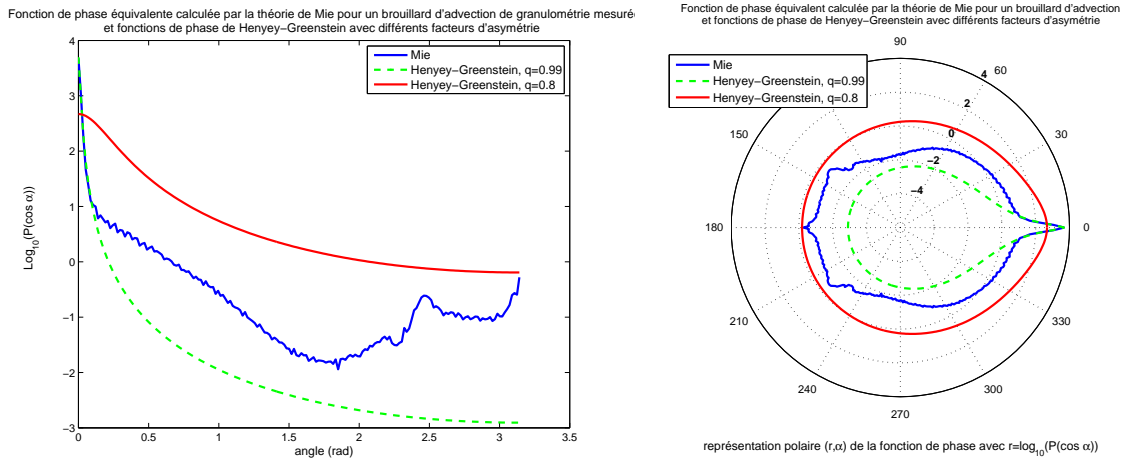


FIGURE 3.26 – Fonction de phase réelle (calculée par la théorie de Mie) et fonctions de phase d'après le modèle de Henyey-Greenstein.

Les travaux [Chandrasekhar 60] ont mené à une description analytique du phénomène en tenant compte de la fonction de phase et de la diffusion (simple ou multiple). La lumière émise par une source ponctuelle à une distance d dans une direction θ peut être connue en intégrant l'équation de transport radiatif (RTE) :

$$\mu \frac{\partial I}{\partial T} + \frac{1 - \mu^2}{T} \cdot \frac{\partial I}{\partial \mu} = -I(T, \mu) + \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} P(\cos \alpha) I(T, \mu') d\phi' d\mu' \quad (3.24)$$

Avec :

- $T = kd$ est la densité optique et k le coefficient d'extinction de l'atmosphère
- $\mu = \cos \theta$
- $P(\cos \theta)$ est la fonction de phase des particules contenues dans l'atmosphère, elle est symétrique lorsque l'on considère un repère polaire centré dessus
- $\cos \alpha = \mu\mu' + \sqrt{(1 - \mu^2)(1 - \mu'^2)} \cos(\theta - \theta')$ (avec α la différence entre l'angle d'incidence et l'angle de diffusion, *cf.* Fig. 3.25)

Cette équation décrit la diffusion de la lumière d'une source ponctuelle dans un milieu tel que le brouillard. Elle traduit la physique du halo en décrivant le comportement de la lumière à l'intérieur d'une sphère de rayon R et permet de connaître l'intensité directionnelle à la surface d'une sphère d'atmosphère homogène $I(T, \theta)$ tel qu'illustré sur la figure 3.27.

Malheureusement, il n'existe pas de solution analytique à cette équation, d'où l'utilisation de simulations de type Monte-Carlo permettant d'en trouver une solution approchée dans différentes

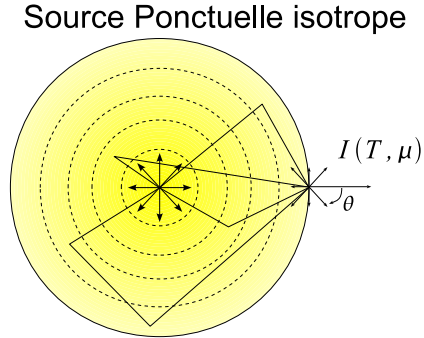


FIGURE 3.27 – Diffusion à l’intérieur d’une sphère d’atmosphère de rayon d entourant une source ponctuelle.

configurations. De plus, elle est exprimée ici pour une source ponctuelle, cas le plus simple mais non-réaliste.

D’autres travaux tels que ceux de [Dumont 04] décrivent différemment l’interaction du brouillard avec la lumière en l’abordant dans le cadre de la théorie du filtrage linéaire :

$$L_s(d) = L_s(0)e^{-kd} + L_s(0) * F^{-1}\{M^{kd} - e^{-kd}\} \quad (3.25)$$

avec $L_s(0)$, la luminance de l’objet, k le coefficient d’extinction du brouillard, d la distance d’observation et M décrit l’effet fréquentiel du brouillard sur la lumière. Dans l’expression 3.25, le premier membre décrit l’effet d’atténuation de la lumière dans le brouillard, le second membre décrit l’effet de halo dû aux diffusions simples et multiples. En utilisant l’analogie entre une tranche de brouillard et un filtre optique, la fonction de transfert de modulation (FTM) $M(k, d)$ d’une tranche homogène de brouillard d’épaisseur d et de coefficient d’extinction k peut être déduite de la FTM d’une tranche d’épaisseur optique unité ($kd = 1$), aussi appelée Opérateur Fréquentiel de Contraste (OFC).

$$M(k, d) = M^{kd} \quad (3.26)$$

Dans ce second cas également, l’estimation de l’OFC n’est pas possible analytiquement. Afin d’outrepasser ce problème, la solution proposée consiste à estimer cet opérateur fréquentiel de contraste comme la transformée de Fourier de l’intensité d’une source vue à travers un brouillard de densité optique unitaire. Le problème de l’estimation de l’intensité perçue est repoussé à la seule estimation de l’OFC, permettant ensuite d’estimer l’intensité reçue pour des densités variables en utilisant la méthode de l’équation 3.26.

La description des effets visuels du brouillard par la seule caractéristique k n’est que partielle et ne traduit pas la présence et l’importance de l’effet de halo. De plus elle introduit un biais dans tous les problèmes d’inversion de mesure. L’estimation du coefficient d’extinction du brouillard pour une distance émetteur-capteur donnée (observation du flux éteint sur une distance donnée) ne permet pas d’extrapoler à d’autres distances. Il faut soit considérer conjointement l’extinction et la granulométrie, dans ce cas, k est essentiellement caractéristique du nombre d’interactions entre la lumière et l’atmosphère et la granulométrie permet d’intégrer la diffusion avant de la lumière (utilisation d’un modèle type [Chandrasekhar 60] ou [Dumont 04]). Soit il faut considérer que ce n’est pas un facteur constant, mais une fonction dépendante de la distance d’observation et de la granulométrie (utilisation du modèle de Beer-Lambert avec k fonction de d et de la distribution de tailles de gouttes).

Impact du brouillard sur la visibilité routière

L'identification des divers effets du brouillard sur la lumière ayant un impact sur la visibilité routière ont été regroupés dans un même modèle dans [Dumont 10]. Il permet de décrire la photométrie d'une scène par temps de brouillard, de jour comme de nuit. Il propose une expression correspondant au signal visuel reçu qui n'est autre que la distribution bidirectionnelle de luminances $L(i, j)$ dans le champ d'observation. Il tient compte du fait que de multiples sources peuvent être présentes dans le champ de vision et qu'elles contribuent à la fois à éclairer les objets de la scène et qu'elles produisent des halos se superposant à la scène.

$$\begin{aligned}
 L(i, j) = & e^{-kd(i,j)} \left(L_0(i, j) + \Phi(i, j) \sum_{s=1}^n e^{-kd_s(i,j)} L_s(i, j) \right) \\
 & + L_s(i, j) * F^{-1}\{M^{kd(i,j)}\} \\
 & + L_f(1 - e^{-kd(i,j)}) + L_v(i, j)
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

avec L_0 la luminance intrinsèque des objets par temps de brouillard de jour, L_s la luminance des sources, L_f la luminance du ciel, L_v la luminance de voile, k le coefficient d'extinction et $d(i, j)$ la distance d'un objet ou d'une source dans la scène dans la direction (i, j) et $d_s(i, j)$ la distance entre un élément pointé dans la scène et les différentes sources de lumière artificielles présentes.

La première partie du modèle de l'équation 3.27 décrit que dans la direction d'observation (i, j) , la luminance d'un objet à une distance $d(i, j)$ est sa luminance intrinsèque par temps de brouillard de jour ($L_0 = 0$ de nuit), à laquelle s'ajoute la composition de ses caractéristiques photométriques $\Phi(i, j)$ (lambertien, spéculaire, *etc.*) par la lumière qu'il reçoit des différentes sources s , le tout étant atténué sur le chemin optique entre l'objet et l'observateur. La contribution de chacune des sources de lumière artificielle à l'éclairage de l'objet étant elle-même atténuée le long du trajet optique entre les sources artificielles et l'objet pointé (somme des contributions des n sources de l'environnement). À la luminance d'un objet dans la direction (i, j) s'ajoute la contribution du halo des sources artificielles (deuxième membre de l'équation 3.27). Enfin, la luminance du brouillard (L_f) est prise en compte ainsi que le voile de rétrodiffusion (L_v).

Visibilité routière dans le brouillard diurne

Ce modèle générique peut-être différencié pour les situations de jour et de nuit. De jour et en l'absence de sources artificielles d'éclairage ($L_s = 0, \forall s$), il n'y a pas de voile de rétrodiffusion dû à la lumière des feux du véhicule ($L_v = 0$) et le modèle se résume à la loi de Koschmieder (*cf.* Eq. 3.11). Seules la luminance intrinsèque des objets (L_0) et la luminance du brouillard (L_f) comptent comme illustré sur la figure 3.28.

Bien que l'on considère la luminance du brouillard comme constante de jour (le brouillard est baigné par dessus par la lumière du soleil), il a été montré dans [Paulmier 04] qu'elle dépend fortement de l'altitude du soleil (donc de l'heure de la journée), de la hauteur de la couche de brouillard, du type de brouillard ainsi que de la direction d'observation par rapport à la position du soleil.

Les halos se développent autour des sources lumineuses, de jour comme de nuit. Mais en pratique, très rares sont les sources de lumière allumées de jour. De plus, dans le cas où des sources lumineuses seraient allumées, les niveaux de luminance des halos seraient très faibles en rapport des niveaux de luminance de la scène et du brouillard. En pratique, ils ne seraient quasiment pas détectables par l'œil ou par une caméra.

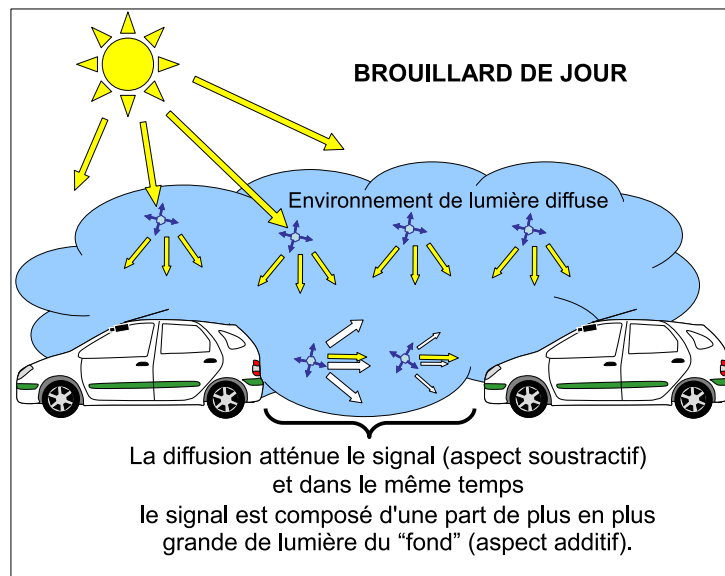


FIGURE 3.28 – Interaction de la lumière et de l’atmosphère dans le brouillard de jour.

Visibilité routière dans le brouillard nocturne

Les travaux [Dumont 99] ont mis en évidence les effets visuels du brouillard, de jour comme de nuit. Ces effets sont des indices sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour détecter la présence de brouillard de nuit. Il y a trois effets majeurs du brouillard observables en situation routière de nuit : l’atténuation qui se traduit par une baisse d’intensité des rayons lumineux provenant d’une source, la diffusion qui se traduit par la présence de halos autour des sources et la rétro-diffusion de la lumière des phares qui se traduit par la présence d’un voile rétro-diffusé en direction du conducteur.

De nuit, dans un environnement sans autres sources que les feux du véhicule, la lumière des feux est atténuée une première fois entre les feux et les objets, puis une deuxième fois entre les objets et l’observateur. Si l’on se réfère à l’équation 3.27, le brouillard n’est éclairé que par les feux, sa luminance est nulle ($L_f = 0$) sauf en ce qui concerne la luminance de voile L_v . Les principaux effets visuels du brouillard de nuit sont résumés sur la figure 3.29.

Enfin, la situation la plus complexe est une scène de nuit composée de multiples sources de lumières telles qu’une route éclairée. Les différentes sources apportent chacune leur contribution lumineuse aux objets de la scène ainsi qu’à la luminance du brouillard. Cette dernière devient très complexe à estimer et contrairement aux situations de jour pour lesquelles on considère que la luminance du brouillard est constante ($L_f(i, j) = L_f = Cte$), de nuit, on pourra avoir une luminance de brouillard dépendante de la scène et du positionnement des sources ($L_f = L_f(i, j)$).

Le halo

Le halo est dû à la diffusion de la lumière par les particules. Cette diffusion est liée à la forme et à la taille des particules et est décrite par la fonction de phase. Si les particules ne diffusaient pas dans d’autres directions que l’axe d’incidence des rayons (facteur d’asymétrie de la fonction de phase $q = 1$ ou $q = -1$), les sources seraient atténuées mais il n’y aurait pas de halo autour des sources. Dans un brouillard composé de gouttes d’encre parfaitement absorbantes, les modèles décrits dans les Eq. 3.17 à Eq. 3.22 seraient valides et il n’y aurait pas de halo autour des sources.

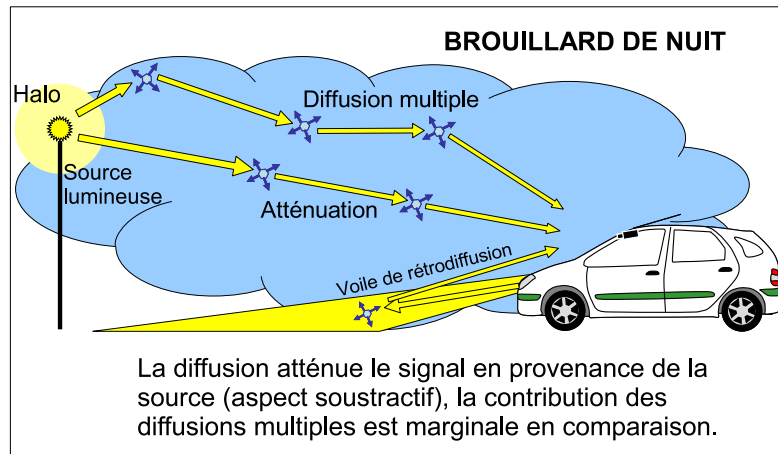


FIGURE 3.29 – Interaction de la lumière et de l’atmosphère dans le brouillard de nuit.

Ces rayons déviés peuvent ensuite de nouveau entrer en interaction avec une autre particule. C’est le phénomène de multidiffusion. L’aspect de diffusion angulaire produisant le halo peut être renforcé par une densité plus ou moins grande du brouillard qui peut favoriser la multidiffusion aux abords de la source de lumière. La multidiffusion est d’autant plus prononcée que la densité du brouillard est importante. Une partie des rayons déviés peuvent finalement se diriger vers l’observateur. Comme on peut le voir sur la figure 3.30, nous observons une certaine intensité en dehors de l’axe d’observation de la source. Ces rayons sont bien issus de la source ponctuelle mais nous les percevons comme provenant de son environnement, ce sont une ou plusieurs déviations des rayons qui nous permettent de percevoir ces rayons.

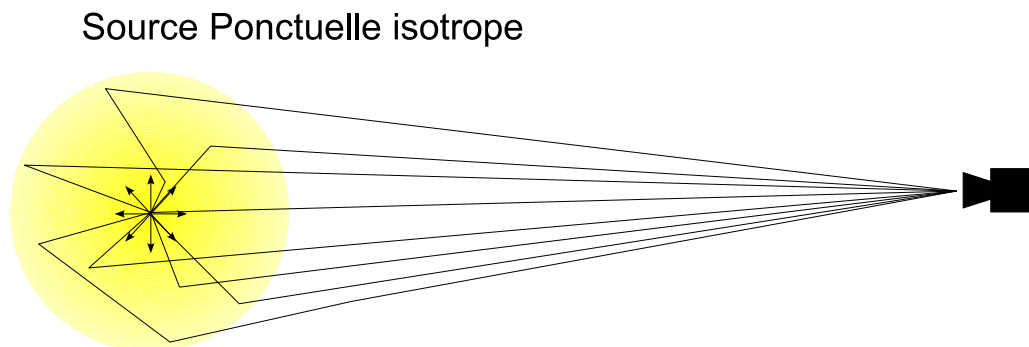


FIGURE 3.30 – Diffusion simple et multiple autour d’une source produisant un halo.

En pratique, pour une densité de brouillard faible, la densité de photons étant bien plus importante à proximité de la source, les chances d’interaction entre des photons et des particules atmosphériques y sont plus élevées. Au loin de la source, les densités volumétriques de photons sont faibles et les interactions peuvent devenir marginales voir quasi-inexistantes. Cela se traduit par un petit halo très proche de la source. Dans le cas où la densité de brouillard est très élevée, les photons issus de la source entrent pratiquement systématiquement en interaction avec une ou plusieurs particules au cours de leur chemin. En pratique, les halos sont plus étendus.

La rétrodiffusion des phares

La trace de rétrodiffusion des feux avant est en réalité le halo produit par les sources de lumière que sont les feux du véhicule. C'est un indice visuel important lorsque aucune source lumineuse externe n'est visible dans l'environnement. Cette situation étant fréquente hors des agglomérations, en particulier sur routes départementales ainsi que sur la plupart de nos autoroutes. Deux effets contribuent à rendre ce phénomène difficilement détectable, le niveau de luminance du brouillard (éclairé par d'autres sources de lumière) et le niveau d'adaptation de l'œil de l'observateur à la distribution de luminances de la scène.

De jour, cet effet est négligeable devant la luminance du brouillard. De nuit elle n'est pas non plus perceptible en environnement urbain bien éclairé ou lorsqu'une voiture roule dans le sens inverse car l'intensité de ses feux avant peut amener l'œil du conducteur (ou une caméra) à s'adapter à des niveaux de luminance plus élevés.

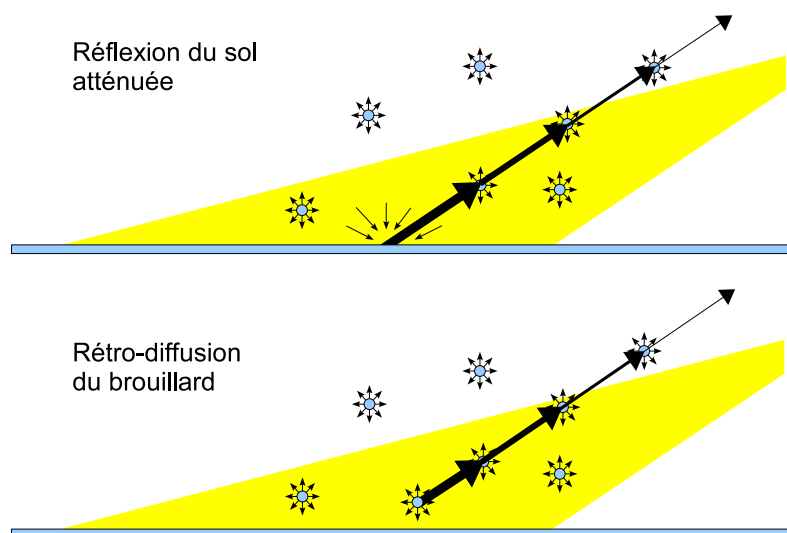


FIGURE 3.31 – Composition de la rétro-diffusion des feux d'un véhicule.

En réalité nous n'observons pas strictement la rétro-diffusion du brouillard (Fig. 3.31 en haut), mais une composition entre la réflexion de la chaussée atténuée (Fig. 3.31 en bas) et la rétro-diffusion.

La route reçoit des rayons lumineux provenant de diverses directions (principalement les phares mais également des rayons diffusés de la lumière des phares). La lumière due aux phares en un point du sol est atténuée par la couche de brouillard entre les feux et le point considéré. La composante réfléchi par le sol dirigée vers la caméra sera elle aussi atténuée en fonction de la distance entre le point considéré et la caméra.

En plus de cette réflexion s'ajoute une part de rétro-diffusion ainsi qu'une faible part de multidiffusion. Si nous considérons une gouttelette donnée, l'intensité de la lumière qui l'atteint peut avoir été atténuée sur le chemin optique entre les feux et la particule. La part de lumière renvoyée vers la caméra pourra elle aussi être atténuée sur son chemin en fonction de la distance entre la particule et la caméra.

3.4.4 Visibilité photométrique en présence de brouillard nocturne

Nous avons présenté la méthodologie d'estimation de la visibilité photométrique par temps clair en section 3.3 et les modèles décrivant les interactions de la lumière avec l'atmosphère en section 3.4. Nous sommes donc en mesure d'étendre la méthodologie d'estimation de la visibilité photométrique en prenant en compte la présence d'une atmosphère dégradée telle que le brouillard.

La prise en compte de la présence de brouillard dans le cadre de la visibilité photométrique de nuit nécessite de considérer les effets du brouillard sur la lumière émise par les feux du véhicule d'une part. La lumière des feux du véhicule est atténuée le long du chemin optique entre les feux et l'obstacle considéré. D'autre part, la luminance de l'obstacle ainsi éclairé est elle aussi atténuée le long du chemin optique séparant l'objet de l'observateur.

Nous utilisons en première approximation le modèle simple de diffusion de Beer-Lambert lors du trajet de la lumière dans l'atmosphère. L'éclairement reçu par l'obstacle et au pied de celui-ci est tiré des équations 3.8 et 3.22. Il est tel que :

$$E = E_g + E_d = \frac{I_g + I_d}{d^2} \cdot e^{-kd} \quad (3.28)$$

avec E en *lux*, l'éclairement reçu par la cible et par le sol au niveau de l'obstacle, E_g et E_d les éclairements dus aux feux gauche et droite en *lux*, I l'intensité de chaque feu dans la direction de la cible en cd , k le coefficient d'atténuation de l'atmosphère et d la distance entre le feu et l'objet en m .

De même, en intégrant les équations 3.9 et 3.22, nous estimons les niveaux de luminance perçus par l'observateur :

$$L_o = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{I_g + I_d}{d^2} \cdot e^{-2kd} + L_v \quad \text{et} \quad L_f = R \cdot \frac{I_g + I_d}{d^2} \cdot e^{-2kd} + L_v \quad (3.29)$$

avec L_o et L_f la luminance de l'obstacle et du fond en $cd.m^{-2}$, ρ le coefficient de réflexion de l'obstacle, R le coefficient de rétro-réflexion en $cd.m^{-2}.lux^{-1}$, k le coefficient d'atténuation de l'atmosphère, d la distance entre le feu et l'objet en m et L_v la luminance du voile rétrodiffusé.

En définitive, les luminances perçues sont telles que les luminances par temps clair atténuées par un facteur e^{-2kd} auxquelles s'ajoute la luminance de voile. Dans ces conditions, le contraste est tel que :

$$C = \frac{|L_o - L_f|}{L_f} = \frac{|\rho/\pi - R|}{R + (L_v d^2 e^{2kd} / (I_g + I_d))} \quad (3.30)$$

D'une part, la présence de brouillard atténue la lumière reçue puis renvoyée par les objets, ce qui, indépendamment de la luminance de voile, n'aurait pas d'effet sur le contraste calculé selon l'équation 3.10. Mais cela diminuerait tout de même fortement les niveaux de luminance mis en jeu et pris en compte dans le modèle d'Adrian (*cf.* Eq.3.7). En plus de cette diminution des luminances mises en jeux, la luminance de voile, elle, réduit le contraste perçu entre la cible et son fond.

Nous présentons sur la figure 3.32 la distance de visibilité photométrique estimée le long de la route départementale 786 en fonction de la densité de brouillard. La luminance de voile prise en compte est issue d'expérimentations en salle de brouillard menées dans le cadre du travail présenté dans [Dumont 99]. Nous avons estimé la distance de visibilité photométrique pour un conducteur de 25 ans et un temps de présentation de 0,2 s en conditions de conduite (un niveau de visibilité $VL = 7$ est jugé suffisant pour détecter l'obstacle).

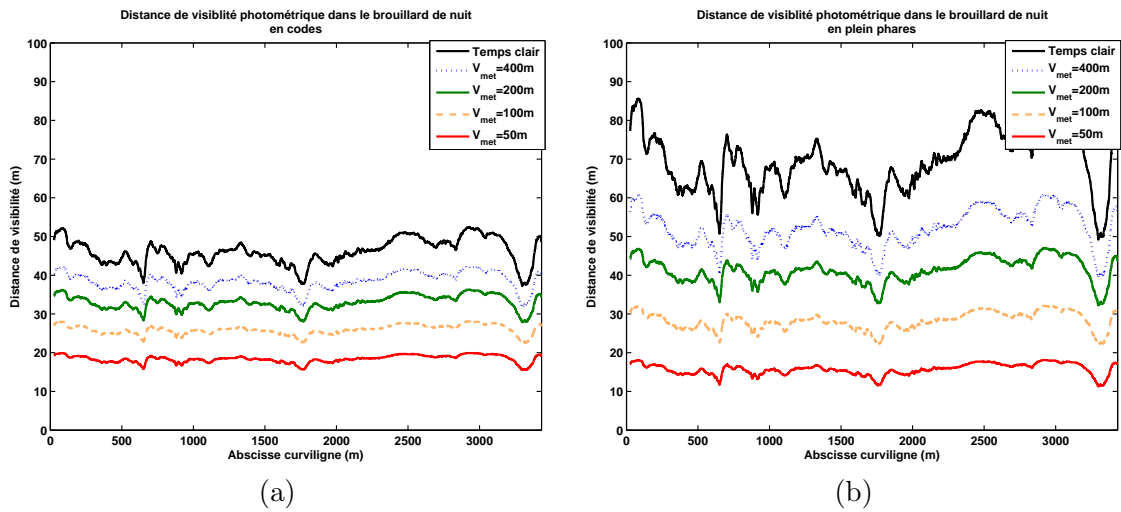


FIGURE 3.32 – Distance de visibilité photométrique dans le brouillard de nuit, en codes (a) et en phares (b).

La distance de visibilité est drastiquement réduite en présence de brouillard, et en particulier dans les brouillards denses. Il est à noter que du fait d'un voile de rétro-diffusion plus important lors de l'utilisation des phares. La distance de visibilité lorsque le véhicule est en pleins phares peut être inférieure à la visibilité en codes pour une densité de brouillard telle que $k = 0,06 \text{ m}^{-1}$ (visibilité météorologique, $V_{met} = 50 \text{ m}$). Ce qui va dans le sens de la prescription du code de la route recommandant d'utiliser les codes et non les pleins phares lorsque la visibilité nocturne est fortement réduite en conditions météorologiques dégradées (pluie, brouillard, neige).

Nous sommes en mesure d'estimer la distance de visibilité photométrique en conditions atmosphériques dégradées le long d'un trajet donné. D'après les modèles décrivant la visibilité en présence de pluie ou de brouillard, nous pouvons estimer la distance de visibilité photométrique de nuit en fonction de la distance de visibilité météorologique pour une situation type (observateur à $1,20 \text{ m}$, pneu sur la chaussée). Nous utilisons des mesures réelles de rétrodiffusion de la chaussée, mais si nous disposions de la photométrie des feux ou de l'âge du conducteur, nous pourrions estimer de façon personnalisée une distance de visibilité photométrique de référence ou en conditions dégradées.

La méthode de calcul de la visibilité photométrique est itérative. De même que les méthodes d'estimation de la visibilité géométrique considèrent une cible progressant jusqu'à ce qu'elle ne soit plus visible, l'estimation de la distance de visibilité photométrique se fonde sur la même logique. Le calcul peut être plus ou moins long en fonction des caractéristiques photométriques de la scène. En termes d'implantation, il n'est pas envisagé, dans un premier temps, d'implanter le modèle de calcul dans les serveurs opérationnels et de procéder à ce calcul sur requête des véhicules proches. Une étude de faisabilité traitant tant des aspects de charge calculatoire et de capacités de communications en rapport avec la charge maximale que peut avoir la route doit avoir lieu. On peut néanmoins calculer des profils de visibilité photométrique dans différentes conditions telles que l'utilisations de pleins phares ou de codes, une atmosphère claire ou perturbée, voire même en fonction de l'âge du conducteur. Lors de l'utilisation de ces informations dans le cadre du calcul de risque, si une information comme le type de feux est renseignée on travaillera sur les donnée correspondantes, sinon on pourra se reporter à des données types (photométrie moyenne des feux, âge moyen). En l'occurrence, le type de feux utilisé est une donnée

transitant sur le bus CAN de la plupart des véhicules modernes, on peut d'ores et déjà différencier ces deux conditions entre elles et calculer la visibilité photométrique en fonction de la densité de brouillard. Lorsque le modèle de calcul du risque devra être renseigné sur la visibilité photométrique, il faudra indiquer si c'est par temps clair, ou dans le cas contraire, quelle est la visibilité météorologique dans le brouillard.

3.5 Synthèse

Nous avons présenté dans ce chapitre les modèles et les scénarios associés aux différents aspects de la visibilité routière. Ces modèles peuvent être différenciés en deux classes : statique et dynamique. Les modèles dits « statiques » comme la visibilité géométrique sur obstacle ou la visibilité photométrique de nuit ont des périodes d'évolution lentes. Ils sont renseignés à la suite de campagnes d'auscultation et de mesure et permettent d'estimer la visibilité structurelle. Les calculs sont effectués *offline* et la visibilité structurelle en fonction de la position sur la route est renseignée dans le serveur de base de données comme la borne supérieure de la visibilité routière. Les modèles dits « dynamiques » comme la visibilité atmosphérique sont conjoncturels et ont besoin d'être alimentés par des variables dynamiques. Celles-ci ne peuvent être estimées qu'en temps réel dans l'environnement du véhicule. Ces modèles ont vocation à être instanciés dans le serveur opérationnel. Ils prennent à la fois des données stockées sur le serveur de base de données et des données estimées depuis le véhicule.

Nous avons présenté les outils nous permettant de renseigner certains des paramètres de ces modèles. Concernant la visibilité géométrique, le projet DIVAS a permis, au travers d'une collaboration avec le Centre de Robotique des Mines ParisTech, de montrer la faisabilité d'une estimation de la distance de visibilité géométrique par un outil avec un plus grand rendement que les méthodes antérieures. Pour des raisons de temps de calcul, la visibilité géométrique est calculée *offline* pour un scénario précis (un cible de 0,6 m de haut placée au centre de la voie et un observateur à 1,2 m au centre de la voie également). Mais on peut imaginer que de tels outils permettraient ultérieurement de renseigner la base de donnée par l'environnement 3D et de faire l'instanciation de la méthode itérative de calcul de la visibilité géométrique dans le serveur opérationnel. Cela permettrait de tenir compte de la hauteur réelle du point de vue de l'observateur ainsi que de sa position réelle sur la voie. Il serait alors envisageable de prendre en compte différents obstacles ou d'estimer une visibilité géométrique qui ne soit pas binaire (« vu/non-vu ») mais continue (« X % de l'obstacle est visible »).

Concernant la visibilité photométrique, on estime qu'elle ne présente pas de problème particulier de jour par temps clair. On trouvera bien entendu des situations complexes du point de vue photométrique, tel qu'un objet de même luminance que son fond qui restera indiscernable. De jour, il est estimé que les situations générant une difficulté à distinguer la route, les autres usagers ou des obstacles, apparaissent essentiellement à contre-jour ou selon des géométries de scènes bien spécifiques. De nuit, deux situations peuvent être distinguées : les situations urbaines avec un éclairage public de la voie et les situations dans lesquelles le conducteur n'a que ses propres feux pour éclairer la voie. La première situation est assimilée aux conditions de jour. En effet, en ville, de nuit, à moins de manques flagrants de l'éclairage urbain, les conditions d'illumination sont suffisamment bonnes pour que la visibilité photométrique ne soit pas un problème en regard des vitesses pratiquées. En revanche, lorsque le conducteur n'a que ses feux pour illuminer la route, nous avons montré que la visibilité photométrique pouvait être inférieure à 100 m, ce qui est peu en regard des vitesses pratiquées sur le réseau secondaire ou sur des autoroutes non éclairées. En définitive, le facteur le plus impactant est sûrement la nature et la portée des feux

utilisés. Nous avons également montré que non seulement le scénario choisi (type d'objet, taille et coefficient de réflexion) influait sur l'estimation de la visibilité photométrique, mais que l'âge du conducteur avait aussi un impact important dans le modèle d'Adrian.

De même que pour la visibilité géométrique, nous avons présenté des outils à grand rendement permettant de renseigner les variables du modèle de visibilité photométrique. Ce qui conforte l'idée d'une applicabilité du projet en amont, le recueil des données propres aux voies étant du ressort des questionnaires de celles-ci. De même que pour la visibilité géométrique, nous effectuons les calculs de visibilité photométrique *offline* selon un scénario précis. La visibilité photométrique disponible en fonction de la position sur la route est ensuite stockée sur le serveur de base de données. Mais de même que pour la visibilité géométrique, avec le développement de la puissance de calcul embarquée ou disponible pour les serveurs opérationnels, il sera envisageable ultérieurement de faire un calcul personnalisé tenant compte éventuellement du type de feux du véhicule ainsi que de la hauteur du point de vue ou de l'âge du conducteur.

Enfin, nous avons montré que les conditions atmosphériques avaient un impact crucial sur la visibilité, aussi de bien de jour que de nuit. Outre ses effets sur l'adhérence, la pluie induit de nombreuses modifications sur la perception de la scène vue de l'intérieur d'un véhicule et sur le comportement photométrique des objets de l'environnement. Peu d'études permettent d'en apprécier précisément les effets. Nous nous contenterons dans une première approche d'estimer la distance de visibilité atmosphérique à partir des modèles existants, sachant que nous considérons également les effets sur l'adhérence comme discuté dans le chapitre 2.

La présence de brouillard impacte la visibilité aussi bien de jour que de nuit. Nous avons vu que le brouillard était un phénomène local et difficile à prévoir, en particulier la présence de brouillard au niveau du sol ne peut être obtenue via des méthodes aériennes et requiert donc une estimation sur site. Les matériels permettant d'obtenir de tels résultats à l'heure actuelle sont coûteux, fixes et parfois encombrants. Pour ces raisons, l'utilisation d'une caméra embarquée semble être une solution viable dans le cadre de besoins de sécurité routière individualisés et localisés.

Nous avons vu les définitions permettant de caractériser le brouillard, elles rendent compte de la différence essentielle de perception du phénomène entre brouillard diurne et brouillard nocturne. Les effets du brouillard sur la visibilité ont essentiellement été étudiés de jour. Les définitions et les modèles sont fonctionnels et le scénario de visibilité sur obstacle de jour correspond bien à nos besoins. En revanche de nuit, la configuration de la scène et le positionnement de la ou des sources de lumière ainsi que la nature de l'obstacle pris en considération influent sur la visibilité de ce dernier. Le modèle de Beer-Lambert, central dans les définitions de la portée lumineuse et de la portée optique météorologique, est limité lorsqu'il s'agit de décrire la physique de la lumière et en déduire une notion de visibilité fonctionnelle pour nos besoins.

Nous présentons dans la suite les travaux existant portant sur la détection et l'estimation des conditions atmosphériques dégradées par caméra embarquée dans un véhicule. Nous détaillons dans quelle mesure ces méthodes peuvent être utilisées afin d'estimer la visibilité routière. Enfin nous présentons les mises en œuvre que nous avons réalisées en s'appuyant sur ces méthodes ou par le développement de techniques originales afin de compléter les outils à notre disposition pour estimer la visibilité routière en conditions dégradées et en particulier concernant le brouillard de nuit.

Estimation de la visibilité atmosphérique par caméra embarquée

Nous allons présenter dans la suite les différentes méthodes par caméra utilisées dans le cadre d'une détection et d'une caractérisation de conditions atmosphériques dégradées. Les méthodes dynamiques embarquées sont nécessaires car ces événements, localisés dans l'espace et dans la temps, affectent aussi bien l'adhérence (pluie, neige, grêle) que la visibilité (pluie, brouillard, neige). Nous nous sommes focalisés sur deux phénomènes communs en France que sont la présence de pluie et la présence de brouillard.

Dans la suite nous présentons les travaux existants permettant d'estimer par l'utilisation d'une caméra embarquée la présence de pluie ainsi que la présence de brouillard. L'objectif étant d'apprécier la hauteur d'eau sur la route et l'intensité de la pluie afin d'estimer l'adhérence et la distance de visibilité disponibles en présence de pluie. En présence de brouillard, l'objectif est d'estimer la distance de visibilité sur obstacle.

Un certain nombre de travaux se sont déjà intéressés à la détection du brouillard ou bien de la pluie à l'aide de caméras. Nous détaillons les versions statiques de ces méthodes et exposons les limites qu'elles peuvent rencontrer dans le cadre d'une exploitation dynamique en configuration embarquée dans un véhicule. Lorsqu'elles existent, nous présentons les méthodes déjà développées en conditions embarquées, la performance de ces méthodes et le potentiel qu'elles présentent pour une exploitation dans le cadre du projet DIVAS afin de renseigner les paramètres déterminants de nos modèles d'adhérence et de visibilité.

Dans un premier temps nous ferons le point sur la détection de pluie par caméra. L'étude de la pluie est longtemps restée le domaine réservé des météorologues, mais des besoins concernant une connaissance instantanée de la présence et de l'intensité de la pluie ont donné lieu à quelques travaux sur la pluie en utilisant des caméras. On trouve des applications statiques utilisant des caméras de vidéo surveillance et quelques travaux en configuration embarquée destinés à des applications routières. Les besoins d'estimation de la présence de pluie en conditions embarquées ont donné lieu au développement de nouvelles méthodes dans le cadre du projet DIVAS. Nous détaillerons ces dernières et feront le point sur leur état d'avancement et comment les exploiter

afin d'estimer la présence de pluie et de caractériser la hauteur d'eau sur la route.

Nous ferons ensuite le point sur la détection de brouillard par caméra. Depuis quelques années déjà, la recherche appliquée s'est naturellement appropriée les caméras comme outil privilégié de détection et d'étude du brouillard du fait que ce dernier impacte fortement les signaux lumineux. Ces méthodes ont donné lieu à des applications statiques propres au domaine de la météorologie ou destinées à la vidéo-surveillance visent à détecter et caractériser le brouillard de jour. Les algorithmes peuvent également chercher à restaurer l'image dégradée par la présence de brouillard afin de retrouver une image proche d'une image par temps clair. La météorologie porte un intérêt spécifique aux caméras. Elles existent déjà en nombre sur le territoire (certains réseaux et entreprises sont équipés de vidéo-surveillance). Elles peuvent être aisément implantées si besoin est, et elles sont peu onéreuses en comparaison des transmissiomètres et des diffusiomètres. Le domaine des transports s'est également approprié la problématique de la détection de brouillard de jour par caméra embarquée depuis près de dix ans. Nous présentons l'état d'avancement des méthodes existantes et celle que nous avons choisi d'utiliser dans le cadre de DIVAS afin d'estimer la densité du brouillard de jour en conditions embarquées.

Enfin, nous présenterons les travaux existants dans le domaine de la détection et de la caractérisation du brouillard de nuit. Les travaux dans ce domaine sont peu nombreux, que ce soit en configuration statique ou embarquée. Nous nous sommes attachés dans le cadre du projet DIVAS à développer de nouvelles méthodes afin de combler le manque d'outils dans le domaine de l'estimation embarquée de brouillard nocturne. Nous présenterons dans la suite les travaux que nous avons réalisés dans le cadre spécifique du brouillard de nuit et en particulier une méthode de détection de brouillard fondée sur deux algorithmes fonctionnant en parallèle. Cette méthode s'appuie d'une part sur la présence de halos autour des sources de lumière et d'autre part sur la trace de rétro-réflexion des feux du véhicule. Nous ferons le point sur les performances de ces méthodes et sur les travaux de validation expérimentale qui ont été menés la concernant en conditions écologiques, en salle de brouillard et à l'aide d'outils de simulation de brouillard. Nous détaillerons ses limites actuelles et les travaux restant à entreprendre avant une exploitation éventuelle dans un cadre industriel. Enfin, nous présenterons l'algorithme statique de détection et caractérisation de brouillard que nous avons développé pour caractériser sur notre site de test la densité de brouillard lors de la validation en conditions écologiques de nos algorithmes embarqués.

4.1 Détection et caractérisation de la pluie

4.1.1 Outils de mesure de la pluie

La pluie ayant été étudiée par les météorologues et les physiciens, il existe des appareils de mesure de la pluie depuis plus de 2500 ans. De vasques de collecte de l'eau de pluie assez primitives (II^e siècle av. J.-C.), en passant par les pluviomètres à augets (XVII^e siècle) jusqu'aux spectropluviomètres et mesures radars.

Les stations de météorologie sont couramment équipées de pluviomètres permettant de mesurer une macro-variable d'intérêt de la pluie qu'est la hauteur d'eau. L'eau est recueillie dans un collecteur le plus large possible afin d'améliorer la précision de la mesure. Elle est ensuite guidée vers un récipient gradué dont la lecture peut être automatisée. Le rapport de volume d'eau mesuré en un temps donné et la surface de collecte exprime directement la hauteur d'eau. Les pluviomètres à augets fonctionnent sur le même principe mais ont deux réceptacles basculants qui se remplissent et se vident alternativement. Après chaque vidage d'un des augets, un compteur est incrémenté. Le nombre de basculements d'augets de contenance connue dans une

période donnée donne directement le volume de pluie tombé. Ces systèmes sont particulièrement sensibles au placement du pluviomètre qui doit être à l'écart de tout élément haut ou susceptible de masquer le collecteur en présence de vent. La présence de vent est aussi un facteur nuisant à la qualité des mesures, en modifiant l'orientation de la pluie, la surface de collection de l'eau n'est plus orthogonale à la direction de chute de pluie. Ces deux aspects sont rédhibitoires en ce qui concerne l'implantation de matériels de ce type sur des véhicules.

Des matériels plus récents tels que les spectropluviomètres permettent à la fois d'estimer l'intensité de la pluie et sa granulométrie (*cf.* Fig. 4.1). Ils sont constitués sur un modèle sensiblement identique à un transmissiomètre. Mais contrairement aux transmissiomètres, le volume de l'espace intersecté par le faisceau doit être limité afin de limiter le nombre de gouttes intersectant le volume simultanément. L'amplitude de l'atténuation du faisceau à chaque fois qu'une goutte traverse ce volume est proportionnelle à la surface de goutte projetée par le faisceau. La durée de l'atténuation est quant à elle proportionnelle à la vitesse de la goutte (donc à son volume).

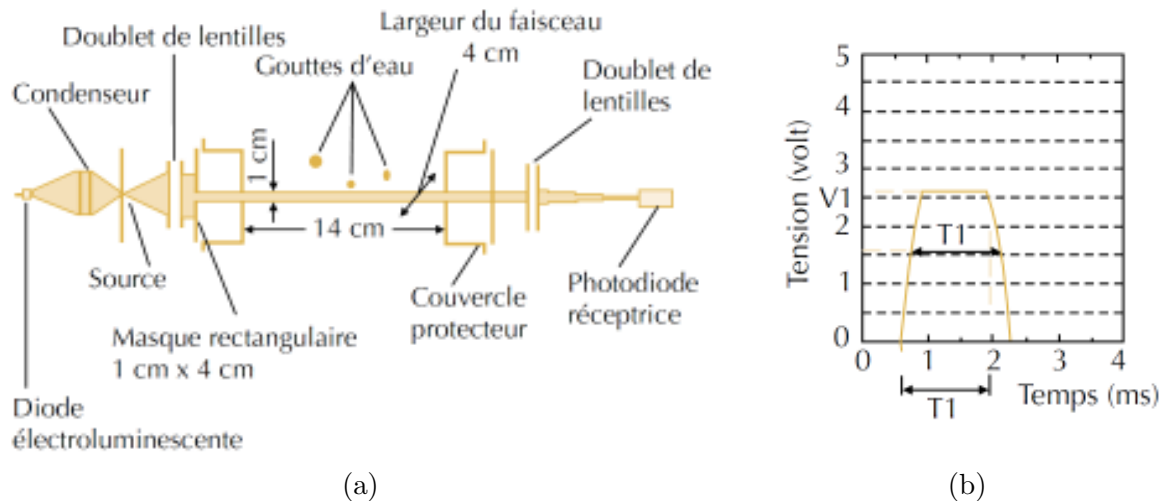


FIGURE 4.1 – Schéma de principe de fonctionnement d'un spectropluviomètre (a) et signal en sortie lors du passage d'une goutte (b).

Les mesures des spectropluviomètres sont également sensibles au positionnement de l'appareil. Si le faisceau n'est pas orthogonal à la direction de chute de pluie, le temps passé par la goutte dans le faisceau est rallongé, son volume surestimé. Un vent relatif (vent ou appareil en déplacement) ou le passage de multiples gouttes simultanément dans le faisceau peuvent aussi biaiser les mesures. Certaines techniques fondées sur deux couches de faisceaux, des faisceaux croisés orthogonalement ou l'utilisation de caméras hautes vitesses sont des voies à explorer pour lever les indéterminations. Ces matériels ne peuvent pas être embarqués sur des véhicules, du fait de leur fonctionnement, de leur encombrement et des limites de mesure en déplacement qu'ils poseraient.

À l'heure actuelle, peu de méthodes ou de matériels différents existent en conditions embarquées pour détecter et/ou caractériser la pluie. La technologie de détection de pluie implantée actuellement dans les véhicules utilise un capteur dédié. Il s'agit de la combinaison d'un émetteur et d'un récepteur infrarouges qui utilise le pare-brise comme guide d'onde et détecte la présence de pluie sur une surface de quelques centimètres carrés sur le pare-brise. En absence de pluie,

le récepteur reçoit en permanence l'onde émise et guidée par le pare-brise. En présence d'eau au dessus du point d'incidence de l'onde dans le pare-brise, une partie de l'onde est réfractée à l'extérieur du pare-brise du fait de la moins grande différence d'indice de réfraction entre le verre et l'eau. Le récepteur détecte une baisse d'intensité du signal et renvoie l'information de présence d'eau sur le pare-brise. Ce phénomène est illustré sur la figure 4.2.

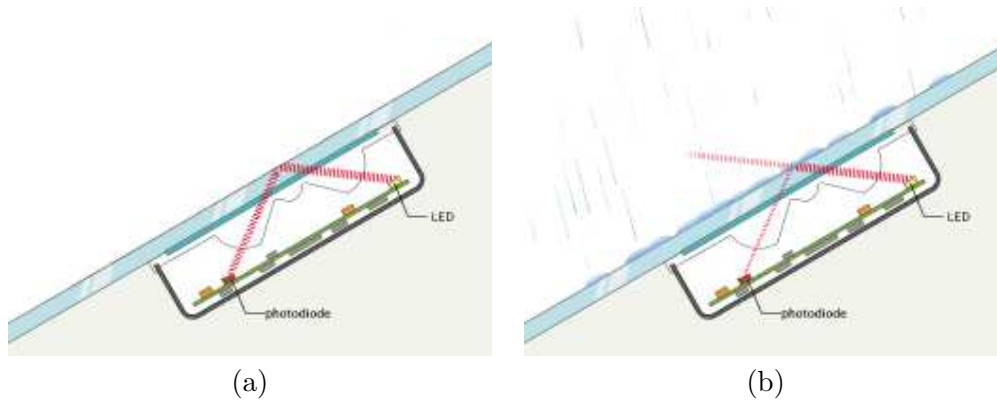


FIGURE 4.2 – Schéma de principe de fonctionnement des capteurs de pluie dédiés en absence (a) ou en présence (b) de gouttes sur le pare-brise.

Ces capteurs sont en général fiables, mais présentent quelques inconvénients. Tout d'abord, ils fournissent une information très localisée sur le pare-brise, quelques gouttes d'eau sur le capteur suffisent à le déclencher et à l'inverse, une projection latérale importante pourra ne pas être vue par le capteur bien qu'elle recouvre partiellement le pare-brise. De plus, ils ne délivrent pas une information quantitative sur la densité de pluie présente, seule l'intensité de la perte de signal est quantifiée, mais il n'est pas évident que cette baisse d'intensité soit corrélée à l'intensité de la pluie car elle peut dépendre de la taille ou de la forme des gouttes sur le pare-brise. Dans certaines conditions de grand froid, la présence de givre au niveau du capteur peut être permanente et n'est supprimée ni par les essuie-glaces, ni par la température interne du véhicule. Ces capteurs sont alors inopérants. Enfin, la présence d'impuretés tels que huile, graisse ou poussières peuvent mettre son bon fonctionnement en défaut.

4.1.2 Détection et caractérisation de la pluie par caméra

Les travaux portant sur la visibilité routière par temps de pluie ont pour l'instant essentiellement été menées dans le cadre d'expériences psychovisuelles par des laboratoires s'intéressant à la sécurité routière, tels [Morris 77, Gibbons 05], ce afin d'évaluer la distance de visibilité ou d'évaluer les performances des essuie-glaces. Ces travaux ont permis de définir les modèles présentés dans le chapitre 3 et de mieux comprendre quels aspects de la pluie avaient un impact déterminant sur la visibilité routière.

Parmi les méthodes fondées sur l'utilisation d'une caméra comme capteur permettant la détection de la présence de pluie, il existe plusieurs algorithmes fonctionnant en configuration statique tels que [Garg 07, Barnum 10, Bossu 09]. L'algorithme proposé dans [Garg 07] consiste en une détection des traces visibles des gouttes de pluie. Afin de réaliser cette détection, les auteurs s'appuient sur la modification temporelle d'intensité de certains pixels induite par la présence de pluie. Cette méthode ne fonctionne que pour une caméra statique afin de pouvoir corrélérer efficacement les intensités des pixels dans le temps. La méthode proposée dans [Barnum 10] se fonde également sur la détection des traces visibles de la pluie. En particulier, les auteurs

ont relevé qu'une analyse des hautes fréquences horizontales (pour des gouttes tombant verticalement comme dans la figure 4.3) corrélée à des connaissances de la photométrie des gouttes permettait une détection sur une ou plusieurs images consécutives. Une méthode assez proche a été proposée par [Bossu 09], elle nécessite également l'utilisation d'une caméra statique dans la mesure où une différenciation du premier plan et de l'arrière plan est nécessaire, après une différenciation des objets statiques et dynamiques de la scène, les gouttes et les objets mobiles sont eux-mêmes différenciés des gouttes par une analyse de formes et en particulier de l'orientation et de la taille des objets. Les petits objets, lumineux, très étirés verticalement sont classés comme des gouttes. Un suivi temporel de l'orientation moyenne des gouttes permet de faciliter et d'améliorer l'extraction dans les images suivantes.



FIGURE 4.3 – Images contenant de la pluie et résultats de détection de la pluie d'après [Garg 07].

Il existe tout de même quelques méthodes fondées sur l'utilisation de caméras embarquées pour la détection de pluie. Des applications destinées à l'exploitation en conditions embarquées ont été proposées dans [Kurihata 05, Roser 09, Cord 08]. La première méthode, illustrée figure 4.4 s'appuie sur le fait que les gouttes sur le pare-brise sont statiques durant un court intervalle de temps, même lors d'un déplacement du véhicule. Après avoir sélectionné manuellement des gouttes visibles sur le pare-brise, un processus d'apprentissage est proposé afin de faire ressortir les caractéristiques type des gouttes de pluie. D'après ces gouttes de référence (*eigen-drops*), ils proposent de détecter les gouttes sur le pare-brise en s'appuyant sur une technique de corrélation locale entre ces « gouttes de référence » et une image acquise en temps réel.

Le principal défaut de cette méthode tient au fait que les gouttes de référence sont des signatures d'intensité locales assez simples (patches de dimension $15 \times 15 \text{ pixels}$ environ). Elles peuvent renvoyer un très bon score de corrélation sur divers objets ou parties d'objets, en particulier dans des environnements complexes 4.4(a). De plus les patches ont été appris sur des séquences présentant des grosses gouttes sur le pare-brise, non focalisées. Les résultats en détection de goutte et classification de la météo associée aux séquences présentant des petites gouttes est nettement moins bonne. Les résultats manquent de stabilité et de nombreuses gouttes potentielles sont tout de même détectées sur des images sans pluie sur le pare-brise. En ne sélectionnant que des gouttes sur fond de ciel, les résultats sont alors de l'ordre de 90 % de bonne classification pluie/non-pluie de leurs séquences vidéo 4.4(b). Néanmoins, en limitant les zones étudiées du pare-brise sur fond de ciel, ils limitent d'autant la zone exploitable, donc l'efficacité, dans des environnements urbains où peu de ciel est visible.

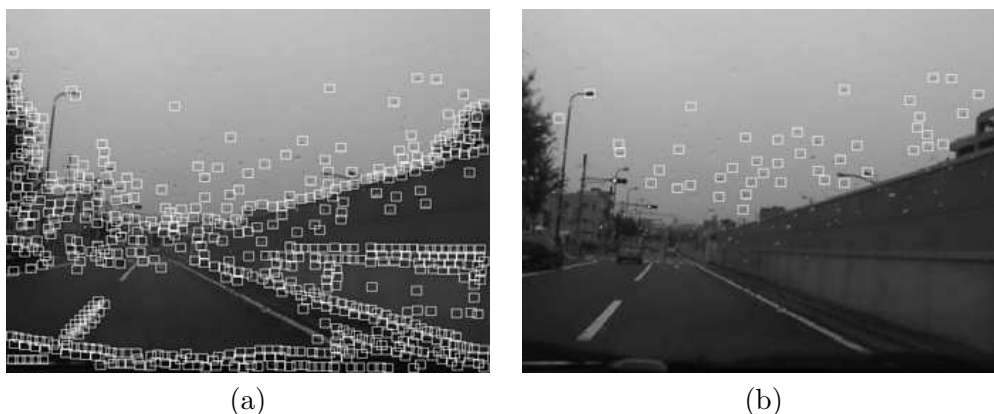


FIGURE 4.4 – Détection de gouttes sur le pare-brise en prenant toute l'image (a) ou ne travaillant que sur fond de ciel (b) [Kurihata 05].

La méthode proposée dans [Roser 09] cherche à détecter les gouttes focalisées présentes sur le pare-brise afin de compenser par des techniques de restauration d'image la dégradation des performances que subissent la plupart des algorithmes classiques utilisés pour les aides à la conduite. Il s'appuie d'une part sur un détecteur de points d'intérêt classique (SURF²) permettant de détecter de multiples points appartenant potentiellement à des gouttes. Les points détectés sont confirmés comme appartenant à des gouttes s'ils présentent un certain nombre de caractéristiques géométriques et photométriques propres aux gouttes.

Cette méthode n'est pas à proprement parler destinée à caractériser la pluie. Les auteurs ont pour objectif de détecter les gouttes dégradant l'image de la scène en vue d'une restauration ultérieure. Ils s'appuient sur la détection des discontinuités fortes dans l'image mais ne cherchent pas à quantifier le nombre de gouttes.

La méthode proposée par [Cord 08] s'appuie sur le même constat que [Kurihata 05] : les gouttes sont statiques sur le pare-brise, même lorsque le véhicule est en mouvement. En utilisant un moyennage temporel des pixels de l'image, les traces des gouttes d'eau statiques restent nettes et contrastées alors que le fond, en mouvement lorsque le véhicule se déplace, tend à prendre une valeur moyenne. Le comportement photométrique des gouttes, qui génèrent un gradient élevé dans l'image, permet de les détecter. Les résultats actuels et le potentiel de la méthode ont donné lieu à un dépôt de brevet dans le cadre du projet DIVAS auprès de l'INPI dont l'examen est encore en cours à ce jour.

L'algorithme ainsi développé est rapide (25 images par seconde). Il a été testé sur une base d'enregistrements vidéos produite sur un véhicule équipé d'une caméra et d'un PC par le LIVIC. Différentes conditions de pluie (pluie dense, pluie fine, absence de pluie) ainsi que différents réseaux routiers (autoroute, route nationale, urbain) ont été testés. Les résultats en détection de pluie sont très bons (près de 100 % de bonnes détection « pluie/non-pluie » sur les séquences de test). Les résultats n'ont pas été quantifiés sur des séquences de référence car il n'existe pas de *benchmark* national ou international de séquences de pluie à l'heure actuelle. Les résultats sont satisfaisants, aussi bien sur des séquences avec ou sans pluie, de nuit comme de jour, pluie fine ou grosses gouttes.

La méthode propose de quantifier une densité surfacique de pluie sur une portion du pare-brise. Cette mesure doit être pondérée par la fréquence de passage des essuie-glaces et par la vitesse du véhicule avant de permettre d'estimer l'intensité de la pluie. La phase suivante d'éva-

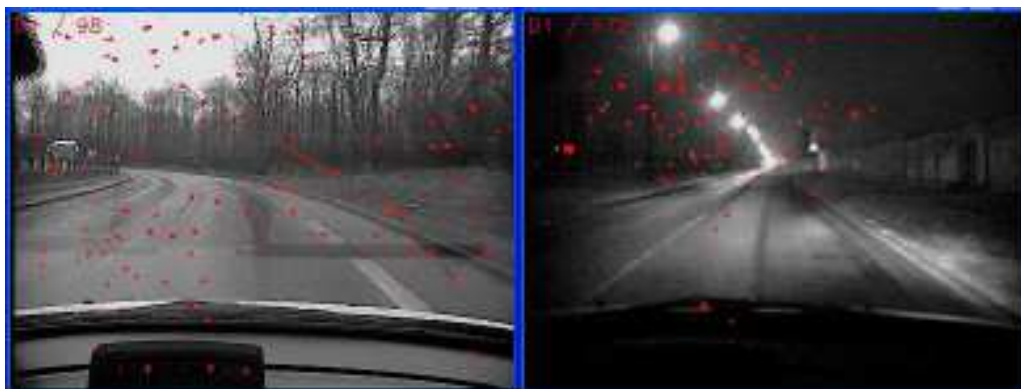


FIGURE 4.5 – Images contenant de la pluie et résultats de détection de la pluie d’après [Cord 08].

luation consistera à une qualification d’un tel outil pour la caractérisation de l’intensité de la pluie. Une méthode qui pourrait être fructueuse serait de comparer les résultats obtenus par caméra avec ceux d’outils de mesure tels que des pluviomètres ou spectropluviomètres installés sur le même site. Il est envisagé par les auteurs de combiner l’information liée à la densité de pluie et à la vitesse du véhicule afin de proposer une évaluation de la quantité de pluie en unité météorologique, c’est-à-dire en millimètre par heure. L’algorithme met en jeu de nombreux paramètres qu’il faudra régler afin d’optimiser la qualité du résultat final, mais les stations météorologiques classiques ne fournissent que des informations heure par heure. Ce qui ne permet pas, pour l’instant, d’effectuer ce travail de comparaison. L’utilisation d’un spectropluviomètre ou d’un capteur de meilleure résolution temporelle pourrait en partie lever le problème de l’estimation de l’intensité de pluie « instantanée ».

4.1.3 Visibilité routière et adhérence en présence de pluie

Dans le cadre de notre approche du risque en conditions dégradées, nous avons besoin d’être renseignés sur deux aspects fortement impactés par la présence de pluie : l’adhérence et la visibilité. Ces deux paramètres sont utilisés dans le module d’estimation du risque et nous permettent ensuite d’estimer la modulation de vitesse qu’il faudrait appliquer en conditions dégradées afin de maintenir le niveau de risque à un niveau nominal comme nous l’avons explicité en détail dans le chapitre 2.

Concernant l’adhérence, le paramètre déterminant est la hauteur d’eau sur la route. Sachant la hauteur d’eau, nous serions ainsi en mesure de renseigner le modèle instancié dans les serveurs opérationnels et servant à estimer l’adhérence. De même, connaissant l’intensité de la pluie, nous pourrions estimer la distance de visibilité atmosphérique sous pluie à l’aide des modèles présentés chapitre 3, section 3.4.2, Eq. 3.19 et 3.20, page 95.

En l’absence d’une information précise sur la hauteur d’eau, une solution envisagée consisterait à utiliser les informations des stations météorologiques associées aux serveurs de bords de voie et à interpoler cette information au niveau du véhicule dans le cas où la pluie serait détectée localement.

4.2 Détection et caractérisation du brouillard de jour

De nombreuses méthodes ont été proposées depuis une quinzaine d'années concernant la détection de brouillard de jour par caméra et la caractérisation de la visibilité dans le brouillard. Nous ne nous attarderons pas sur les nombreuses méthodes statiques permettant d'estimer la densité de brouillard, soit par comparaison d'images [Narasimhan 03b], soit par détection et estimation simultanée du voile atmosphérique [Kaftory 07], soit par comparaison des contrastes attendus par rapport à une scène 3D ou à des mires [Busch 98, Narasimhan 01, Kwon 04, Hallowell 05, Babari 10] car l'ensemble de ces méthodes sont spécifiques au traitement statique et ne peuvent être transposées en conditions dynamiques alors que la scène est inconnue.

4.2.1 Matériels de mesure de la visibilité météorologique

Les matériels de mesure de la visibilité météorologique sont essentiellement de type optique. Lorsqu'il s'agit de qualifier la visibilité, ils sont alors appelés visibilimètres. D'autres matériels existent, mais ils s'intéressent plus à la transmittance de l'atmosphère pour des gammes d'ondes électromagnétiques telles que les ondes hertziennes ou les ondes radar (longueurs d'onde micrométriques). Leurs domaines d'applications respectifs sont limités à ces gammes de fréquences.

Les principaux matériels optiques utilisés pour estimer la distance de visibilité météorologique sont les transmissiomètres et les diffusiomètres. Les transmissiomètres estiment le coefficient d'extinction du brouillard à partir de l'atténuation d'un faisceau au travers d'une couche d'atmosphère d'épaisseur donnée. Ils sont constitués d'une base émettrice et d'un détecteur comme illustré sur la figure 4.6.

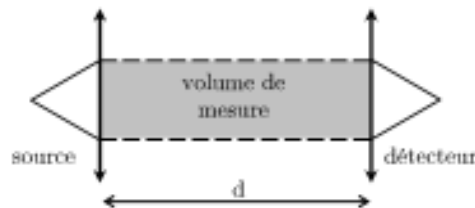


FIGURE 4.6 – Schéma de principe d'un transmissiomètre.

Ces appareils utilisent une lumière modulée qui leur permet de fonctionner de jour comme de nuit et de n'estimer que l'extinction du faisceau émis. Lors de la phase de calibrage de l'appareil (en atmosphère la plus sèche et la plus propre possible), le récepteur enregistre un flux provenant de la base émettrice Φ_0 . En présence de brouillard ou d'une source de perturbation de l'atmosphère (fumée, poussière, pluie, neige *etc.*), la base reçoit un flux incident mesuré $\Phi_m < \Phi_0$. Le coefficient d'extinction de l'atmosphère est estimé connaissant la distance émetteur-récepteur que l'on appelle la « base » par :

$$k = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{\Phi_m}{\Phi_0} \right) \quad (4.1)$$

Comme nous l'explicitons dans la section 3.4.3, cette mesure d'atténuation est l'atténuation effective pour une base donnée. Le coefficient d'extinction k du modèle d'atténuation de Beer-Lambert (modèle sous-jacent utilisé dans les transmissiomètres) ne peut être considéré comme constant dans le brouillard de nuit car le brouillard n'est pas un pur phénomène d'extinction. La diffusion avant (donc l'écart à la loi de Beer-Lambert) étant fonction de la distance, de la

densité et de la granulométrie du brouillard, on ne devrait pas extrapoler la portée lumineuse dans le brouillard de nuit. Une mesure réelle correspond à une mesure d'atténuation effective pour une base (distance) donnée. En revanche, l'intérêt de ces matériels est que la base peut être très grande (de 10 m jusqu'à plusieurs kilomètres), on peut donc obtenir une mesure moyenne valable dans une gamme de distances proches de celle de la base. Malheureusement ils sont coûteux et l'alignement des blocs optiques peut se révéler délicat.

Les diffusiomètres sont nettement moins encombrants que les transmissiomètres. Le principe consiste à illuminer un volume d'atmosphère réduit et à observer la lumière diffusée dans la direction du récepteur comme illustré sur la figure 4.7.

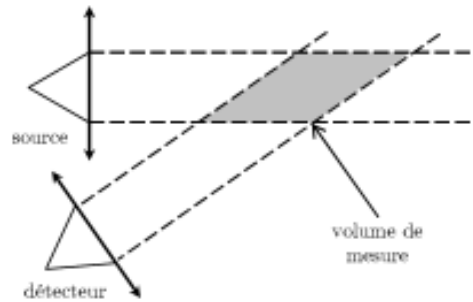


FIGURE 4.7 – Schéma de principe d'un diffusiomètre.

La quantité de lumière diffusée dans la direction du récepteur est telle que :

$$I = AI_0Vf(\theta)e^{-kd} \quad (4.2)$$

avec A une constante dépendant de la puissance et de l'optique de la source, I_0 l'intensité de la source, V le volume diffusant (intersection du faisceau d'émission et du faisceau d'analyse), $f(\theta)$ la fonction de diffusion dans la direction d'analyse qui dépend de la granulométrie, k le coefficient d'extinction et d la longueur du trajet optique entre émetteur et récepteur.

Le coefficient d'extinction est estimé tel que :

$$k = -\frac{\ln(I/A'I_0)}{d} \quad (4.3)$$

où A' est une constante dépendant de la configuration matérielle.

Cet appareil, moins encombrant qu'un transmissiomètre est en revanche plus sensible aux hétérogénéités du brouillard. De plus, comme pour le transmissiomètre même si l'origine est différente, il souffre d'un biais structurel : la fonction $f(\theta)$ dépend de la granulométrie du brouillard. Ainsi, si le processus de formation du brouillard donne un brouillard composé de gouttelettes dont la distribution de tailles de gouttes est différente de celle associée à la fonction $f(\theta)$, l'estimation de k est biaisée. Comme nous l'explicitons dans la section 3.4.3, la valeur de k ne devra pas non plus être extrapolée sur de grandes distances avec cet appareil, en particulier pour estimer la portée visuelle dans le brouillard de nuit.

La sensibilité aux hétérogénéités empêche de concevoir un diffusiomètre embarqué. D'une part, la mesure ne sera représentative que de l'endroit précis où se trouve le véhicule et non de son environnement. D'autre part, les turbulences de l'air générées par le véhicule en circulation ne feront que renforcer les hétérogénéités de la masse d'air prise en compte pour la mesure. Mais les besoins d'une caractérisation locale des conditions météorologiques sont évidents, en

particulier à cause de leur impact sur la visibilité. Le développement de méthodes fondées sur l'utilisation de caméras permettra d'embarquer un capteur sur le véhicule et d'enrichir la gamme des fonctionnalités assurées par cet outil. Nous présentons dans la suite les différents travaux orientés sur la détection et la caractérisation de brouillard par caméra.

4.2.2 Détection et caractérisation du brouillard diurne par caméra

Différentes méthodes spécifiquement dédiées à l'estimation de la visibilité en conditions embarquées existent déjà depuis quelques années. Celles-ci sont le plus souvent orientées sur la détection de brouillard de jour et en particulier sur la caractérisation de la densité de brouillard en s'appuyant sur le modèle de Koschmieder. Parmi ces méthodes, [Pomerleau 97] s'attache à estimer le contraste au niveau des marquages routiers, puis en utilisant l'hypothèse « monde plan » il estime la distance du point le plus loin appartenant à la route avec un contraste supérieur ou égal 5 %. La méthode utilisée pour calculer le contraste étant fondée sur l'utilisation d'ondelettes ou par comparaison de la variance des lignes images en fonction de leur hauteur dans l'image. Cette méthode s'appuie sur le contraste au niveau des marquages et est donc inopérante lorsque ces derniers sont masqués.

La méthode proposée dans [Mori 07] s'appuie sur une comparaison d'images à différentes distances d'un véhicule précédent. Elle nécessite que l'on ait détecté un véhicule et que ce même véhicule soit vu ultérieurement à différentes distances. La taille apparente du véhicule permet aux auteurs d'avoir une notion de distance relative au véhicule. En s'appuyant sur la loi de Koschmieder, la dégradation des contrastes en fonction de la distance permet d'estimer la distance de visibilité dans le brouillard de jour.

Dans [Hagiwara 05], un nouvel indice appelé WIPS³ (Intensité pondérée du spectre de puissance) extrait par une analyse d'images est proposé. Il est calculé en analysant les images par des filtres fréquentiels reflétant les caractéristiques du système visuel humain. Des test comparatifs entre la mesure WIPS et des évaluations subjectives humaines ont présenté une bonne corrélation. L'indice WIPS n'est en revanche pas bien corrélé aux mesures de transmissivité effectuées en parallèle. Cet indice pourrait donc être intéressant pour analyser le comportement du système visuel humain en présence de brouillard et son rapport avec la transmissivité, qui est une mesure des propriétés physiques du brouillard et non de ses effets physiologiques.

De nombreux travaux concernant la détection et la caractérisation du brouillard de jour ont été proposées par Hautière [Hautière 05, Hautière 06c, Hautière 06b, Boussard 08]. Ces méthodes peuvent être classées dans deux catégories :

Détection du plus lointain contraste supérieur à 5 %

ces méthodes consistent à calculer les contrastes en des points répartis sur toute l'image, puis en se fondant sur l'hypothèse « monde plan » (caméra monoculaire) ou en se fondant sur la disparité (système de stéréovision [Hautière 06b]) à estimer la distance du point de contraste supérieur à 5 % le plus lointain. Cette distance étant égale à la distance de visibilité mobilisée dans le brouillard de jour. Un aspect majeur souligné dans [Hautière 07a] est que ces techniques s'appuyant sur des contrastes détectables et mesurables par la caméra sont des techniques dépendantes de la scène. L'estimation est faussée si les objets de la scène ne sont pas eux mêmes contrastés par rapport à leur fond ou si les objets de contrastes suffisant sont ponctuels ou discontinus tels que c'est illustré sur la figure 4.8. L'auteur distingue les notions de distance de visibilité mobilisée et mobilisable. La distance de visibilité mobilisable étant égale à la dis-

3. Weighted Intensity of Power Spectra

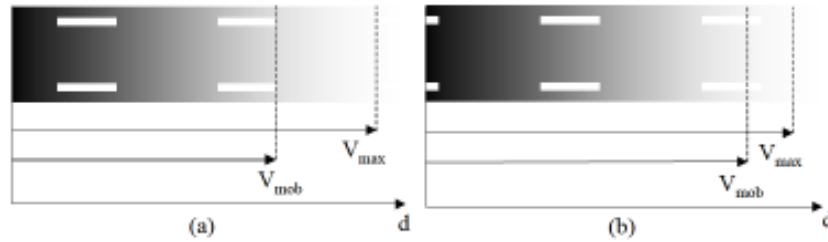


FIGURE 4.8 – Distance de visibilité mobilisable (visibilité météorologique) et distance de visibilité mobilisée.

tance de visibilité atmosphérique (limite forte) alors que la distance de visibilité mobilisée est la distance maximale au point de contraste supérieur à 5 % présent dans la scène.

Évolution d'intensité d'un matériau lambertien uni en fonction de la distance

les méthodes proposées dans [Hautière 06c] s'appuient sur la physique du brouillard et ne dépendent ni de la présence de marquage, ni de la présence d'un véhicule précédent, ni de la présence d'objets contrastés dans la scène. Un objet lambertien dans une scène de brouillard de jour a une luminance dépendant strictement de sa distance. Un objet supposé lambertien tel que le bitume voit sa luminance décroître selon la loi de Koschmieder. Cette propriété se traduit par la position d'un point remarquable de cette fonction d'intensité en fonction de la distance. La position du changement de signe de la dérivée seconde de la luminance de la route en fonction de sa distance est caractéristique de la distance de visibilité. La difficulté résidant dans la capacité à observer un objet uni sur une grande distance devant le véhicule. Ceci est réalisé par une croissance de région en partant du bas de l'image jusqu'à atteindre le ciel tout en respectant des conditions de croissance fondées sur des critères photométriques tel qu'illustré sur la figure 4.9. On obtient ainsi un calcul direct de la distance de visibilité tel que :

$$V_{met} = \frac{3\lambda}{2[v_i - v_h]} \quad (4.4)$$

avec $\lambda = h\alpha/\cos^2\theta$ qui dépend de la configuration géométrique et intrinsèque de la caméra (h , hauteur, α la focale en pixels et θ le tangage) et v_i l'indice de la ligne contenant le point d'inflexion de la dérivée seconde de l'intensité en fonction de la distance et enfin, v_h l'indice de la ligne d'horizon.

La méthode proposée par [Mori 07] est limitée à l'estimation de brouillard en conditions de suivi de véhicules, ce qui ne cadre pas avec la situation type traitée dans DIVAS : un conducteur seul. On retiendra que bien que s'appuyant sur la définition de la distance de visibilité météorologique de jour (plus lointaine distance de détection d'un objet de contraste supérieur à 5 %), les méthodes cherchant un tel objet dans la scène sont susceptibles de ne renvoyer qu'une distance de visibilité mobilisée, par définition inférieure à la distance de visibilité météorologique. La deuxième méthode qui s'appuie sur les propriétés physiques du brouillard n'est pas complètement décorrélée de la scène. Elle nécessite la présence d'un objet uni dont l'intensité tend vers celle du ciel. Un tel objet est en l'occurrence disponible dans de nombreuses scènes routières : la route. Les principales limitations de cette deuxième méthode sont les masquages de la route par d'autres véhicules ou des éléments de l'infrastructure ou la distance de visibilité géométrique de

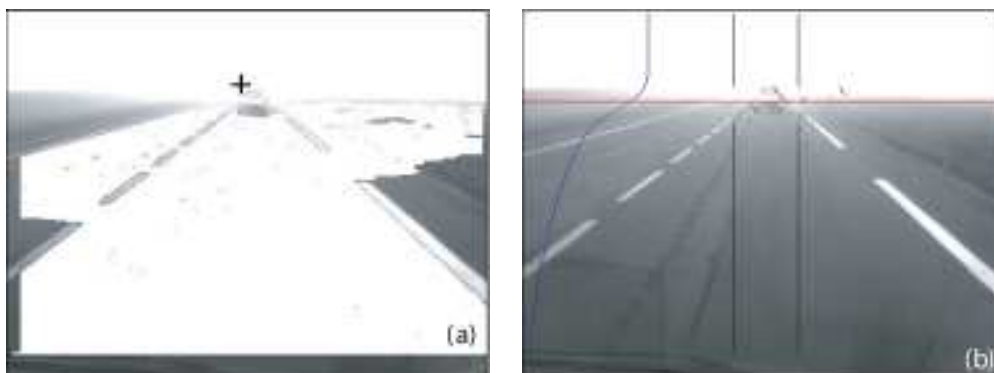


FIGURE 4.9 – Estimation de la distance de visibilité par croissance de région (a) et dérivation des paramètres d'intérêt (b).

la voie (en virage, la voie n'est plus visible après quelques dizaines de mètres, la croissance de région ne peut se poursuivre jusqu'à ce que la route se confonde avec le ciel).

Nous allons aborder dans la suite les outils et les mises en œuvre existantes concernant le brouillard de nuit. Bien que seules les conditions d'illumination changent entre le jour et la nuit, les modèles et outils utilisés pour le brouillard de jour ne sont plus tout à fait les mêmes.

4.3 Détection et caractérisation du brouillard de nuit par caméra

Dans cette section nous abordons une problématique peu traitée : la détection et la caractérisation de brouillard de nuit par caméra, et en particulier en conditions embarquées. Nous exposerons dans un premier temps les difficultés liées à l'utilisation d'une caméra de nuit en conditions embarquées. Nous aborderons ensuite les quelques travaux existant en conditions statiques et dressons le bilan des possibilités et des limites de tels algorithmes en conditions embarquées. Nous présentons les travaux existant en configuration embarquée et leurs limites vis-à-vis des besoins du projet DIVAS. Enfin, nous présentons une méthode originale de détection et caractérisation du brouillard de nuit par caméra, fondée sur deux algorithmes complémentaires. L'un fonctionnant dans les environnements éclairés tels les zones urbaines et peri-urbaines, et l'autre fonctionnant lorsque le véhicule n'est éclairé que par ses propres phares.

Concernant l'algorithme de détection de brouillard nocturne par la présence de halos autour des sources de lumière de l'environnement, nous détaillons les différentes phases de la méthode : la détection de sources de lumière potentielles, le tri des sources de lumière les plus vraisemblables, l'analyse d'une décroissance d'intensité en partant du centre des sources, l'extraction de mesures de ces profils d'intensités, la classification en brouillard/non-brouillard ou la caractérisation à partir de ces mesures.

Concernant l'algorithme de détection de brouillard nocturne par la présence d'une trace de rétrodiffusion de la lumière de ses propres phares, nous détaillons les différentes phases de la méthode : l'acquisition de données dans des brouillards réels en chambre à brouillard, la simulation d'images de référence de la scène type à l'aide d'un logiciel de simulation de brouillard, la comparaison des images de synthèse de référence avec des images issues d'une caméra et l'estimation d'un score de corrélation, la classification brouillard/non-brouillard ou la caractérisation du brouillard à partir de ces scores.

Finalement, estimant qu'il nous serait indispensable de procéder à une phase d'homogénéisation des résultats des deux algorithmes ainsi qu'à une phase de calibrage par rapport à des séquences vidéos acquises dans des brouillards réels mesurés, nous avons proposé une méthode statique de caractérisation du brouillard par caméra. Celle-ci a vocation à être utilisée sur notre site de test avant ou après une acquisition vidéo afin d'associer une mesure de densité de brouillard à la vidéo et calibrer nos algorithmes.

4.3.1 Problématiques liées aux méthodes utilisant des caméras embarquées

Une problématique spécifiquement liée à la configuration embarquée tient à l'utilisation d'une seule caméra pour des fonctions multiples. Nous utilisons des caméras classiques de définition moyenne (640x480 pixels) ayant une dynamique de 8 bits. Elles sont en général focalisées à l'infini (ou réglées sur l'hyperfocale afin de maximiser la profondeur de champ). Elles comportent également un auto-iris qui permet d'adapter automatiquement le niveau d'exposition en fonction de la luminosité moyenne de l'environnement inclus dans le champ de l'optique. Enfin elles fonctionnent à une cadence de 25 Hz pour l'acquisition d'images.

L'ensemble de ces réglages automatiques a pour but de permettre aux images d'être « correctement » exposées afin de faire fonctionner d'autres algorithmes tels que la détection d'obstacles, de piétons ou diverses conditions atmosphériques. Mais cette notion d'exposition correcte est toute relative et dépend des applications visées. Pour les applications de jour, les réglages automatiques visent à ce que la plupart des objets de la scène se situent dans une partie intermédiaire de la dynamique. De nuit, c'est la même logique qui prévaut, les objets de la scène doivent être correctement exposés alors que les sources de lumière pourront être à la saturation capteur.

Cela limite notre potentiel de maîtrise de la physique de l'image car il n'est pas possible de définir un réglage fixe *a priori* et de connaître la relation entre niveaux d'intensité numériques et luminances de la scène. Les algorithmes développés doivent être portables sur d'autres systèmes embarqués sans nécessiter un calibrage complet de la photométrie de la caméra pour chaque niveau d'exposition. Des caméras récentes, par le biais de technologie CMOS, peuvent avoir une fonction de réponse logarithmique, ou par le biais d'une fréquence d'acquisition plus élevée et d'expositions variables, peuvent à l'aide d'algorithmes de HDR (*High Dynamic Range*) offrir une image de plus grande dynamique. Bien qu'offrant plus de dynamique, la différence de luminance entre une source et son environnement est de plusieurs ordres de grandeur et les systèmes d'acquisition ne sont pas en mesure d'atteindre ces niveaux de dynamique. Des méthodes telles que celles présentées en section 4.3.2 ([Narasimhan 03a]) ne sont pas applicables si la caméra n'a pas la dynamique permettant d'acquérir des informations sur l'intensité de la source et de son environnement. Nous montrons sur un exemple tel que présenté figure 4.10 que les sources sont visibles mais l'environnement est plongé dans les plus bas niveau du capteur et dans le bruit thermique, électronique et photonique de la caméra. Par souci de réalisme et afin de faciliter l'intégration, il nous faudra composer avec des images dans lesquelles nous n'avons en général aucune information photométrique sur les sources puisque celles-ci sont saturées sur l'image.

La fréquence d'acquisition peut également poser un problème dans la mesure où le réseau électrique français est en 50 Hz. Lors d'acquisition d'images en présence de sources alimentées par le réseau électrique, si (et c'est souvent le cas) la fréquence d'acquisition de la caméra et du réseau ne sont pas exactement multiples, on obtient un effet de palpitation des sources de lumière. L'analyse du halo provenant des sources de lumière n'est alors pas possible. Nous proposons dans la suite une méthode robuste à ces défauts dus aux technologies d'acquisition et pensons que le développement de nouvelles technologies d'acquisition plus performantes ne pourra que faciliter

le traitement et l'exploitation de nos algorithmes.

4.3.2 État de l'art de la détection de brouillard nocturne par caméra

Outils de simulation de brouillard : le logiciel PROF-LCPC

Outre les moyens de mesurer des caractéristiques physiques du brouillard, le développement logiciel a fourni des moyens d'étude de ce phénomène complexe à observer en conditions de laboratoire. Ces logiciels permettent, entre autres, d'observer les effets visuels du brouillard sur une scène virtuelle, de maîtriser les paramètres du brouillard tels que la densité et la fonction de phase des particules et de placer des appareils de mesure virtuels dans cet environnement.

PROF (*Photometric Rendering of Fog*) est un logiciel libre de simulation des interactions physiques de la lumière avec son environnement [Dumont 99]. Il utilise une technique de lancer de photons fondée sur une méthode semi-Monte Carlo. L'énergie émise par les sources lumineuses qui éclairent la scène est décomposée en éléments de flux, appelés « photons ». La trajectoire de chaque photon est construite par une série de tirages aléatoires en faisant appel à des fonctions de densité de probabilité associées aux propriétés optiques des sources, des surfaces et du milieu diffusant [Briton 92]. Des capteurs disposés dans la scène recueillent le flux émis, réfléchi ou diffusé [Dutré 93].

L'intérêt principal de PROF réside dans la possibilité de prendre en compte des propriétés goniométriques tabulées pour les sources (indicatrice d'émission) et le brouillard (fonction de phase, calculée à partir de la distribution granulométrique à l'aide des équations de Mie). Il a également l'avantage de tenir compte du phénomène de diffusion multiple.

Son inconvénient majeur est le bruit inhérent aux méthodes stochastiques de simulation, et par conséquent le temps de calcul important nécessaire pour obtenir des résultats significatifs.

Comme dit précédemment, nous pouvons placer des capteurs virtuels dans l'environnement. Ces capteurs peuvent être des luminancemètres ou des caméras. En réalité, dans PROF, les caméras sont des matrices de luminancemètres, chaque « pixel » virtuel observant l'espace selon un angle solide de base carrée.

Nous n'obtenons pas en sortie du logiciel une image à proprement parler mais une distribution de luminances sous forme de matrice aussi appelée « carte de luminances ». Cette distribution de luminances est l'issue du processus de simulation de la physique du brouillard, les valeurs n'intègrent pas toute modification ayant lieu lors de l'intégration de la lumière par un capteur (FTM optique, flare du boîtier, conversion analogique numérique, traitement du signal pour application d'un gamma). Afin de pouvoir exploiter des images simulées telles que celles obtenues avec une caméra, nous appliquons sur ces distributions de luminances quelques transformations basiques simulant l'intégration par un capteur de type caméra.

L'atténuation

Principe

L'exploitation du phénomène d'atténuation des rayons, directement lié à l'extinction atmosphérique, demande d'une part de pouvoir mesurer l'intensité d'une source à une distance donnée et de connaître l'intensité de celle-ci dans une situation de référence (en général en conditions atmosphériques dégagées).

Méthodes existantes fondées sur l'utilisation de caméras

Certains travaux tels que [Narasimhan 02] permettent à l'aide de caméras fixes de retrouver la distance des sources en comparant une image prise dans des conditions inconnues à une image de référence sans brouillard (cf. figure 4.10). La différence de niveau entre les deux images est représentative de la différence de luminance après linéarisation de la réponse de la caméra. D'autres travaux de Nayar et Narasimhan complètent cette approche en proposant de restaurer la perte de contraste liée à de mauvaises conditions climatiques. La plupart de leurs travaux se fondent sur la comparaison de paires d'images en caméra fixe.

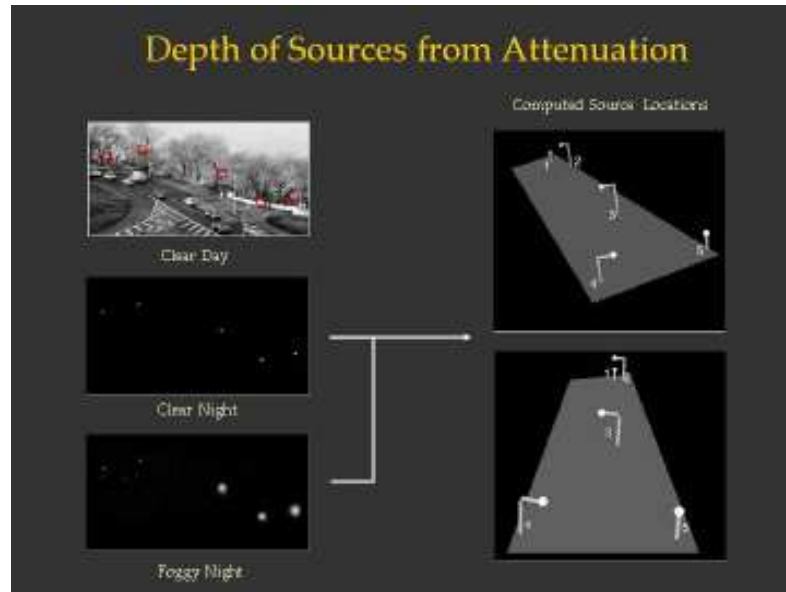


FIGURE 4.10 – Estimation de la distance relative de sources à l'aide de caméra fixe.

On peut voir sur la gauche la scène de jour et deux images de la scène de nuit. Les auteurs retrouvent les distances relatives des sources à partir de leurs intensités. Ils présentent à droite des reconstructions 3D relatives dans lesquelles les différents lampadaires sont replacés dans l'espace. Ils estiment la distance des sources en inversant l'équation de Beer-Lambert (section 3.4.3, Eq. 3.22), connaissant la luminance des sources par temps clair et le coefficient d'atténuation.

$$k = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (4.5)$$

Les auteurs négligent complètement les phénomènes de diffusion de la lumière par les gouttelettes d'eau, considérant que le milieu est absorbant. Bien que le rendu semble homogène à la scène, cette méthode fonctionne pour des sources placées sensiblement à la même distance de la caméra. De plus, elle donnera de meilleurs résultats dans des brouillards composés de petites gouttelettes car celles-ci diffusent plus la lumière que les grosses (diffusion angulaire mieux répartie, moins de diffusion avant). Le biais dû à la diffusion est donc moins important par rapport au modèle de Beer-Lambert.

L'exploitation du phénomène d'atténuation semble difficilement applicable en configuration embarquée. En effet, il nous faudrait avoir une information de référence sur l'intensité des sources et il n'est pas envisageable d'avoir à notre disposition une telle information pour les équipements d'éclairage de la voirie. De plus ces sources de lumière sont souvent perçues de points de vue différents, donc l'intensité dans une direction particulière n'a pas vocation à être comparée avec

l'intensité observée l'instant d'après depuis un autre point de vue (sauf pour les sources isotropes, mais celles-ci sont rares voire inexistantes).

Le halo lumineux

Principe

Le halo est la conséquence de la diffusion de la lumière par les gouttelettes composant le brouillard. Son étendue et la décroissance d'intensité en fonction de la distance à la source de lumière sont caractéristiques de la densité de brouillard et de la fonction de phase. L'exploitation de ce phénomène pour la détection et la caractérisation de brouillard demande d'inverser un modèle tels que ceux présentés dans le chapitre 3, section 3.4.3, équations 3.24 ou 3.25, page 104). Pour cela, la distance à la source, l'intensité de la source ainsi que son diagramme directionnel d'émission (solide photométrique) sont nécessaires.

Méthodes existantes fondées sur l'utilisation de caméras

[Narasimhan 03a] exploite les travaux de Chandrasekhar ayant mené à une description analytique du phénomène telle que décrite en section 3.4.3. La lumière émise à une distance d dans une direction θ est estimée avec l'équation de transport radiatif (RTE) présentée chapitre 3.

En utilisant une caméra fixe et des sources de référence, ils ont mis en évidence qu'un brouillard de caractéristiques physiques données (distribution de tailles de gouttes et densité volumique d'eau présente dans l'atmosphère) produisait un halo caractéristique pour une source ponctuelle à grande distance. Ils nomment « *Atmospheric Point Spread Function* » ou APSF le rayonnement d'une source au travers d'une couche d'atmosphère perturbée et observent la projection de ce rayonnement sur le plan image, c'est à dire le halo. Dans leur approche, les auteurs cherchent à déterminer l'intensité reçue par un capteur simplifié de type sténopé en observant une source ponctuelle dans le brouillard.

Dans le cas d'une source ponctuelle isotrope, si on utilise la formule de la RTE, il faut en théorie intégrer pour tout le chemin optique jusqu'au capteur et donc intégrer la RTE dans une sphère de rayon égal à la distance source capteur (capteur tangent à la surface de la sphère). Or les auteurs ne connaissent pas la distance les séparant des sources qu'ils observent. Ils simplifient le problème en considérant que les phénomènes de diffusion (diffusion de premier ordre et multidiffusion) n'ont lieu que dans une portion d'atmosphère autour de la source et que les effets du brouillard (en particulier la diffusion multiple) est négligeable au-delà d'une certaine distance (*cf.* Fig. 4.11). Puis, à l'aide de l'analyse du profil d'intensité du halo, ils caractérisent la densité du brouillard.

Les rayons qui sont issus de la sphère et atteignent le capteur sont quasi parallèles ($D \gg R$). Usuellement, la fonction $I(T, \mu)$ décrit l'intensité dans les diverses directions θ à la surface de la sphère (*cf.* Fig. 4.11(a)). Du point de vue de l'observateur, cela correspond également à l'intensité perçue de loin sur la sphère dans laquelle s'exerce la multidiffusion. Comme le montre la figure 4.11(b), les intensités perçues depuis un capteur « infiniment » loin au sens optique et provenant de points à la surface de la sphère correspondent à la fonction $I(T, \mu)$ pour des angles de sortie particuliers.

C'est une fonction identique en tout point de la surface de la sphère. En négligeant l'aspect de diffusion multiple au-delà d'une certaine distance de la sphère, il ne reste que le phénomène d'atténuation qui s'exerce dans les mêmes proportions sur l'ensemble des rayons provenant de la sphère (la différence de chemin optique étant négligeable car $R \cos(\theta_1) < R \cos(\theta_2) \ll \Omega$). L'intensité qui arrive sur le capteur est à un facteur près $I(T, \mu)$.

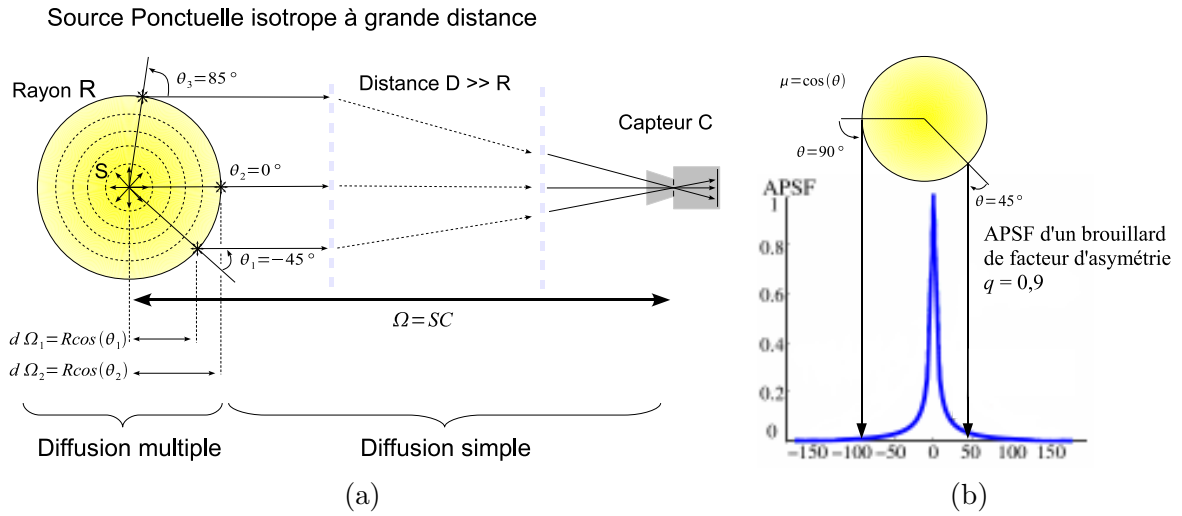


FIGURE 4.11 – (a) Aspect théorique du halo pour une source ponctuelle à grande distance, (b) APSF (*i.e.* $I(T, \mu)$) à la surface d'une sphère de rayon d reflétant l'aspect perçu du halo pour une source ponctuelle à grande distance.

On peut voir sur la figure 4.12(c) en rouge, le halo tel qu'il est perçu par une caméra haute dynamique en analysant l'intensité lumineuse à différentes distances du centre de la source ponctuelle dans le plan image. En vert, l'APSF telle que calculée en résolvant de façon numérique la RTE par des polynômes de Legendre pour une source ponctuelle isotrope au sein d'une sphère de diamètre donné. Ils comparent comme c'est illustré sur la figure 4.12 un halo observé et un halo calculé en présence de brouillard en supposant le facteur d'asymétrie tel que $q = 0,95$ et une coefficient d'extinction $k = 8.10^{-4} m^{-1}$ tel que $V_{met} = 3,6 km$.

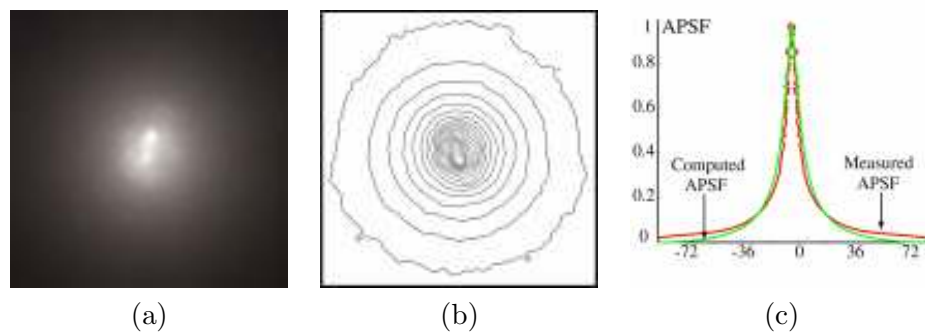


FIGURE 4.12 – (a) image d'une source dans des conditions connues, (b) Contours d'iso-intensité, (c) Décroissance d'intensité calculée à partir d'un modèle et mesurée sur l'image.

Les images sont obtenues pour des « sources isotropes à l'infini optique » telles que la distance capteur/source soit très grande devant la taille du halo. Les auteurs utilisent une caméra haute dynamique réglée afin d'observer hors saturation la source et son halo. De plus ils ne présentent pas de preuve de résolution qu'à un halo observé correspond une solution du calcul de la RTE unique (fonction de phase et densité du brouillard unique) ni la méthodologie permettant d'obtenir des paramètres d'atténuation et de fonction de phase ajustés à l'observation. Pour ces raisons, la méthode n'est pas transposable à des conditions embarquées.

D'autres travaux, tel que [Metari 07], abordent le même sujet à savoir l'estimation de la forme d'un halo par résolution numérique de la RTE. Ils utilisent des approximations par des gaussiennes et donnent les paramètres permettant de connaître la forme du halo pour des conditions physiques de brouillard données. Cette identification de paramètres propres à l'étalement de l'image des sources de lumière par le brouillard est réalisé à des fins de simulation du comportement de sources dans le brouillard (ou toute autre atmosphère perturbée), ou encore pour l'estimation des paramètres physiques décrivant le brouillard par comparaison aux courbes de référence théoriques. L'estimation de la densité de brouillard à partir de halos n'est également proposée que pour des sources ponctuelles isotropes à grande distance avec des contraintes similaires à celles de [Narasimhan 03a]. La méthode n'est pas non plus applicable en conditions embarquées.

La rétrodiffusion des phares

Principe

La trace de rétrodiffusion des feux est un halo particulier dont nous n'observons que la partie rétrodiffusée vers le conducteur sans pour autant en voir la source. Elle n'est perceptible qu'en environnement nocturne lorsque peu d'autres sources éclairent l'environnement car le niveau énergétique de cette diffusion est très faible et décroît rapidement avec la distance à la source de lumière.

Exploitations

Deux exploitations du phénomène de rétrodiffusion ont été proposées dans les brevets [Leleve 06, Kawasaki 08]. Le premier brevet consiste à segmenter le halo, trouver son centre de gravité puis ajuster une ellipsoïde au contour du halo segmenté. L'hypothèse de détection est que plus le brouillard est dense, plus la lumière est vite réfléchi, ce qui signifie que le contour du halo se rapproche d'une ellipse tel qu'illustré sur la figure 4.13(a). Au contraire, lorsque la visibilité est bonne, le halo lumineux a une forme plus diffuse, donc plus éloignée d'une ellipse. En conséquence, en fonction de la forme de la courbe elliptique obtenue, c'est-à-dire en fonction des paramètres calculés de l'ellipse, les auteurs déduisent la présence ou l'absence de brouillard. En présence de brouillard, les auteurs s'appuient sur le déplacement d'un point d'inflexion sur le profil d'intensité de la colonne image passant par le centre de l'ellipsoïde. Plus le brouillard est intense, plus ce point d'inflexion est bas dans l'image. La méthode peut donner de fausses détections en présence de brouillard et en particulier en présence d'obstacles car ces derniers tendent à faire diverger la forme segmentée de l'ellipse tel qu'illustré sur la figure 4.13(b).

La recherche d'un point d'inflexion dans le profil d'intensité le long d'une colonne de l'image fonctionne vraisemblablement en présence d'un brouillard très dense, en revanche elle est très sensible à l'environnement (présence de marquages sur la voie ou d'autres véhicules). En particulier en virage car alors, une ligne verticale de l'image correspond essentiellement à l'environnement hors route.

La méthode proposée dans [Kawasaki 08] s'appuie sur l'observation de l'évolution des niveaux d'intensité le long d'une ligne image coupant la trace de rétrodiffusion (*cf.* Fig. 4.14(a)). Les auteurs ont constaté qu'en présence de brouillard l'intensité des pixels devant les feux du véhicule étaient plus élevée que l'intensité des pixels au centre de l'image. Ils ont également observé que les intensités des pixels au centre de l'image étaient supérieures à celles du bord de l'image en absence de brouillard (*cf.* Fig. 4.14(b)).

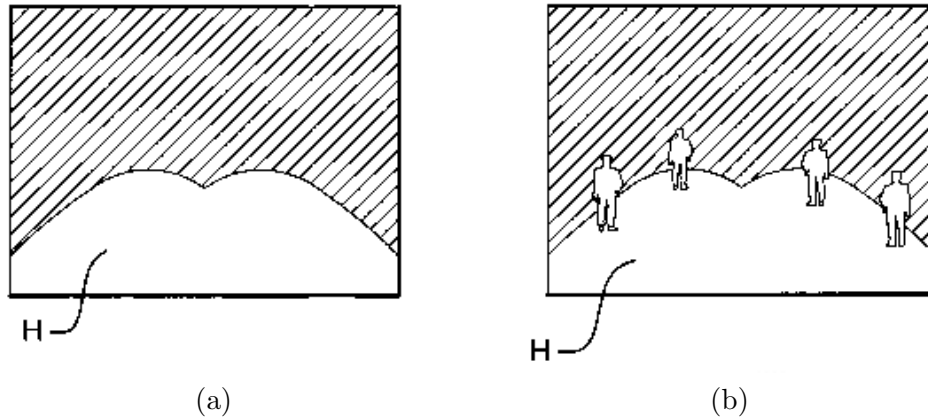


FIGURE 4.13 – Image segmentée et halo de rétrodiffusion dans le brouillard (H) en absence (a) et en présence (b) d'obstacles.

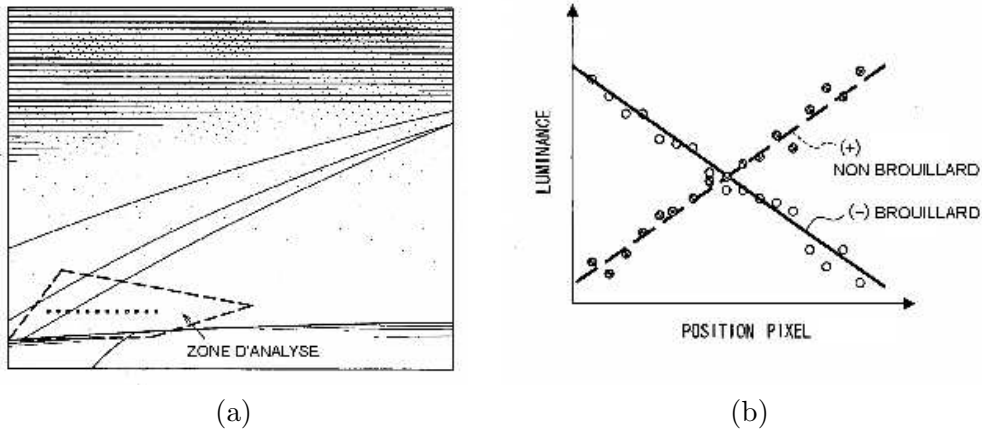


FIGURE 4.14 – Zone d'analyse (a) et profil d'intensité d'une ligne image devant les feux du véhicule (b).

L'assertion selon laquelle l'intensité décroît en absence de brouillard entre le centre et l'extérieur de l'image est surprenante. L'utilisation d'une décroissance d'intensité selon une ligne image passant devant les feux semble en revanche pertinente en présence de brouillard. Aucune méthode n'est en revanche proposée afin de caractériser la densité de brouillard.

4.3.3 Séquences vidéo de référence

Pour étudier le brouillard de nuit, nous disposons de quatre séquences acquises à l'aide de la même caméra, sur le même site en présence et en absence de brouillard. Les classes de brouillard sont différenciées par une valeur allant de 0 à 3 donnée par des observateurs par comparaison entre les vidéos. 0 caractérisant l'absence de brouillard, 3 étant le maximum de brouillard présent dans nos acquisitions. Les caractéristiques photométriques des illuminants externes sont les mêmes sur 3 des vidéos (séquences 0, 1 et 3) et diffèrent peu pour la quatrième (séquence 2).



FIGURE 4.15 – Images illustrant l’absence de brouillard et différents brouillards classés du moins au plus dense.

Cette échelle n’ayant été obtenue que par comparaison entre les diverses vidéos, elle n’est pas linéaire. En particulier, la classe 1 ne contient pas de brouillard, cependant l’humidité permet de percevoir une légère diffusion autour des source qui est juste perceptible, alors que les classes 2 et 3 contiennent des indices visuels flagrants permettant de percevoir la présence de brouillard. L’atmosphère des séquences 0 et 1 ne présente pas de contraintes particulières pour la tâche de conduite, la distance de visibilité est supposée supérieure à 400 *m*.

4.3.4 Détection de halos autour des sources lumineuses

Le brouillard se traduit visuellement par l’apparition de halos autour des sources de lumière. Ces halos sont produits par des phénomènes de diffusion simple et de diffusion multiple dans le trajet des rayons lumineux issus de la source. Les halos se forment autour des sources ont des propriétés d’étalement et de décroissance d’intensité liées aux caractéristiques du brouillard (densité de brouillard, et distribution granulométrique des gouttes du brouillard). La détection de halos semble être une caractéristique pertinente de la présence ou non de brouillard.

Du fait de la projection perspective, les sources placées à des interdistances constantes dans la scène réelle, sont projetées sur le capteur à des positions de plus en plus proches. Quelles que soient les conditions météorologiques, les sources de lumière ne sont plus discernables entre elles à partir d’une certaine distance, beaucoup plus courte en présence de brouillard. Les formes complexes saturées sont le fruit de la projection sur le capteur de plusieurs sources à des distances différentes. Ces sources produisent des halos différents en taille ainsi qu’en décroissance

d'intensité qui sont fusionnés dans l'image en une seule région saturée. Nous ne traitons pas les formes segmentées qui sont le résultat d'amalgames de halos de sources de lumière à différentes distances. Dans un premier temps, nous identifions des zones très lumineuses de l'image provenant de sources de lumière isolées.

Nous présentons dans la suite la première partie de l'approche que nous avons menée concernant la détection de brouillard par les halos. Avant de travailler sur les caractéristiques des halos afin d'affirmer ou d'infirmer la présence de brouillard, nous devons dans un premier temps détecter les sources lumineuses de l'environnement. Nous présentons notre méthodologie de traitement des images permettant de détecter les sources lumineuses de l'environnement et d'extraire un profil d'intensité radial partant du centre des sources suivant une direction quelconque en absence de brouillard et suivant la direction de diffusion de la lumière en présence de halos.

Recherche de sources lumineuses

Afin de voir si les sources présentent des halos, il nous faut dans un premier temps les distinguer de leur environnement. Cette recherche est effectuée par une segmentation en régions selon un critère d'intensité, en seuillant l'image de façon à binariser un certain pourcentage de l'image. En effet, en fonction de l'intensité des sources présentes, des conditions atmosphériques et des réglages de la caméra, la saturation du capteur par les sources externes n'est pas toujours atteinte. Nous seuillons l'image afin qu'au moins 3 % à 5 % de l'image soit segmentée.

La figure 4.16 illustre la présence de halos autour des différents types de sources que nous sommes susceptibles de rencontrer sur route et tels que perçus par nos caméras embarquées.

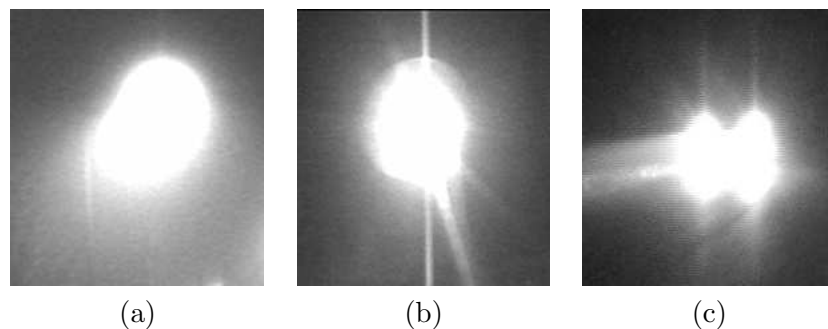


FIGURE 4.16 – Images de halos : (a) source dirigée (lampadaire), (b) source « isotrope » (lampadaire boule) et (c) feux de croisement.

On traite l'image binarisée à l'aide d'un algorithme de détection de composantes connexes (*floodfill*). À partir d'un pixel initial (germe ou *seed*), l'ensemble des pixels connexes ayant le même niveau est sélectionné (*c.f.* Fig. 4.17). Lors de cette phase de remplissage, nous recueillons certaines propriétés des composantes connexes appelées par la suite « sources potentielles » : la surface, le périmètre, la compacité, le centre de gravité et l'élongation du rectangle englobant dont les côtés sont parallèles aux bords de l'image. Nous ne cherchons pas à estimer des caractéristiques de forme complexes comme dans [Petit 05, Roussillon 06] car nous n'avons pas d'hypothèses sur les formes attendues (symétrie, inertie, *etc.*). De plus, nous n'utilisons pas ces propriétés pour caractériser les formes, mais nous les utilisons comme des classificateurs faibles afin de filtrer un grand nombre de faux positifs sans pour autant filtrer les vraies sources de lumière.

$$\text{Compacité} = \frac{\text{périmètre}^2}{4\pi \cdot \text{Surface}} \quad \text{Élongation} = \frac{\max(\text{Hauteur}, \text{Largeur})}{\min(\text{Hauteur}, \text{Largeur})} \quad (4.6)$$

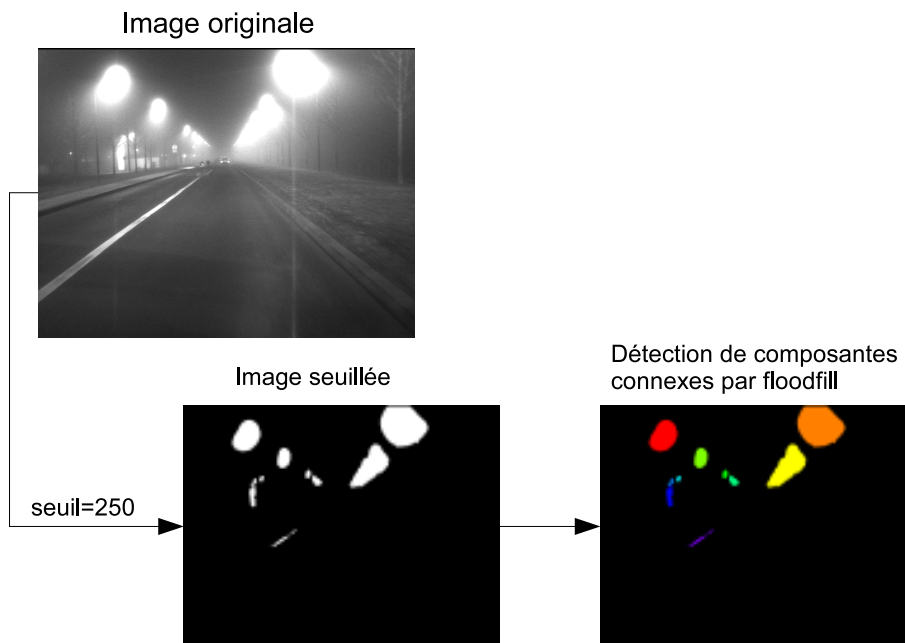


FIGURE 4.17 – Détection de sources potentielles par un seuillage haut.

La compacité est supérieure ou égale à 1 (pour le cercle). L'élongation est supérieure ou égale à 1 (pour un objet contenu dans un carré englobant). Plus un objet a une grande mesure de compacité, moins il est compact, plus un objet a une grande élongation plus il est étiré. Ceci, à l'approximation près que l'élongation est mesurée sur le rectangle englobant droit (bords parallèles aux bords de l'image) et non le plus petit rectangle englobant au sens strict (pour des raisons de coût calculatoire), une forme étirée en diagonale peut donc avoir une élongation proche de 1.

Une fois les sources potentielles segmentées en régions, nous ne conservons que les régions répondant à des critères simples et légers en coût calculatoires sur lesquels nous ne sommes pas très sélectifs mais éliminons les éléments particulièrement hors normes. Les sources d'intérêt que nous cherchons ne doivent pas avoir des formes trop alambiquées (utilisation des critères de compacité et de circularité) ou des surfaces trop importantes. Nous savons que la plupart des sources de l'environnement ne sont pas des sources isotropes, nous ne pouvons nous attendre à ce que les halos soient circulaires et ne pouvons pas être trop sélectifs lors de ce premier filtrage pour ne pas supprimer de sources réelles. En revanche, les sources de lumière de l'environnement sont en général des formes convexes sans trous. Ces critères simples peu sélectifs permettent d'éliminer des objets aux formes complexes ou des sources agglomérées.

Segmentation des régions d'intérêt de l'image

Le halo étant dû à une diffusion de la lumière de la source, il est par nature connexe à la source qui le produit et moins intense que celle-ci. En abaissant le seuil de binarisation, les composantes connexes vont contenir en plus des sources une partie des halos.

Pour chaque source potentielle précédemment détectée nous cherchons à voir si la région croît lorsque le seuil de binarisation baisse. Nous procédons comme suit et comme l'illustre la figure 4.18 :

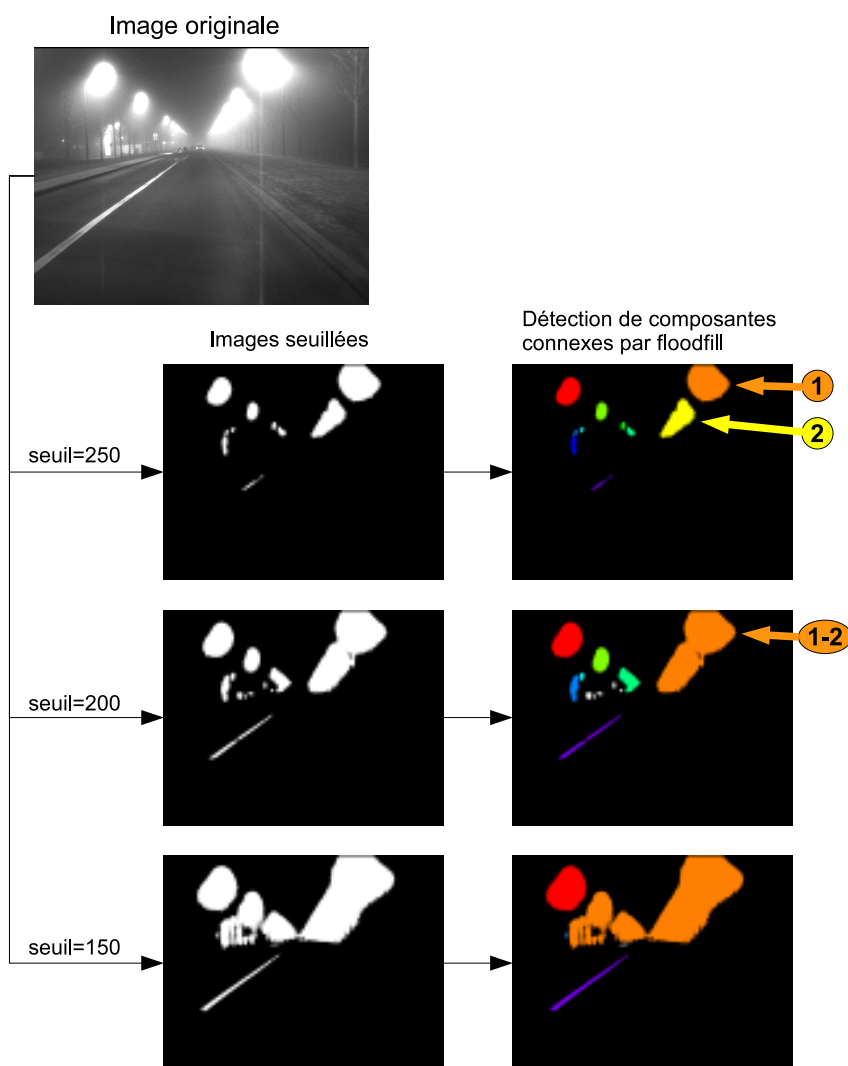


FIGURE 4.18 – Schéma de principe d'un seuillage hiérarchique descendant avec floodfill.

1. diminution du seuil,
2. en utilisant les sources potentielles comme germes nous recherchons les composantes connexes,
3. nous récupérons à chaque seuil des régions englobant les sources potentielles et les caractéristiques des formes.

La conséquence d'un tel traitement est que l'on récupère à chaque seuil des régions englobant les régions du premier niveau de seuillage. On n'ajoute pas de régions indépendantes qui pourraient apparaître à des niveaux quelconques, seules les sources potentielles identifiées durant la première phase de segmentation sont utilisées comme germes. On remarquera dans la figure 4.18 que les régions blanches apparaissant au seuil 200 dans l'image des composantes connexes sont des régions qui n'ont pas été traitées par analyse en composante connexes car aucun germe provenant d'un niveau supérieur n'a été initialisé dans ces zones. Elles ne sont pas ajoutées à la liste des régions d'intérêt.

De plus cette méthode nous permet de vérifier aisément si les halos de deux sources ont fusionné. Si deux composantes connexes sont identiques après initialisation par deux germes provenant de sources potentielles différentes, c'est que les deux régions ont fusionné. C'est le cas dans la figure 4.18, au niveau de seuillage 200, la région 1-2 (orange, en haut à droite de l'image) est rattachée à la fois à la source potentielle 1 et à la source potentielle 2 au niveau de seuil 250. On saura alors que les régions 1 (orange) et 2 (jaune) ont fusionné. De même aux niveaux de seuillage inférieurs, les fusions auront toujours lieu pour ces régions et nous continuerons de baisser le seuil jusqu'à ce que l'ensemble des régions aient fusionné.

Distinction source / objet

A l'issue de ce traitement, nous pouvons représenter l'ensemble des régions segmentées sous forme d'un arbre où N représente le premier niveau de seuillage et δ est le pas de seuillage (*c.f.* Fig. 4.19).

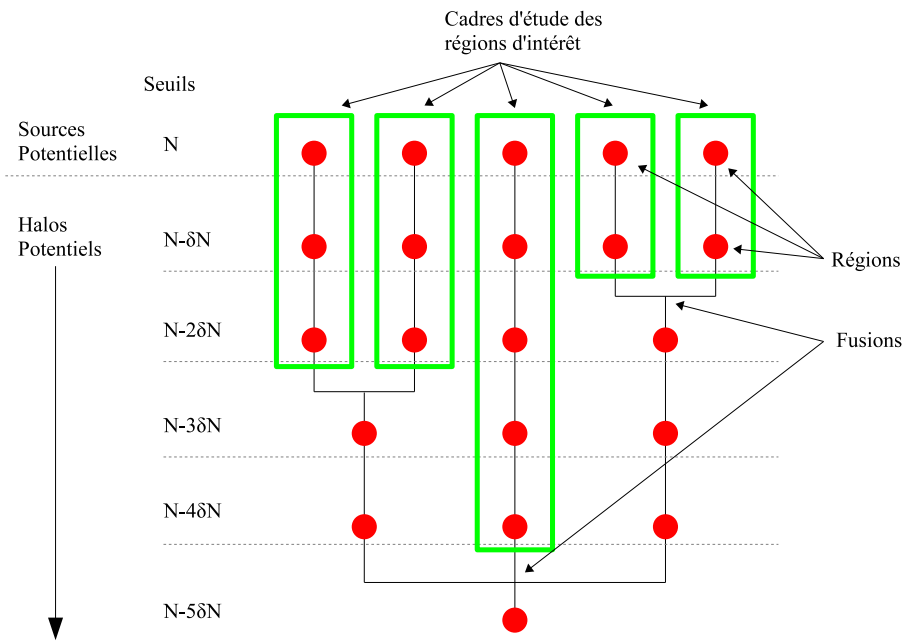


FIGURE 4.19 – Arbre des régions segmentées.

Nous avons alors un arbre des régions en fonction du niveau de seuillage de l'image. Chaque feuille représente une source potentielle (segmentée lors du premier seuillage). Les branches rattachées aux feuilles représentent les régions indépendantes depuis le premier seuil. Les nœuds représentent les fusions de régions. Si on baisse le seuil jusqu'au niveau minimum de l'image, on finit nécessairement par récupérer la totalité de l'image, soit une seule région. En l'occurrence, nous arrêtons la boucle de recherche des régions dès que toutes les branches ont fusionné.

Hypothèses

Nous formulons diverses hypothèses sur le comportement des sources de lumière et leurs caractéristiques associées afin d'en tirer des outils nous permettant de distinguer sources et objets parmi les branches.

Si ces régions sont des sources de lumière :

- en absence de brouillard, les sources ne développent pas de halo, elles ne croissent pas et leurs régions correspondantes ne grossissent pas et ne fusionnent pas. En outre, étant très différenciées de leur environnement par leur niveau d'intensité, elles restent distinctes de leur environnement sur une grande plage de seuils.
- en présence de brouillard, la présence du halo est caractérisée par un accroissement de surface des régions.
- le développement du halo peut être isotrope ou suivre une direction particulière qui est liée à l'orientation de la source.

Les branches de l'arbre les plus longues correspondent aux sources les plus isolées, c'est-à-dire celles qui fusionnent le plus tard avec leur environnement ou une autre source. Elles peuvent néanmoins correspondre à des objets très lumineux tels que des équipements rétro-réfléchissants de la route. Pour ces objets, qu'on soit en présence ou en absence de brouillard, il n'y a pas formation de halo. Leur développement surfacique en fonction du seuil est quasi nul si la forme n'est pas agglomérée avec un autre objet lumineux. Si un autre objet lumineux est à proximité, il y aura agglomération des deux formes à partir d'un certain seuil.

Caractéristiques utiles à la distinction source / objet

Pour distinguer les situations correspondant aux hypothèses précédemment émises, nous proposons d'utiliser des informations liées au centre de gravité des régions et à leur surface.

- Dans le cas d'une région sans accroissement, le centre de gravité est stable et la surface aussi (source sans brouillard, objets rétro-réfléchissants ou reflets spéculaires isolés).
- Dans le cas d'une région avec un accroissement isotrope, le centre de gravité est stable et la surface croît (halo de source isotrope).
- Dans le cas d'un accroissement selon une direction particulière, le centre de gravité suit cette direction et la surface croît continûment (halo de source directionnelle).
- Dans le cas d'un accroissement erratique, le centre de gravité est déplacé au gré des agglomérations (sans direction privilégiée *a priori*) et la surface croît de façon non continue (objet quelconque non isolé).

A priori, la situation « pas d'accroissement, centre de gravité stable » ne discrimine pas les sources de lumière en absence de brouillard et les objets quelconques. Mais cette distinction est en partie faite au travers du choix d'un seuil initial de binarisation élevé ainsi que le fait de ne pas rajouter de régions à des niveaux de seuil intermédiaires. Seuls les objets rétro-réfléchissants ne sont pas distingués des sources selon ces critères.

Méthodologie de traitement des régions segmentées

Nous allons procéder à l'étude de chacune des régions ou sources potentielles de manière indépendante. Nous ne traitons que les branches, c'est-à-dire les régions indépendantes et nous n'étudions pas les régions issues de plusieurs germes, c'est-à-dire après fusion de régions d'un niveau antérieur.

De manière générale, ce ne sont pas les dernières étapes de seuillage (du point de vue de l'évolution du centre de gravité ou de la surface) qui nous en apprennent le plus sur nos sources potentielles, mais bien les premières étapes. Dans la suite, nous ne traitons les branches que sur 80 % de leur longueur entre le premier niveau de segmentation et sa fusion avec une autre branche. Nous considérons que les informations d'intensité obtenues à des niveaux de seuillage

où la région est aux limites de distinction avec son environnement ne sont pas fiables ni représentatives du halo.

Nous filtrons également les régions pour lesquelles l'accroissement de surface est très important entre deux seuils (supérieur à 5 fois). De tels accroissements sont produits par l'agglomération de deux objets entre eux ou de sources entre elles. Quoiqu'il en soit nous ne souhaitons pas les traiter comme des sources indépendantes. On peut voir sur la figure 4.20 les régions éliminées et la zone d'étude des branches conservées.

Pour filtrer selon un critère de déplacement du centre de gravité, nous faisons pour chaque niveau de seuil d'une branche à partir du troisième stade de segmentation (minimum pour estimer un résidu) une régression linéaire sur les centres de gravité aux différents seuils et observons le résidu.

Trois situations peuvent se présenter :

- le déplacement du centre de gravité est quasi nul, la régression linéaire donne des droites dont la direction n'est pas constante, mais le résidu reste faible car tous les centres de gravité sont proches de la droite, le coefficient de détermination R^2 tend vers 1.
- le déplacement du centre de gravité suit une direction particulière, à chaque niveau d'historique nous refaisons une régression, tant que le coefficient de détermination ne descend pas sous un certain seuil, nous conservons l'historique de la source jusqu'à ce seuil.
- le déplacement du centre de gravité évolue par à-coup, nous ne traitons pas cette région.

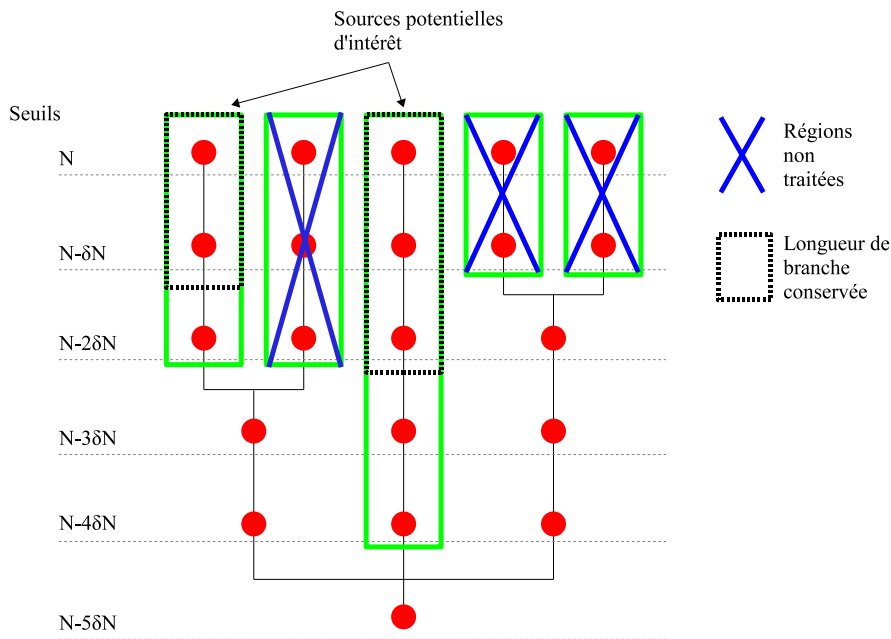


FIGURE 4.20 – Arbre des régions d'intérêt après filtrage en fonction du déplacement du centre de gravité.

Nous avons désormais à ce stade des régions d'intérêt segmentées sur une plus ou moins grande plage de seuils. Les régions conservées sont issues d'un seul germe, donc d'une seule source de lumière potentielle. Nous avons également calculé la régression linéaire sur le déplacement du centre de gravité de chaque région en fonction du niveau de seuillage. Nous exploitons ces deux informations pour étudier l'évolution de l'intensité dans l'image selon la direction de déplacement du centre de gravité.

Exploitation des régions segmentées pour la détection de halos

Le principal aspect compliquant la tâche d'identification de halos est lié à la géométrie des sources. Une source de lumière ponctuelle émet de façon isotrope dans tout son environnement. Le halo est présent tout autour de la source et présente une symétrie sphérique autour de la source. Pour un lampadaire ou des phares, dont la fonction est d'éclairer dans une direction précise, le halo se développe dans la direction d'émission de la lumière. On notera sur l'image en conditions de brouillard dense, figure 4.15 page 134, que la géométrie des sources influence la direction de développement des halos.

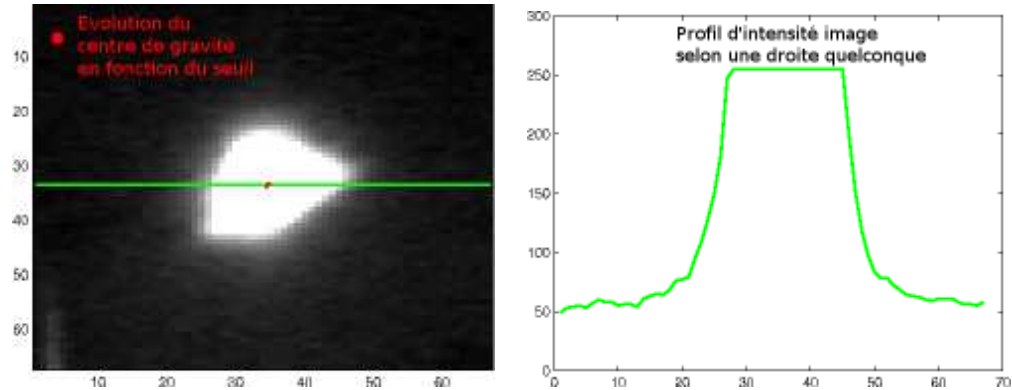


FIGURE 4.21 – Évolution du centre de gravité d'une image de lampadaire en conditions atmosphériques dégagées et profil d'intensité selon une droite quelconque.

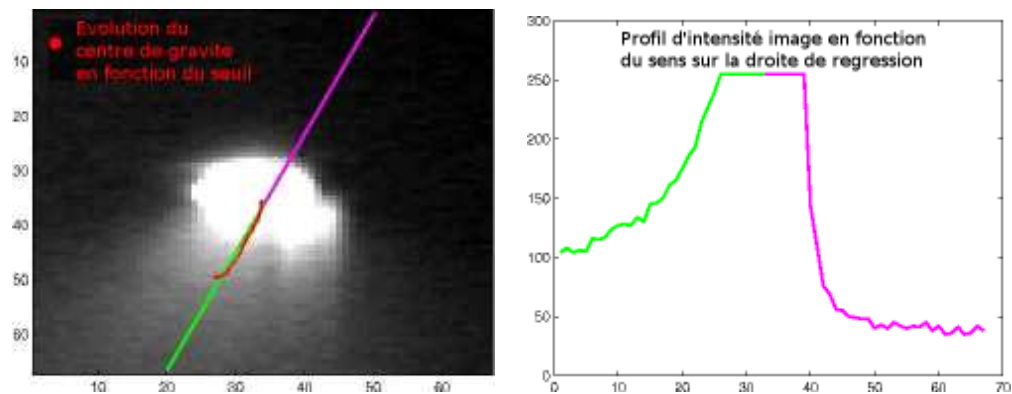


FIGURE 4.22 – Évolution du centre de gravité d'une image de lampadaire en présence brouillard. Droite de régression (en vert et magenta) et profil d'intensité associé en fonction du sens de parcours de la droite à partir du centre de la région.

Nous pouvons voir dans les exemples des figures 4.21 et 4.22 un lampadaire dans deux conditions atmosphériques différentes extrait de nos séquences. Sur la figure 4.21, en l'absence de brouillard, il n'y a pas de halo. Le centre de gravité est très stable (90 centres de gravité sont représentés en rouge sur la figure 4.21, ils sont quasiment superposés). La régression linéaire peut renvoyer une droite quelconque, le résidu est toujours faible et le coefficient de détermination très bon. La décroissance de luminosité est sensiblement la même quelle que soit la direction d'observation en partant du centre de la source. Sur la courbe de décroissance d'intensité, seule la largeur du signal à la saturation du capteur dépend de la forme géométrique du réflecteur.

En revanche sur la figure 4.22, on voit que le choix du sens d'observation a un impact majeur sur la décroissance d'intensité selon la direction obtenue par régression linéaire sur les centres de gravité calculés à chaque niveau de seuillage. Selon le sens magenta (Nord-Est) on peut voir une décroissance similaire à une source sans brouillard, tandis que selon le sens vert (Sud-Ouest), la décroissance est beaucoup plus douce, la décroissance directionnelle d'intensité correspond au halo. Sur le profil d'intensité radial, la largeur du signal à la saturation du capteur peut dépendre du sens d'observation. Cette région saturée du capteur croît en présence de brouillard dans la direction d'émission.

Comme nous venons de le voir au travers des figures 4.21 et 4.22, même en présence de brouillard, il n'est pas aisé de détecter la présence d'un halo dans l'environnement d'une source. L'utilisation du centre de gravité nous permet de traiter la situation des sources directionnelles tandis que pour des sources isotropes dans le brouillard ou des sources sans brouillard, l'observation d'une direction quelconque est suffisante. Nous présentons dans la suite comment nous exploitons ce profil d'intensité radial pour la détection de brouillard. Nous présentons les caractéristiques extraites du signal qu'est le profil d'intensité radial et nous appliquons une méthodologie de sélection des meilleures caractéristiques utiles à notre problématique. Enfin, nous présentons nos résultats de détection de brouillard à partir de la caractéristique sélectionnée.

4.3.5 Détection embarquée du brouillard nocturne par les halos

Dans cette section nous allons décrire les caractéristiques extraites des profils d'intensité des régions segmentées dans la section 4.3.4. Ces régions sont supposées contenir des sources de lumière et leurs halos lorsqu'elles sont plongées dans le brouillard. Nous disposons après une phase de détection des halos telle que présentée précédemment d'environ 25000 formes segmentées (25000 branches) dans 2130 images. Nous exposerons la méthodologie de sélection des caractéristiques les plus utiles à notre problème de détection de brouillard. Nous cherchons les variables qui permettent le mieux de prédire la présence ou l'absence de brouillard. Nous avons procédé selon une méthodologie de sélection des variables pertinentes telle que proposée par [Guyon 03].

Dans la suite, nous proposons dans un premier temps de détecter le brouillard en s'appuyant sur une caractéristique extraite du profil d'intensité des halos. Nous étudions sur des images de synthèse dans un premier temps le potentiel de cette caractéristique pour détecter le brouillard. Nous montrons qu'il est nécessaire de s'appuyer sur d'autres caractéristiques, nous proposons alors d'extraire de multiples caractéristiques du profil d'intensité. Nous étudions d'abord le pouvoir de classification des variables sélectionnées une à une. Puis nous observons quel peut être l'apport d'une seconde variable dans le problème de classification. Enfin, nous quantifions quel est l'apport d'une pondération des mesures effectuées sur différentes sources au sein d'une image. Finalement, nous observons quel est l'effet d'une pondération des différentes mesures provenant des différentes sources rencontrées sur plusieurs images consécutives.

Nous pouvons extraire désormais une décroissance d'intensité des sources lumineuses en fonction de la distance au centre de la source. Comme l'illustre le profil d'intensité radial de la figure 4.22, la nuance entre halo et absence de halo se traduit par plusieurs aspects :

- la décroissance d'intensité est beaucoup plus rapide en absence de brouillard
- le niveau minimum d'intensité est plus élevé en présence de brouillard

Nous tirons de ces observations un critère nous permettant d'affirmer ou d'infirmer la présence de halos. Ce critère s'appuie sur la pente de la décroissance d'intensité hors de la zone de saturation de la région considérée (illustré par la figure 4.23).

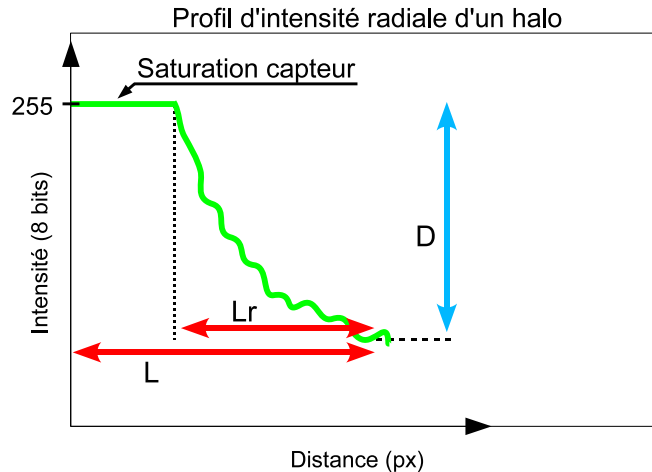


FIGURE 4.23 – Décroissance d'intensité du halo et critère de détection.

Nous fixons un seuil sur la quantité $B = D/L$ afin de confirmer la présence d'un halo. Comme nous pouvons le voir sur la figure 4.21, même en absence de brouillard, cette quantité $B = D/L$ n'est pas nulle. Un Dirac de lumière (source ponctuelle dirigée, $B \rightarrow \infty$) convolué par la fonction de transfert de modulation d'un objectif produit une tâche d'Airy (sinus cardinal, $B \in \mathbb{R}^+ \setminus \{\infty\}$). Cela est dû au fait que la fonction de transfert optique de la caméra n'est pas parfaite et se comporte comme un filtre passe-bas. S'ajoute à ce phénomène le fait qu'il n'y aura jamais de vraie source ponctuelle ou fonction créneau observable car on observe jamais de vraies sources ponctuelles et on aura toujours un phénomène de diffraction près des bords francs et souvent une certaine dispersion atmosphérique due à l'humidité dans l'air, même par temps clair. Enfin, la présence du pare-brise, propre ou sale, introduira aussi une certaine quantité de dégradation dans le signal.

Nous devons donc choisir un seuil sur B tel qu'il soit discriminant pour des profils d'intensité en présence de brouillard et en absence de brouillard.

Validation du critère de détection avec des images de synthèse

Quelles que soient les conditions de visibilité, l'atmosphère diffuse les rayons lumineux. Lorsqu'il n'y a pas d'eau condensée, ce sont les particules en suspension dans l'air et les molécules le composant qui dispersent la lumière. Il nous faut donc décider d'un niveau minimum de dispersion atmosphérique que nous souhaitons et pouvons être en mesure de détecter.

Nous avons donc simulé à l'aide du logiciel PROF des sources de lumière dans des conditions atmosphériques variables allant de 100 m à 500 m de distance de visibilité météorologique afin d'observer le halo produit et l'évolution d'un critère tel que $B = D/L$ en fonction de ces conditions.

Les images de synthèse ont été générées en simulant au mieux une intégration de la lumière par le capteur telle qu'observée pour des caméras linéaires Sony embarquées dans nos véhicules (cf. Fig. 4.15). Ces caméras ont une intégration linéaire et effectuent une conversion des luminances perçues en valeurs numériques par le convertisseur analogique-numérique (CAN) à l'aide d'une loi gamma. Nous avons généré des simulation PROF en lançant 1 milliard de photons pour obtenir des images 320×200 px). Nous avons procédé à cette simulation à l'aide d'une source ponctuelle sans réflecteur afin d'observer le phénomène de halo dans une situation simple

(source ponctuelle, symétrie sphérique). Nous avons utilisé une seule fonction de phase équivalente, calculée par les équations de Mie à partir de mesures de granulométrie effectuées dans un brouillard d'advection.

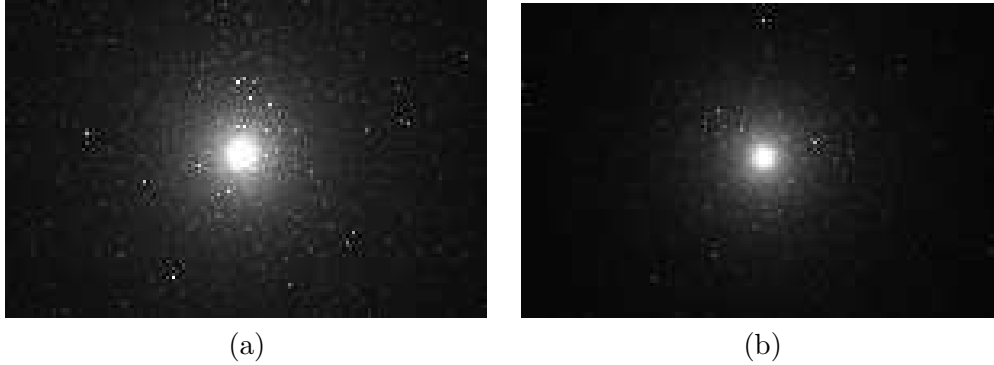


FIGURE 4.24 – Source ponctuelle simulée à 50 m dans des brouillards avec 100 m (a) et 500 m (b) de visibilité.

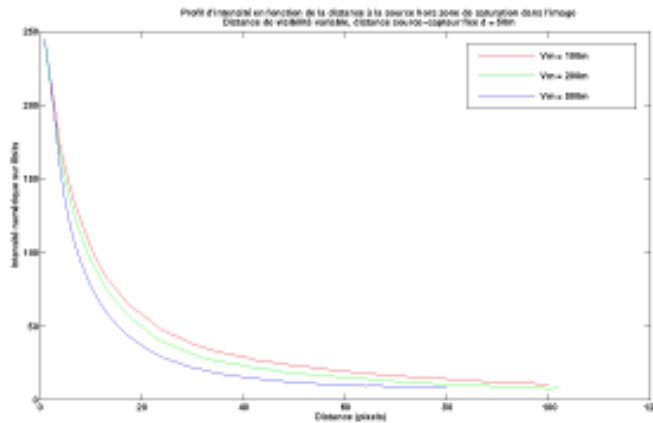


FIGURE 4.25 – Profils d'intensité dans l'image en fonction de la distance de visibilité météorologique pour une distance source-captteur donnée de 50 m.

Nous observons sur la figure 4.24 deux images de halos pour une distance donnée faible (50 m) et deux densités de brouillard différentes. À échelle métrique égale (la source est à distance fixe), le halo autour de la source est plus important lorsque la visibilité est plus faible (densité de brouillard plus importante). Les profils d'intensité de ces halos sont illustrés sur la figure 4.25. On observe bien que le halo est plus étendu et la décroissance d'intensité plus douce lorsque la densité de brouillard est supérieure (courbe rouge $V_{met} = 100 m$, $k = 3.10^{-2} m^{-1}$).

On pourra également, grâce à PROF, observer les halos en comparant à distance variable cette même source plongée dans deux brouillards de densités données (cf. Fig. 4.26 et Fig. 4.27).

Dans la situation présentée sur les figures 4.26 et 4.27, la comparaison directe des profils d'intensité mesurés n'a pas tout à fait le même sens que dans le cas de la source à distance fixe. Ici, le brouillard étant de densité fixe, les phénomènes d'interactions entre la lumière et l'atmosphère à proximité de la source sont les mêmes. Dans cette situation en particulier, la densité de

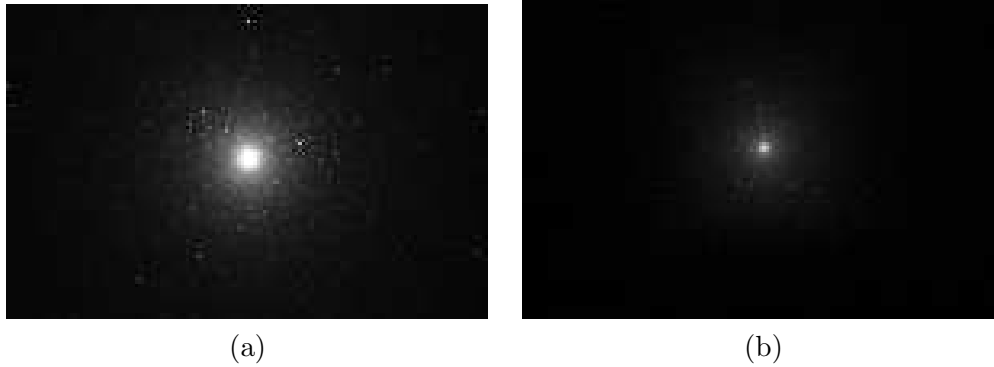


FIGURE 4.26 – Source ponctuelle simulée à 50 m (a) et à 150 m (b) dans un brouillard avec 500 m de visibilité.

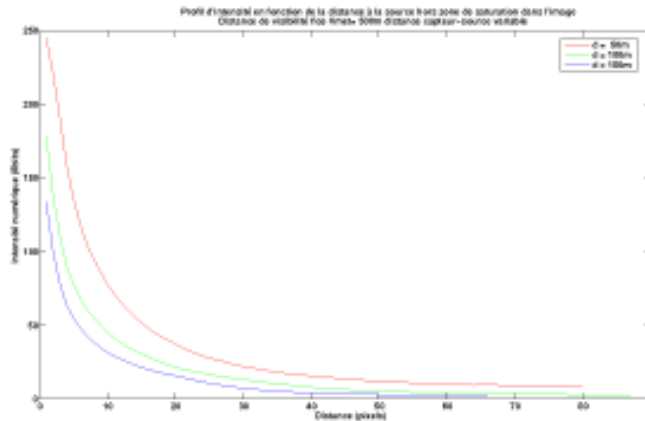


FIGURE 4.27 – Profils d'intensité dans l'image en fonction de la distance source-capteur pour une distance de visibilité météorologique donnée de 500 m .

brouillard étant faible, on pourrait adopter la même approximation que [Narasimhan 03a] (*cf.* Fig. 4.11) considérant que la multidiffusion a lieu dans un volume donné autour de la source. On devrait alors considérer ces courbes comme des halos identiques autour de chaque source qui sont ensuite diffusés simplement (atténués) sur le trajet qui sépare la sphère de multidiffusion du capteur.

Lors de la comparaison de ces courbes, il faudra également considérer l'aspect de projection perspective sur le capteur (un objet plus loin projette une image plus petite), et donc observer que les distances en pixels mesurés dans l'image ne correspondent pas à des distances métriques identiques autour de la source.

L'intégration de ces divers phénomènes (diffusion simple et multiple, projection perspective) nous a permis d'observer des comportements inattendus. En particulier l'évolution du halo en fonction de la densité n'est pas la même selon que l'on observe une source proche ou éloignée du capteur. Alors que sur les figures 4.24 et 4.25 on pouvait voir un halo plus étalé pour une densité de brouillard plus grande, on aura l'exemple *a contrario* lors de l'observation d'une source à 150 m comme illustré sur la figure 4.28. Pour cette source placée à 150 m dans des brouillards de densité variable, plus la densité de brouillard est grande moins le halo est étalé.

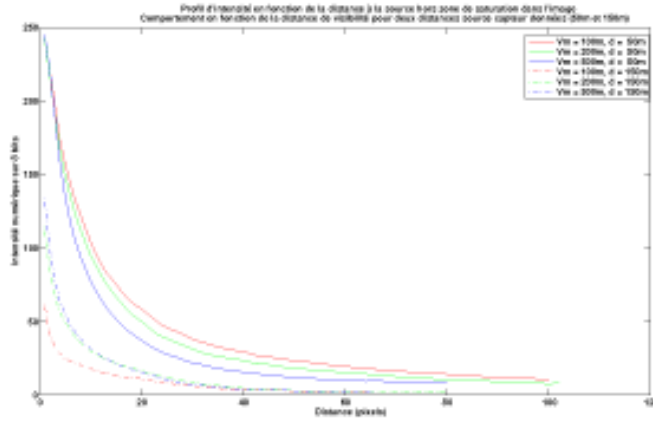


FIGURE 4.28 – Profils d’intensité des halos pour une source placée à 50 m puis à 150 m dans des conditions de visibilité variables.

Il apparaît que lorsque la source est loin du capteur (source à 150 m en pointillés sur la figure 4.28) on observe un halo plus petit pour une densité de brouillard plus grande. Dans un repère centré sur la source, plus la densité de brouillard est élevée, plus le halo est important dans une sphère de rayon donné autour de la source. Mais pour une source à 150 m, le trajet lumineux étant plus long que pour une source à 50 m, l’atténuation devient prépondérante par rapport à l’aspect d’étalement du halo.

La largeur L à la base du halo ne peut donc raisonnablement être calculée en prenant la distance maximale d’observation du halo au plus bas seuil car cette distance est trop variable. Elle est directement liée au niveau de fusion entre la branche de la source potentielle et son environnement. Bien sûr cela n’est pas un problème dans PROF si nous ne simulons pas d’environnement, mais c’est une limite dans les images réelles.

Nous avons calculé une caractéristique d’après le profil d’intensité radial, cette mesure est similaire à $B = D/L$ mais la mesure du rapport hauteur/largeur est pris à mi-hauteur de la dynamique du halo. La mesure B_{50} est calculée en prenant la largeur du signal à mi-hauteur L_{50} pour un point à 50% de la hauteur D du profil de telle sorte que :

$$B_{50} = \frac{0,5D}{L_{50}} \quad (4.7)$$

Nous avons calculé cette caractéristique B_{50} de la décroissance d’intensité radiale pour des sources à 50 m, 100 m et 150 m dans des brouillards de visibilité météorologique $V_{met} = 100 m$, $V_{met} = 200 m$ et $V_{met} = 500 m$ (resp. $k = 0.03 m^{-1}$, $k = 0.015 m^{-1}$ et $k = 0.006 m^{-1}$). Les résultats de la mesure sont données dans le tableau 4.29.

	50 m	100 m	150 m
$V_{met} = 100 m$	14,8	65,1	64,3
$V_{met} = 200 m$	16,8	32,2	64,1
$V_{met} = 500 m$	18,8	43,0	64,2

FIGURE 4.29 – Résultats de la mesure de la caractéristique B_{50} pour une source ponctuelle à différentes distances dans différentes densités de brouillard.

On peut voir que la mesure B_{50} n'est pas discriminante pour les sources à 150 m quelles que soient les densités de brouillard. De même pour la source à 100 m en brouillard dense ($V_{met} = 100 m$). Cela est dû, entre autres, à la largeur du halo à mi-hauteur, la distance étant faible et mesurée en pixels, les halos ne font que quelques pixels de large et les mesures sont quasi identiques. Cela se produit lorsque la source est petite (lointaine) ou très atténuée.

Sans connaissance des sources et de leur distance, une mesure telle que B_{50} sur une image n'est pas suffisante pour affirmer ou infirmer la présence d'un brouillard de moins de 500 m de visibilité. Nous ne pouvons pas utiliser cette caractéristique extraite du profil d'intensité radial en l'état. Nous souhaitons nous appuyer sur des caractéristiques extraites de la décroissance d'intensité caractéristique du halo. Dans la suite, nous extrayons d'autres caractéristiques de ce signal et proposons de sélectionner la caractéristique nous permettant le mieux de détecter et caractériser le brouillard.

Nous avons vu à l'aide de PROF qu'une seule caractéristique extraite d'une seule source n'était pas suffisante pour la tâche de détection de brouillard. Mais en conditions embarquées nous sommes vraisemblablement amenés à observer cette source de plus ou moins près. De plus, il y a en général de multiples sources lumineuses dans l'environnement et l'utilisation de plusieurs caractéristiques issues de plusieurs sources pourrait nous permettre de détecter correctement la présence de brouillard.

Les caractéristiques que nous calculons à partir des décroissances de lumière répondent mieux sur des sources proches lorsque la diffusion est plus importante que l'extinction. Une source lointaine ne nous permet pas de discriminer entre présence et absence de brouillard. Ainsi, l'absence de halo détecté autour d'une source ne signifie pas qu'il y ait absence de brouillard (faux négatif). Seule l'affirmation de la présence de halos autour de certaines sources peut nous permettre d'affirmer la présence de brouillard (vrai positif).

Caractéristiques extraites du profil d'intensité

Nous cherchons à discriminer les situations des séquences 0 et 1 (absence de brouillard) *versus* 2 et 3 (présence plus ou moins forte de brouillard). Plus de vidéos seraient souhaitables, de densités intermédiaires en particulier. L'obtention d'une référence météorologique telle que la distance de visibilité nous permettrait de nous référer à la législation actuellement en vigueur qui ne considère que les brouillards dont la visibilité météorologique est inférieure à 400 m.

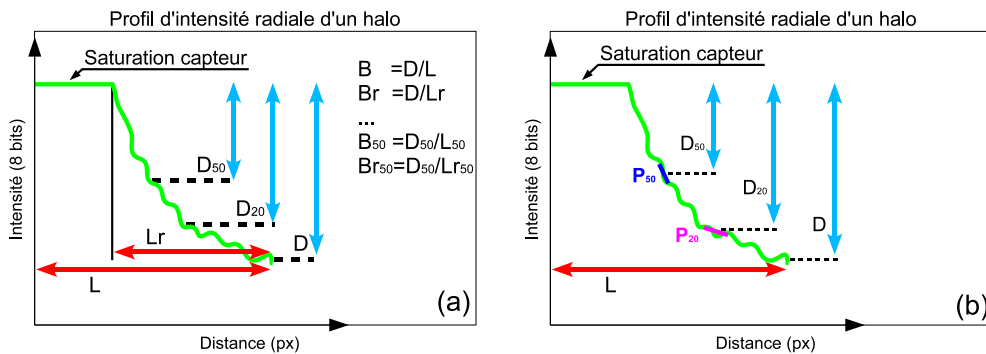


FIGURE 4.30 – Caractéristiques extraites d'un profil d'intensité.

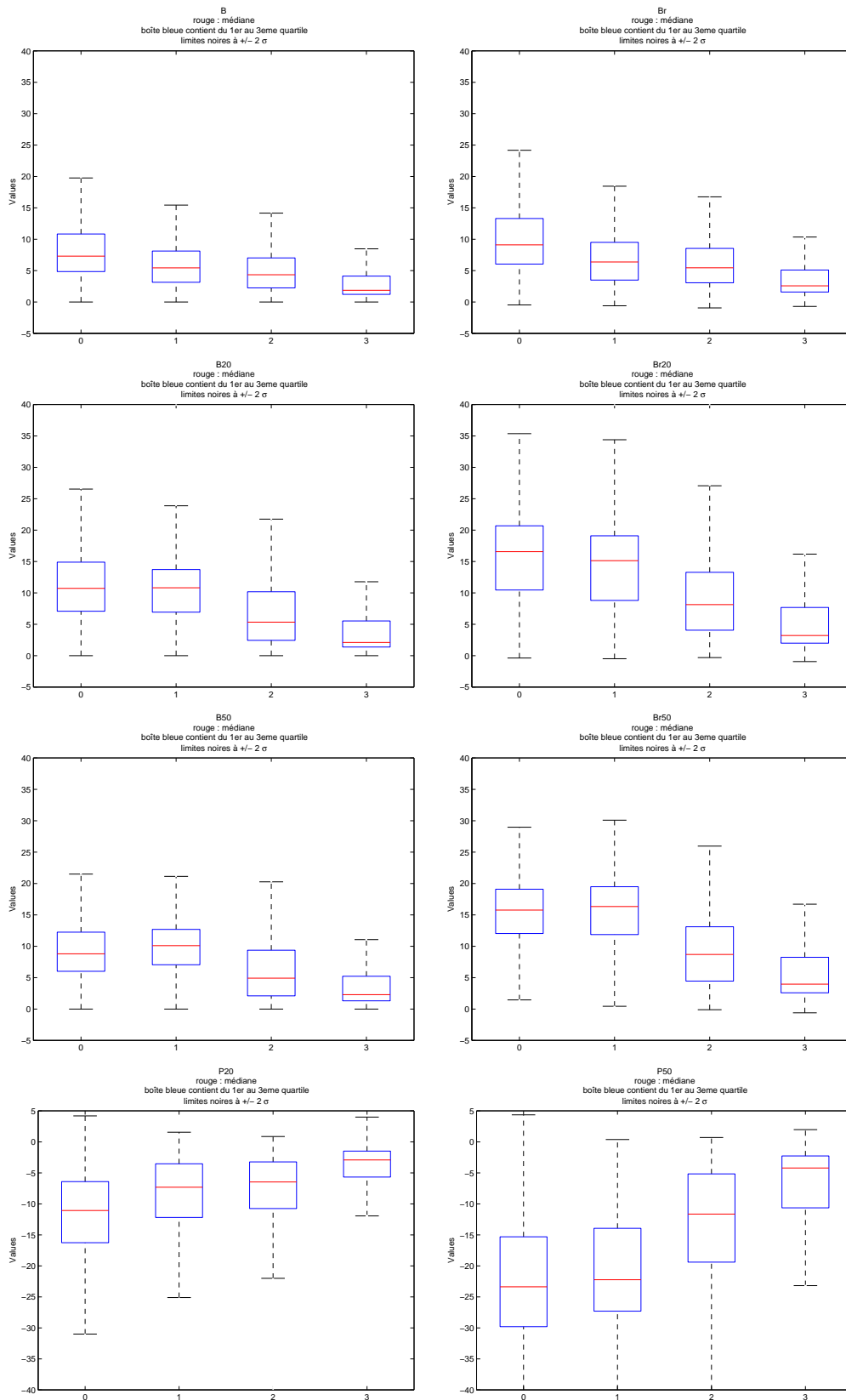


FIGURE 4.31 – Évolution des caractéristiques relevées en fonction des séquences présentées par des boites à moustaches(Séq. 0 : absence de brouillard, Séq. 3 : brouillard dense).

Les caractéristiques B et B_{50} ne semblent pas assez discriminantes. Nous avons dans la suite ajouté d'autres caractéristiques chiffrées de nos décroissances d'intensité comme illustré sur la figure 4.30. La mesure B_{20} est calculée sur le même principe que B_{50} , mais à 20 % de la hauteur de la dynamique. Les mesures Br , Br_{20} , Br_{50} sont calculées à l'aide de la largeur réduite Lr et ne tiennent pas compte de l'étendue de la zone saturée du signal. Enfin, P_{20} et P_{50} sont calculées en prenant la pente du logarithme de la partie décroissante de la courbe. Nous avons fait l'hypothèse que cette décroissance était de type exponentielle, l'avons linéarisée en calculant le logarithme du profil d'intensité. Puis nous avons fait une régression linéaire pondérée à 20 % et à 50 % de la hauteur du profil d'intensité.

Nous avons calculé l'ensemble des caractéristiques présentées sur la figure 4.30 sur environ 25000 sources relevées dans les séquences vidéo selon la méthodologie exposée en section 4.3.4. Nous pouvons voir sur la figure 4.31 l'évolution globale de ces valeurs en fonction des séquences d'image « 0, 1, 2, 3 » présentées section 4.3.3.

On observe sur la figure 4.31 les médianes, les premier et troisième quartiles et la plage dans laquelle on peut espérer 95 % des données sous hypothèse de normalité ($\pm 2\sigma$). Si on observe les médianes, les caractéristiques relevées dans les images permettent de distinguer les séquences en fonction de l'importance de la diffusion autour des sources de lumière à l'exception de B_{50} et Br_{50} pour lesquelles les valeurs relevées en présence d'une légère diffusion atmosphérique (séquence 1) sont légèrement supérieures à celles relevées en absence de brouillard (séquence 0).

Les caractéristiques, B , Br et P_{20} discriminent mieux la classe de brouillard 0 par rapport à la classe 1 d'une part, et la classe 2 par rapport à la classe 3 d'autre part. Sachant que la présence de brouillard est très faible dans la séquence classée brouillard 1, nous tolérons que la distinction entre absence de brouillard et brouillard de classe 1 soit ténue. Les réponses des diverses caractéristiques relevées dans les séquences vidéo sont satisfaisantes au premier abord du point de vue de leurs évolutions moyennes.

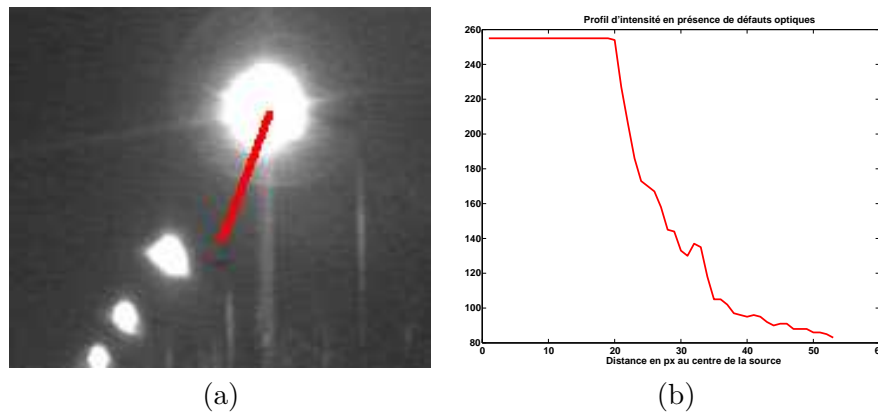


FIGURE 4.32 – (a) Source en absence de brouillard imagée avec un défaut optique et (b) profil d'intensité sous la ligne rouge.

On notera que les caractéristiques B_{50} et Br_{50} tendent à être légèrement plus faibles dans les images sans brouillard (séquence 0) que dans des images contenant peu de brouillard (séquence 1). Ceci peut être dû aux défauts optiques entre la source et le capteur qui biaisent la mesure en absence de brouillard (*cf.* figure 4.15 les défauts optiques sur la première image et sur la figure 4.32). Ces défauts sont des réflexions complexes aux interfaces optiques (pare-brises ou optique de la caméra), elles peuvent aussi être des phénomènes liés à la saturation d'une zone du capteur (blooming ou smearing).

Le tableau 4.33 montre *a priori* les caractéristiques qui présentent le plus de potentiel pour la tâche de détection (distinction entre « 0, 1 » et « 2, 3 ») dans un premier temps puis pour une tâche de caractérisation du brouillard nocturne (distinction des classes fondées sur les séquences 0 à 3).

Mesures	B	B_{20}	B_{50}	Br	Br_{20}	Br_{50}	P_{20}	P_{50}
Différenciation Seq. 0-1 vs. 2-3	-	+	+	-	+	+	-	+
Évolution moyenne	+	+	-	+	+	-	+	+

FIGURE 4.33 – Distinction des séquences 0-1 vs. 2-3 et évolution moyenne des caractéristiques brutes prises sur l'ensemble des sources.

Méthodologie de traitement pour la classification

Nous avons relevé les caractéristiques présentées précédemment dans l'ensemble des séquences, sur l'ensemble des sources potentielles détectées selon la méthodologie présentée section 4.3.4. Pour les aspects de détection, nous avons concaténé les mesures des séquences 0 et 1 dans la classe « sans brouillard » et les mesures des séquences 2 et 3 comme appartenant à la classe « brouillard ». Nous disposons de 8 caractéristiques associées au profil d'intensité (B , B_{20} , B_{50} , Br , Br_{20} , Br_{50} , P_{20} et P_{50}) ainsi que de 3 mesures relevées dans le processus de sélection des sources potentielles (surface, compacité et élongation) sur lesquelles nous pourrions nous appuyer pour classifier des images en brouillard/non brouillard

Pour traiter nos données, nous séparons notre base de données en 4/5ème pour l'apprentissage et 1/5ème pour les tests. Ces séparations en « base de données » « base d'apprentissage » sont faites par tirage aléatoire sur les sous-ensembles d'études (sources, images, séquences d'images continues de taille variable).

Nous avons, dans un premier temps, observé l'erreur de classification en fonction des caractéristiques brutes sur l'ensemble des sources de la base. Pour chaque caractéristique, nous observons l'erreur de classification sur la base de test en fonction d'un seuil obtenu sur la base d'apprentissage. Cette procédure a été répétée 50 fois (tirage des bases d'apprentissage et de test, comme l'illustre le schéma de fonctionnement de l'algorithme figure 4.34).

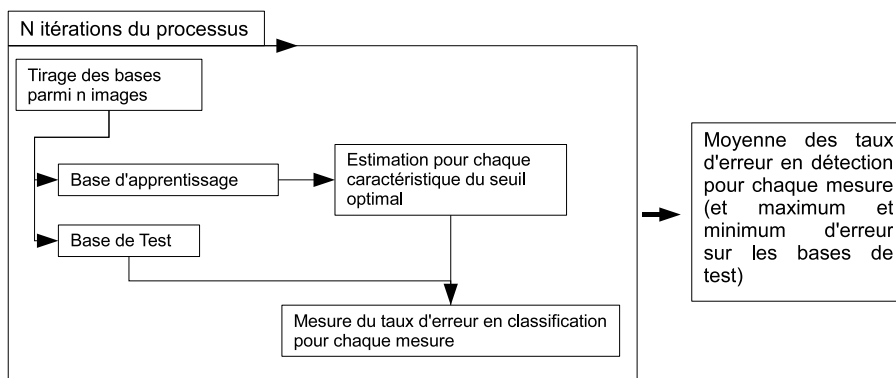


FIGURE 4.34 – Méthodologie de calcul de l'erreur produite en fonction de la caractéristique observée.

La base étant composée de sources potentielles extraites à 53 % des séquences avec brouillard et à 47 % des séquences sans brouillard. L'erreur maximale qu'on peut réaliser si on les classe toutes dans la même classe est de 53 % au maximum. Nous pouvons voir sur la figure 4.35 le taux de classification sur la base d'apprentissage en fonction du seuil sur trois caractéristiques relevées sur les halos. Chacune de ces courbes comporte un minimum nettement inférieur à l'erreur structurelle maximale, les caractéristiques apportent donc bien une information discriminante au problème de classification. En revanche, ces caractéristiques n'ont pas toutes le même pouvoir discriminant pour les situations qui nous intéressent.

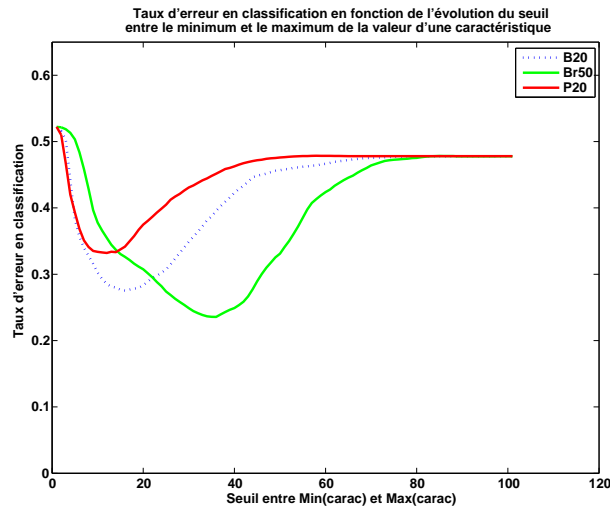


FIGURE 4.35 – Évolution du taux de détection à partir des caractéristiques extraites.

Après avoir observé le taux de classification obtenu à partir des caractéristiques brutes extraites de chaque profil d'intensité. Nous allons ensuite vérifier l'apport de différentes hypothèses et les traitements associés. Parmi celles-ci, nous avons fait l'hypothèse que les sources de petite taille ne nous renseigneront pas correctement sur la présence de brouillard, les sources de lumière sont aussi supposées être des formes convexes peu allongées. Pour vérifier cette hypothèse, nous pouvons faire un filtrage des sources de surface saturée trop faible, des compacités ou des élongations trop élevées. Nous souhaitons évaluer dans quelle mesure ces filtres peuvent améliorer la détection ou la caractérisation du brouillard. Après avoir observé l'effet du filtrage, nous observons l'effet du cumul de l'ensemble des informations extraites sur un image selon un nombre de halos variables. Finalement, nous présentons les résultats obtenus si nous utilisons les caractéristiques extraites de plusieurs images consécutives pour la détection.

Classification à partir des caractéristiques brutes extraites d'une source lumineuse

Nous pouvons voir sur la figure 4.36 les taux moyen d'erreur en classification à partir des caractéristiques brutes. Les résultats entre les 50 tirages de bases sont homogènes, on n'a pas observé de tirage aléatoire des bases d'apprentissage et de test donnant de résultats divergents. Cela confirme que notre base de données est suffisamment bien fournie pour être séparée sans créer de sous ensembles spécifiques.

En utilisant Br_{50} le taux de bonne classification varie entre 22,5 % et 24,7 %, avec un taux médian de bonne classifications de 23,7 %. Ces résultats expriment la capacité que nous avons à détecter la présence de brouillard à partir de l'information d'une seule source et d'une seule

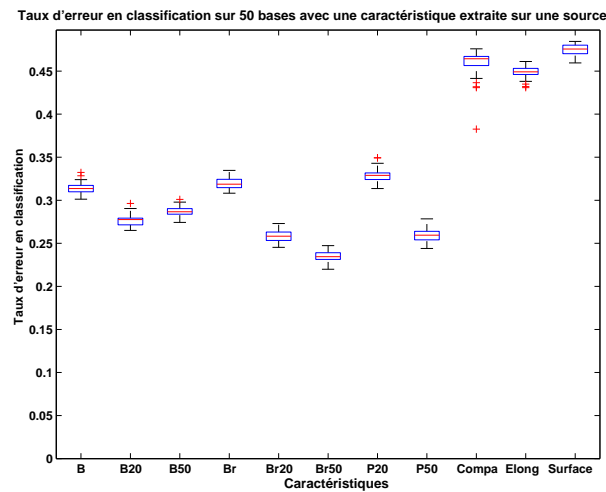


FIGURE 4.36 – Taux d’erreur moyen en fonction des caractéristiques brutes sur 50 combinaisons différentes de base d’apprentissage et de base de test.

caractéristique extraite. Le taux d’erreur est élevé, une fois sur quatre nous produisons une mauvaise estimation à partir d’une source et de la caractéristique Br_{50} .

Nous avons également souhaité observer dans quelle mesure les autres caractéristiques pourraient être complémentaires à Br_{50} et améliorer la classification. Pour cela, nous avons combiné Br_{50} avec chacune des autres caractéristiques.

Les résultats en classification sont présentés ci-dessous dans la figure 4.37.

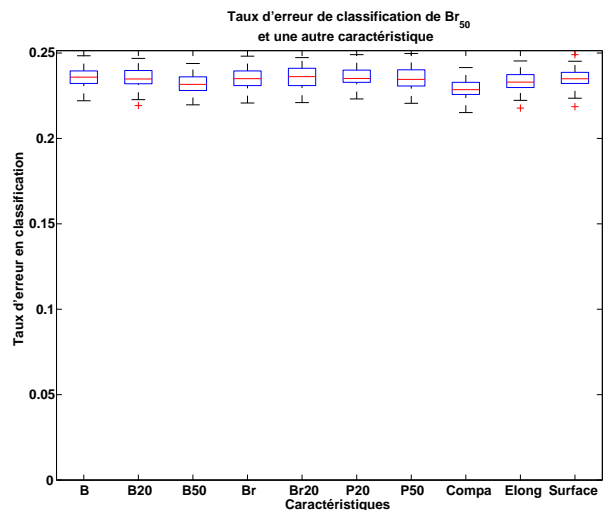


FIGURE 4.37 – Taux d’erreur moyen en fonction de la caractéristique associée à Br_{50} sur 50 combinaisons différentes de base d’apprentissage et de base de test.

En définitive, le taux d’erreur est très proche de celui obtenu avec Br_{50} seul, le gain en erreur sur l’ensemble de la base est très faible. L’erreur est en moyenne de 24,1 % sur les différentes bases. Au mieux, nous avons une erreur de 21,4 % sur une des bases en utilisant la

compacité en complément de Br_{50} . Dans le cas le plus défavorable, nous avons observé 25,1 % d'erreur avec Br_{20} en complément de Br_{50} . Les apports d'une seconde caractéristique ne sont pas significatifs, les autres caractéristiques n'apportent pas d'information discriminante à Br_{50} pour mieux différencier la présence ou l'absence de brouillard.

Comme nous l'avons fait remarquer, parmi les sources potentielles dont nous disposons, certaines pourraient jouer des rôles de faux négatifs (petites sources par exemple qui laisseraient croire à l'absence de brouillard). Inversement, il pourrait rester des objets ayant des propriétés proches des sources de lumière et qui pourraient jouer le rôle de faux positifs (objets rétro-réfléchissants ou reflets sur des surfaces présentant un dégradé d'intensité semblables à un halo en présence de brouillard).

En conservant la totalité des sources, nous avons des taux d'erreur importants. Nous cherchons donc à identifier, si parmi ces sources, certaines doivent être filtrées afin d'améliorer la qualité des données vis-à-vis du problème de classification.

Classification après filtrage des sources potentielles détectées

Nous avons cherché à observer quels étaient les effets du filtrage des sources présentant une trop faible surface, une forte compacité ou une forte élongation. Nous avons exploré différents seuils pour ces trois caractéristiques. Il s'avère que ces filtrages permettent d'améliorer de façon conséquente les résultats en détection.

Nous avons exploré l'ensemble des combinaisons de filtrage possible selon ces trois axes. Nous avons conservé deux combinaisons de filtrages nous permettant d'obtenir sensiblement les mêmes performances en classification comme l'illustre le tableau 4.38.

Le filtrage 1 consiste à ne conserver que les sources potentielles de compacité inférieure à 5, d'élongation inférieure à 1,7 et de surface supérieure à 75 pixels. Ce filtrage est le moins sélectif des deux retenus, il nous permet d'obtenir au mieux 10,5 % d'erreur en classification tout en conservant 42 % des sources lumineuses potentielles. Le filtrage 2 quant à lui nous permet d'obtenir 9,4 % d'erreur en classification mais ne conserve que 14 % des sources lumineuses.

Le filtrage 2 donne des résultats à peine meilleurs, mais comme il s'applique à un moins grand nombre de sources, on peut se demander si c'est le filtrage qui supprime beaucoup de « bruit » ou si c'est plutôt une situation de sur-apprentissage et d'adaptation aux données. Nous conservons donc pour l'instant ces deux méthodes avant de pouvoir déterminer laquelle est la plus adaptée à nos besoins lors des phases d'intégration sur une ou plusieurs images des résultats.

	Seuil sur la compacité maximale	Seuil sur l'élongation maximale	Seuil sur la surface minimale	Taux d'erreur	Données conservées
Sans filtrage	/	/	/	23,7%	100%
Filtrage 1	5	1,7	75	10,7%	42%
Filtrage 2	2,5	1,2	125	9,4%	14%

FIGURE 4.38 – Résultats en classification après filtrage (suppression des formes de forte compacité et forte élongation et de faible surface).

Comme l'illustre la figure 4.39, les meilleurs résultats sont encore obtenus avec Br_{50} avec cette fois un taux d'erreur médian de 10,7 % compris entre 9,3 % et 12 % pour environ 42 % de sources conservées.

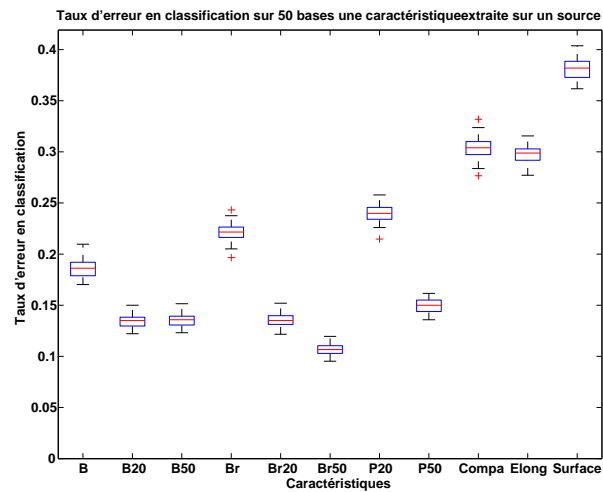


FIGURE 4.39 – Résultats en détection fondés sur les caractéristique brutes après filtrage des compacités, élongations et surfaces trop faibles.

On peut voir sur la figure 4.40 la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) de classification sur Br_{50} obtenue après filtrage des sources potentielles selon le filtrage 1.

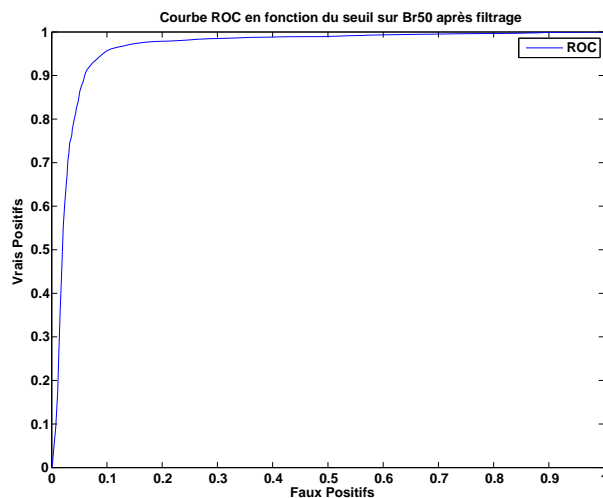


FIGURE 4.40 – Courbe ROC en fonction du seuil sur Br_{50} .

Nous avons montré que les meilleurs résultats que nous pouvions obtenir après filtrage étaient légèrement supérieurs à 90 % de bonne classification brouillard/non-brouillard à partir d’une seule forme segmentée dans l’image (*a priori* une source lumineuse). Nous allons maintenant améliorer le système en utilisant plusieurs informations au sein d’une même image.

Classification à partir de l’ensemble des informations extraites d’une image

Dans les séquences dont nous disposons, nous sommes en présence de multiples sources dans chaque image (entre 0 et 15). Nous avons vu comment les informations d’une source nous

permettraient de classer le brouillard. Dans nos séquences, il nous faudra traiter avec plusieurs de ces informations à chaque image. Nous cherchons à savoir comment composer ces différentes informations, parfois contradictoires, afin de prendre une décision.

Au sein d'une même image, nous allons composer la caractéristique extraite de n halos par les fonctions suivantes :

$$Carac_i = \min_n(Carac_{i,n}) \quad (4.8)$$

$$Carac_i = \max_n(Carac_{i,n}) \quad (4.9)$$

$$Carac_i = \text{moyenne}_n(Carac_{i,n}) \quad (4.10)$$

$$Carac_i = \text{médiane}_n(Carac_{i,n}) \quad (4.11)$$

Nous supposons que le minimum d'une caractéristique est susceptible de bien fonctionner puisque c'est l'affirmation positive de la présence de brouillard que nous cherchons à détecter et plus il y a de halo, plus la pente de la décroissance est faible. Nous ne nous appuyons pas sur l'information extraite de sources lointaines (petites et sans halo quelle que soient les conditions atmosphériques, de caractéristiques B élevées) et une composition par le minimum des caractéristiques relevées peut nous permettre de conserver ces informations sur la présence de brouillard. En revanche une composition par le maximum de la caractéristique aura tendance à sélectionner des valeurs issues de sources très nettes (grandes valeurs de B , B_{20} , etc.).

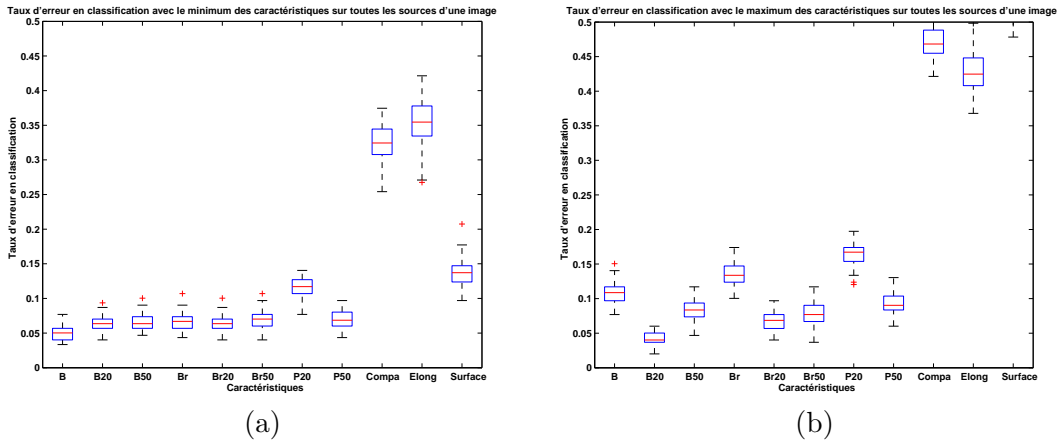


FIGURE 4.41 – Taux d'erreur en classification sur les images en composant par min (a) et max (b) les caractéristiques au sein d'une même image (après filtrage 1).

Pour ce qui est de la composition par min des caractéristiques brutes sans filtrage, les meilleures performances sont obtenues avec P_{50} (mais ils nous intéressent peu car 10 % d'erreur en classification restent trop élevés). On peut en revanche en conclure que le filtrage reste nécessaire et qu'une composition des caractéristiques relevées au sein d'une même image ne compense pas l'absence de filtrage.

On observe sur le deuxième graphique de la figure 4.41 que le maximum des caractéristiques donne les plus mauvais résultats parmi les 4 méthodes. Ils sont dus à des erreurs de classification essentiellement sur la séquence brouillard. En effet, le maximum fera ressortir tous les faux négatifs de cette séquence. En définitive, comme illustré sur la figure 4.42 et le tableau 4.43, la composition moyenne est la plus performante. Elle est robuste aux faux positifs dans la séquence sans brouillard ainsi qu'aux sources sans halo dans les séquences avec brouillard.

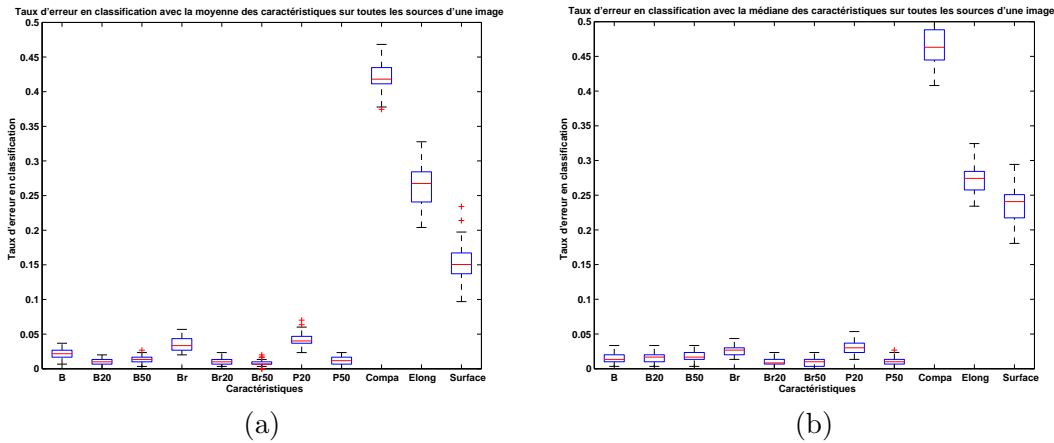


FIGURE 4.42 – Taux d’erreur en classification sur les images en composant par moyenne (a) et médiane (b) les caractéristiques au sein d’une même image (après filtrage 1).

	min	max	Moyenne	Médiane
Sans Filtrage	15,9%(P ₅₀)	14,2%	4,3%	3,7%
Filtrage 1	6,7%	6,9%	1,6%	2,1%
Filtrage 2	6,1%	7,2%	4,3%	4,8%

FIGURE 4.43 – Taux d’erreur en classification en fonction de la méthode de composition des caractéristiques relevées au sein d’une image.

Les meilleurs résultats sont majoritairement obtenus avec Br_{50} bien que les résultats obtenus avec Br_{20} , B_{20} et B_{50} soient sensiblement aussi bons.

Enfin, afin de valider l’hypothèse selon laquelle les grandes sources de lumière sont les plus pertinentes, nous avons également tenté de pondérer les caractéristiques par la surface des sources analysées. Dans le cas de la composition par la moyenne on calcule notre valeur par image comme suit (de même pour les autres compositions au sein d’une même image « i ») :

$$Carac_i = \frac{\sum_1^n surface_{i,n} \cdot Carac_{i,n}}{\sum_1^n surface_{i,n}} \quad (4.12)$$

avec n l’indice des sources dans une image et i l’indice des images.

Les résultats présentés dans le tableau 4.44 sont très décevants, peut-être est-ce parce que les faux positifs peuvent présenter des surfaces étendues. Les résultats obtenus en pondérant les mesures par la surface des sources sont dans l’ensemble tous inférieurs aux résultats sur les caractéristiques non pondérées. En revanche, les meilleurs taux de classification sont obtenus avec d’autres indices que ceux déduits de la décroissance d’intensité mais issus de la forme tels que la compacité et l’élongation (ils sont précisés entre parenthèses après les scores dans le tableau 4.44).

En définitive, nous obtenons au mieux un bon taux de classification brouillard/non-brouillard de 98 % à partir d’une seule image en utilisant la moyenne non pondérée des Br_{50} mesurés sur les différents halos détectés dans l’image.

Outre la qualité du résultat jugée par le taux de classification, il nous importe également de pouvoir conserver une estimation de la présence de brouillard la plus continue possible. Dans le cas du filtrage 2, sur 2130 images, nous conservons 1664 images (78 % du total des images)

Pondération par la surface	min	max	Moyenne	Médiane
Sans Filtrage	38,1% (<i>Br</i>)	18,7% (Surf.)	13,5% (Surf.)	19% (Elong.)
Filtrage 1	28,3% (Elong.)	12,3% (Elong.)	8,5% (Elong.)	7% (Elong.)
Filtrage 2	16,8% (Elong.)	17,4% (Elong.)	16,3% (Compa.)	17% (Elong.)

FIGURE 4.44 – Résultats en classification (et paramètre sur lequel la classification est la plus performante) après pondération des caractéristiques par la surface des sources.

dont 733 images dans lesquelles il ne reste qu'une source. Avec le filtrage 1, nous conservons des sources dans 2094 images (soit 98 % du total des images) parmi lesquelles seulement 115 ne contiennent qu'une source.

De plus dans le cas du filtrage 2, nous avons, au cours de nos séquences, une centaine d'événements durant lesquels nous n'avons pas de sources sur deux images consécutives et une dizaine lors desquels on a aucune source pendant plus de 15 images. Dans ces conditions nous sommes incapables de donner une estimation de la présence ou non de brouillard. Dans le cas du filtrage 1 nous n'avons que 4 événements durant lesquels nous n'avons aucune source pendant 2 images et 2 événements où aucune source potentielle n'est retenue durant 8 et 9 images.

Fort des résultats obtenus par une intégration des caractéristiques au sein d'une image, nous avons étendu ce processus d'intégration sur plusieurs images.

Classification à partir des informations extraites sur une séquence d'images

Nous utilisons une composition telle que la moyenne des caractéristiques extraites des sources dans une séquence d'images. Nous avons intégré les caractéristiques sur une base de temps et non de nombre (on pourrait intégrer une fois N sources analysées consécutives). Nous avons intégré sur 5, 10, 25 et 50 images successives, ce qui correspond à 0,2s, 0,4s, 1s et 2 secondes de temps respectivement.

	5 images (0,2 s)	10 images (0,4 s)	25 images (1 s)	50 images (2 s)
Sans Filtrage	2,1% <i>Br</i> ₅₀	1,5% <i>Br</i> ₅₀	0,4% <i>Br</i> ₅₀	0% <i>B</i> ₂₀ - <i>Br</i> ₂₀ - <i>Br</i> ₅₀ - <i>P</i> ₅₀
Filtrage 1	1,4% <i>P</i> ₅₀	0,94% <i>Br</i> ₅₀	0,14% <i>Br</i> ₅₀	0% <i>B</i> ₂₀ - <i>B</i> ₅₀ - <i>Br</i> ₂₀ - <i>Br</i> ₅₀ - <i>P</i> ₅₀
Filtrage 2	14,9% <i>Br</i> ₅₀	8,6% <i>Br</i> ₅₀	0,15% <i>Br</i> ₂₀	0% <i>Br</i> ₅₀ - <i>P</i> ₅₀

FIGURE 4.45 – Taux d'erreur en classification en fonction du nombre d'images sur lequel sont intégrées les caractéristiques.

Les temps d'intégrations sont suffisamment longs et les séquences suffisamment fournies en sources pour que la moyenne soit performante. On remarque tout de même que le filtrage 2, trop fort, ne permet pas de conserver assez de sources lorsque les plages d'intégration sont courtes (5 et 10 images).

Nous avons des taux d'erreur de 0 % avec de nombreuses caractéristiques pour les temps d'intégration les plus longs. Leurs performances étaient déjà proches sur une image. L'intégration multi-images apporte de la robustesse à l'estimation de la présence de brouillard par caméra.

Bilan des performance en détection de brouillard par les halos

Sur nos séquences, nous avons montré que la caractéristique Br_{50} était globalement la plus performante et que nous classions correctement 98 % des images dans la bonne catégorie de brouillard. Si nous intégrons dans le temps les caractéristiques (10 images ou plus), nous estimons bien la présence de brouillard plus de 99,9 % du temps sur nos séquences.

Plusieurs caractéristiques fournissent des résultats sensiblement identiques. Bien que Br_{50} ait été identifié comme la meilleure caractéristique, il faudra vraisemblablement adapter le seuil de décision afin que l'algorithme fonctionne aussi bien sur d'autres caméras dans d'autres conditions. Une procédure de validation expérimentale à l'aide de différentes caméras dans un même brouillard permettrait d'éclaircir ce point.

Nous pouvons essayer de fixer le seuil sur Br_{50} de telle sorte qu'il tende vers la valeur la plus haute possible à niveau de performance égal. De cette manière, des brouillards juste plus marqués que celui de la séquence « brouillard 1 » seraient détectés.

Inversement nous pourrions faire tendre le seuil de Br_{50} vers le minimum possible pour un même niveau de performance. Nous pourrions détecter des brouillards avec des effets visuels au minimum aussi prononcés que ceux de la séquence « brouillard 2 » (Br_{50} faibles, effets visuels du brouillard assez prononcés). Il nous faudrait donc disposer d'une base de données plus complète intégrant des images prises en brouillards très denses et dans des brouillards de différentes natures.

4.3.6 Caractérisation embarquée du brouillard nocturne par les halos

Nous travaillons avec les huit mêmes caractéristiques extraites des courbes (B , B_{20} , B_{50} , Br , Br_{20} , Br_{50} , P_{20} , P_{50}), de 2 caractéristiques extraites des formes (compacité et élongation) et d'une observation qu'est la surface.

On pourra observer sur la matrice d'autocorrélation présentée dans le tableau 4.46 que B et Br , B_{20} et Br_{20} , B_{50} et Br_{50} sont très corrélées (corrélation supérieure à 0.9). En effet, les méthodes de calcul permettant d'obtenir les 8 premières caractéristiques sont assez similaires, elles correspondent à des mesures de pente ou de décroissance moyenne sur la courbe.

	B	B_{20}	B_{50}	Br	Br_{20}	Br_{50}	P_{20}	P_{50}	Comp.	Élong.	Surf.
B	1	0,83	0,74	0,95	0,79	0,68	-0,77	-0,74	-0,15	0,05	-0,35
B_{20}	0,83	1	0,94	0,73	0,92	0,86	-0,72	-0,86	-0,12	0,01	-0,38
B_{50}	0,74	0,94	1	0,62	0,82	0,87	-0,59	-0,79	-0,11	0,03	-0,38
Br	0,95	0,73	0,62	1	0,78	0,65	-0,78	-0,73	-0,15	0,02	-0,31
Br_{20}	0,79	0,92	0,82	0,78	1	0,92	-0,75	-0,92	-0,14	-0,06	-0,36
Br_{50}	0,68	0,86	0,87	0,65	0,92	1	-0,61	-0,88	-0,15	-0,08	-0,37
P_{20}	-0,77	-0,72	-0,59	-0,78	-0,75	-0,61	1	0,80	0,13	0,00	0,28
P_{50}	-0,74	-0,86	-0,79	-0,73	-0,92	-0,88	0,80	1	0,14	0,04	0,35
Comp.	-0,15	-0,12	-0,11	-0,15	-0,14	-0,15	0,13	0,14	1	0,16	0,14
Elong.	0,05	0,01	0,03	0,02	-0,06	-0,08	0,00	0,04	0,16	1	-0,07
Surf.	-0,35	-0,38	-0,38	-0,31	-0,36	-0,37	0,28	0,35	0,14	-0,07	1

FIGURE 4.46 – Matrice d'autocorrélation des caractéristiques relevées.

Nous avons vu que les caractéristiques étudiées sur les décroissances d'intensité autour des sources réagissent en moyenne correctement en fonction de la densité de brouillard mais ne nous

permettent pas de classer les types de brouillard rencontrés à partir d'une seule caractéristique. En revanche nous pensons que les filtrages des sources potentielles par leur surface, leur élongation et leur compacité reste valable pour sélectionner les valeurs utiles à la discrimination des brouillards entre eux. Nous ne disposons que de peu de séquences vidéo présentant un brouillard dense, nous ne pouvons pour l'instant pas aller beaucoup plus loin dans l'étude de la stabilité et de la robustesse de notre méthode de caractérisation.

Intégration temporelle des informations extraites des halos

Pour résoudre cette incapacité à discerner la densité de brouillard dans une image à partir de la décroissance de lumière d'une seule source et sans savoir sa distance, nous proposons d'exploiter les informations extraites sur une ou plusieurs sources à des distances différentes en faisant une intégration temporelle de nos résultats telle que nous l'avons faite pour la détection. Nous avons vu en section 4.3.5 que les moyennes des caractéristiques extraites pouvaient répondre différemment en fonction de la densité de brouillard (*cf.* Fig.4.31), certaines discriminant mieux les séquences avec et sans brouillard tandis que d'autres différencient mieux les séquences de brouillard entre elles. Nous allons vérifier si l'intégration temporelle nous permet d'aboutir au même classement et observer, parmi les caractéristiques extraites, celles qui nous permettent le mieux de discriminer les classes de brouillard.

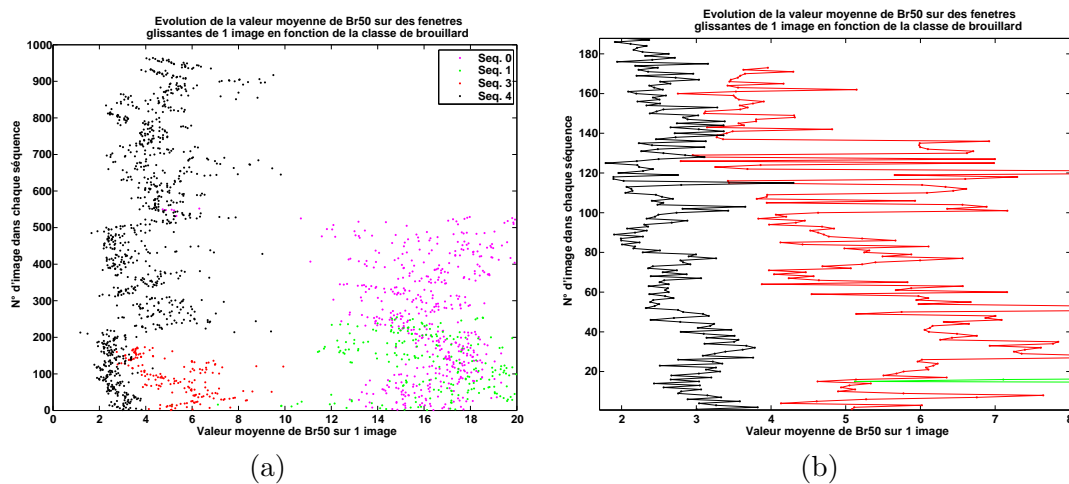


FIGURE 4.47 – Moyenne du paramètre Br_{50} sur une image en fonction de la séquence de brouillard. A gauche sur l'ensemble des séquences, à droite, zoom sur les moyennes par image pour les séquences 2 et 3.

Nous pouvons voir sur la figure 4.47(a) la répartition des valeurs moyennes des Br_{50} par image en fonction des séquences utilisées. On notera sur le graphique agrandi, figure 4.47 (b), que la valeur moyenne de ce type de paramètre oscille d'une image sur l'autre. Cela est dû à la sortie brutale de sources qui étaient dans le champ de la caméra l'instant d'avant. La moyenne de Br_{50} décroît lorsque les images contiennent des sources proches présentant de larges halos, puis croit de nouveau lorsque ces sources sortent du champ de la caméra (souvent par deux simultanément lorsqu'il s'agit de lampadaires disposés symétriquement de part et d'autre de la chaussée). On notera également une oscillation de la moyenne de Br_{50} selon une période plus longue d'environ 1,5 s à 2 s (figure 4.47(b)). Cet effet est aussi un effet fréquentiel, il dépend à la fois de l'équipement de la voirie (écart inter-lampadaires essentiellement) mais également

de la vitesse du véhicule. De façon cyclique nous avons tendance à avoir sur l'image des sources plus proches en moyenne puis ultérieurement nous avons des sources plus petites en moyenne.

On peut apprécier sur la figure 4.48 l'effet de l'intégration sur une fenêtre glissante d'images de plus en plus large.

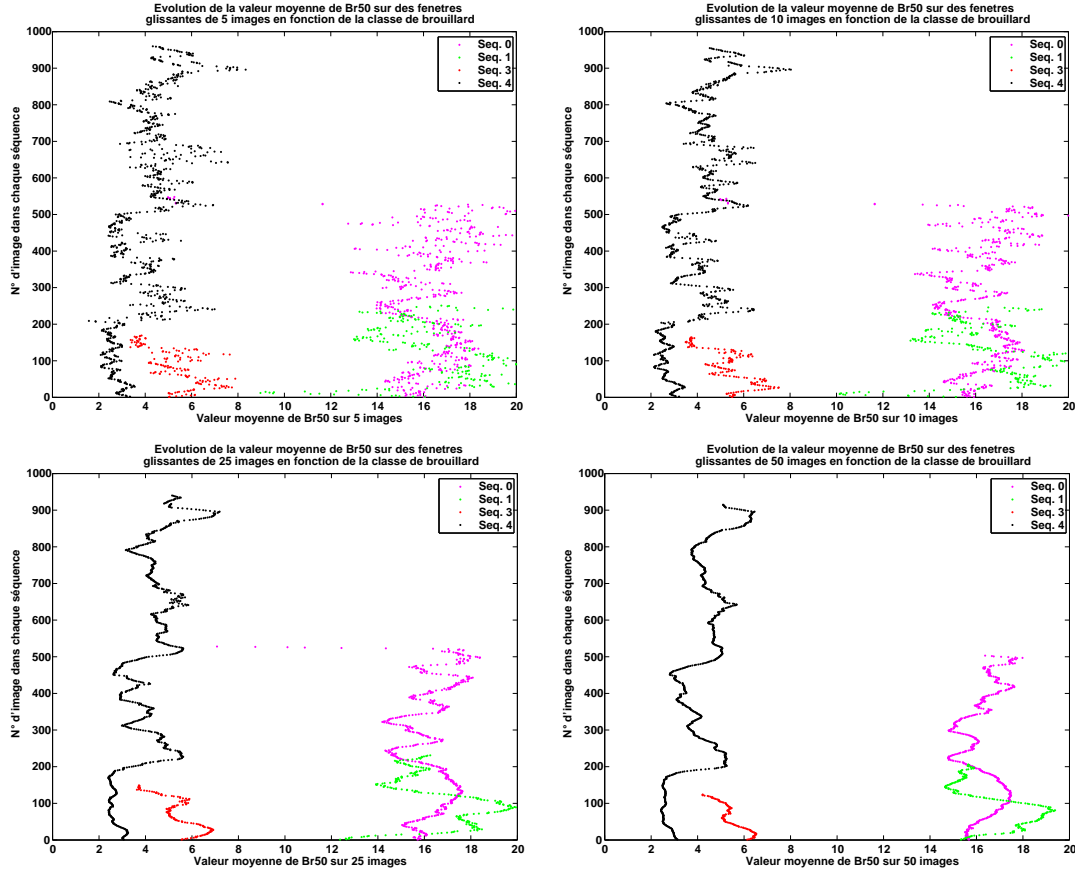


FIGURE 4.48 – Valeur moyenne de Br_{50} en fonction de la taille de la fenêtre d'intégration et de la séquence.

La figure 4.48 illustre qu'une intégration temporelle plus longue, bien qu'elle resserre la dispersion des valeurs au sein des classes ne permet pas pour autant de toujours distinguer les différentes séquences juste par la moyenne du paramètre. Nous ne pouvons dire cependant si le fait qu'il y ait un recouvrement des valeurs de la moyenne entre les séquences 2 et 3 est le fruit d'une dissipation de brouillard qui cours de la séquence 3 (on notera une tendance à l'augmentation de la moyenne des Br_{50}), ou si cela est dû à un manque de stabilité du critère. La densité de brouillard étant sujette à des variations locales et la séquence 2 étant sous représentée, l'ordonnancement des moyennes respecte globalement la simple classification visuelle.

Bilan de l'utilisation de halos pour la caractérisation du brouillard

Pour la détection, nous avons conclu que le calcul d'une seule caractéristique telle que Br_{50} était suffisant pour l'obtention de bons résultats. En adoptant le filtrage des objets détectés en amont du calcul pour la détection, en choisissant le plus performant parmi divers paramètres assurant une bonne détection et en adoptant une intégration des mesures sur plusieurs images,

nous obtenons de bons résultats. Nous obtenons une mesure assez stable dans le temps et différenciant nos séquences. Les meilleurs résultats sont obtenus en intégrant sur 50 images, soit 2 secondes d'intégration. Mais ce n'est nullement un problème dans la mesure où cette mesure ne nécessite pas d'être estimée 25 fois par seconde. Nous aurions besoin de plus de données, brouillards de densités différentes, de natures différentes et avec des caméras différentes pour évaluer la pertinence et les limites d'application. Il sera nécessaire de tester cette méthode sur d'autres sites et en ayant connaissance de la densité des brouillards dans lesquels le véhicule est plongé afin de savoir si des critères tels qu'un moyennage des valeurs est le plus performant et le plus stable. Une autre possibilité consisterait à obtenir un classement par des conducteurs de leurs conditions de visibilité et associer ces classes visuelles à des classes météorologiques fondées sur la différenciation de la densité et de la granulométrie des brouillards.

4.3.7 Détection embarquée du brouillard nocturne par la rétrodiffusion

Nous détaillons dans cette partie la méthode de détection du brouillard fondée sur la rétrodiffusion des phares du véhicule. Cette méthode est complémentaire de la méthode de détection par les halos. Elle a vocation à être utilisée lorsque les sources de lumière de l'environnement ne sont pas assez nombreuses pour que la méthode fondée sur la détection de halos soit fiable.

Non seulement ces deux méthodes sont complémentaires mais elles sont intrinsèquement dissociées. En effet, en présence de sources de lumière extérieures, le niveau de lumière ambiant est nettement plus élevé que lorsque seuls les feux du véhicule éclairent la scène. Malgré la présence de brouillard, la trace de rétrodiffusion due aux feux du véhicule n'est alors pas visible par la caméra. En revanche, lorsque le véhicule n'est pas dans un environnement éclairé par des sources de lumière extérieures ou que celles-ci sont lointaines, l'ajustement automatique d'exposition de la caméra vers des niveaux d'énergie plus faibles permet de percevoir cette trace.

Nous nous appuyons dans la suite sur une autre hypothèse que nous n'avons pas dans les environnements éclairés par des sources dont nous ignorons les positions : nous connaissons *a priori* la position des feux du véhicule dans l'image, le positionnement de la caméra relativement au véhicule restant fixe. En revanche, en absence de brouillard, nous n'avons aucune idée *a priori* de la photométrie de la scène en avant du véhicule. On trouvera vraisemblablement de façon courante un sol sombre dû au bitume et éventuellement des marquages routiers délimitant la voie dans laquelle se trouve le véhicule. En revanche en présence de brouillard, nous aurons de façon permanente la trace de rétrodiffusion des feux du véhicule (en France le code de la route demande aux usagers de se positionner en feux de croisement en présence de brouillard ou en feux anti-brouillard si le véhicule en est équipé). Que le véhicule tourne ou qu'il soit en haut de côte sans que ses feux ne visent le sol, cette trace de rétrodiffusion de la lumière des feux est permanente. Comme nous l'avons souligné, lorsque la luminosité ambiante est plus importante cette trace tend à ne plus être perceptible bien qu'elle existe encore.

Dans la suite, nous présentons la méthode de détection. Elle consiste à générer des images de référence d'une scène type dans un brouillard nocturne avec les phares allumés et différentes densités de brouillard. Nous proposons ensuite de comparer les images vidéo acquises en conditions embarquées avec ces images de référence à l'aide de calculs de corrélation d'images. Ne disposant pas de séquences d'un véhicule seul dans différents brouillard telles que nous en avons acquises pour la détection de halos, nous avons validé notre méthode de détection de brouillard par la rétrodiffusion sur des images de synthèse et par des essais dans la chambre à brouillard du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand. Nous présentons les résultats de corrélation d'image en fonction des calculs de corrélation utilisés puis nous ouvrons la problématique à la caractérisation du brouillard par de telles méthodes.

Génération d'images de synthèse avec PROF

Nous pouvons générer à l'aide du logiciel PROF des images de synthèse pourvu que nous disposions de la géométrie de la scène et des propriétés photométriques des matériaux et des sources de lumière.

Concernant la scène que nous souhaitons générer, elle doit simuler au mieux l'environnement de la chambre de brouillard de Clermont-Ferrand : les feux avant du véhicule et un asphalte de route dépourvu de marquages routiers. Nous devons traiter dans PROF des problématiques concernant trois points : la route, les feux du véhicule et la caméra.

Concernant la simulation de matériaux dans PROF, le logiciel n'intégrant pas encore les BRDF de matériaux, nous nous sommes bornés à décrire le sol comme un plan lisse et uni avec des propriétés de réflexion lambertienne et une réflexion de 5 %. Concernant les feux du véhicule, nous ne disposons pas de mesures d'émission propres au véhicule utilisé.

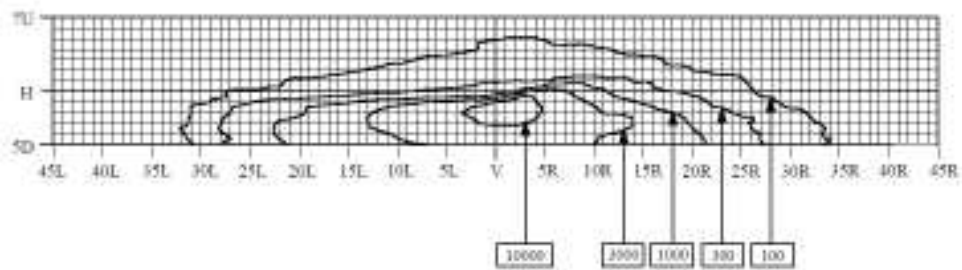


FIGURE 4.49 – Diagrammes de luminance iso-candela de la médiane des intensités lumineuses de codes de véhicules légers mesurées sur un panel pondéré par les ventes en Europe.

Nous disposons de l'étude [Schoettle 01] concernant les feux de véhicules européens et américains dont nous pouvons tirer un modèle photométrique de codes ou de phares « typiquement » européens. Les cartes de luminance de ces feux de face ou d'éclairiments observés verticalement sont illustrées sur les figures 4.49 et 4.50.

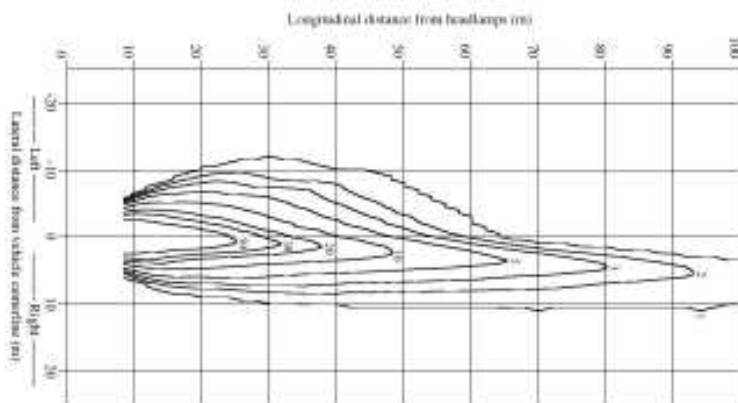


FIGURE 4.50 – Diagrammes d'éclairage vertical iso-lux avec une paire de codes présentant une intensité médiane telle que mesurée par l'UMTRI. Les codes sont montés à 0,62m avec une séparation de 1,12m.

Dans le logiciel PROF, nous devons spécifier la géométrie de l'ensemble des éléments. Nous simulons les feux par une plaque circulaire émissive de diamètre 12 cm (diamètre des optiques d'une Clio 2). Nous prenons un écartement inter feux de 116 cm pour les codes et de 126 cm pour les pleins phares. Il est à noter que les codes des véhicules légers bien qu'identique en conception ne sont pas positionnés ni orientés de façon identique en fonction qu'ils sont placés à droite ou à gauche du véhicule. Concernant l'orientation relative des deux feux, on peut s'appuyer sur des recommandations générales ou sur les mesures d'éclairement vertical présentées sur la figure 4.50 également issus de l'étude [Schoettle 01].

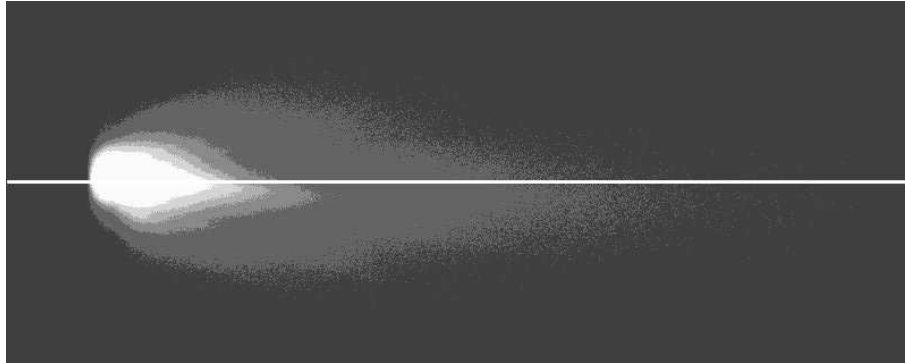


FIGURE 4.51 – Diagramme d'iso-éclairement vertical observé verticalement sur une image synthétique générée dans PROF avec une paire de codes présentant une intensité médiane telle que mesurée par l'UMTRI. Les codes sont montés à 0,62m avec une séparation de 1,16m, la ligne blanche est l'axe de symétrie du véhicule.

Notre carte d'éclairement iso-lux en absence de brouillard est présentée sur la figure 4.51. Pour obtenir un éclairement au sol tel que présenté sur la figure 4.51, le phare de gauche a été réglé de telle sorte qu'il vise selon un angle inférieur de $2,3^\circ$ à celui de gauche. En utilisant ces informations sur la photométrie des feux et nos informations sur la hauteur et l'écartement des feux moyens d'un véhicule, nous pouvons générer une scène synthétique à l'aide de PROF.

Afin d'obtenir un image simulant celle obtenue par une caméra embarquée, nous devons placer un capteur virtuel dans la scène 3D. Ce capteur est assimilé à une caméra modèle sténopé dont la taille de la matrice peut être définie et qui enregistre la résultante des interactions photométriques dans la scène. Nous utilisons un modèle de caméra afin d'obtenir des images frontales comparables à celles d'une caméra placée dans le véhicule. En sortie de PROF, nous obtenons des cartes de luminance en format « double précision » qui ne peuvent être affichées à moins de transformations afin de ramener les données dans 8 bits de dynamique.

Nous n'avons pas simulé la présence de pare-brise considérant que celui-ci était transparent pour la gamme des ondes lumineuses visibles et qu'il n'y avait pas d'interaction entre celui-ci et l'atmosphère (pas de dépôt de gouttes ni de ruissellement).

La figure 4.52 présente six images simulées dans des brouillards de facteurs d'extinction $k = \{0,2 m^{-1}; 0,06 m^{-1}; 0,03 m^{-1}; 0,015 m^{-1}; 0,006 m^{-1}; 0 m^{-1}\}$ (visibilités météorologiques $V_{met} = \{15 m; 50 m; 100 m; 200 m; 500 m; \infty\}$). Ces images ont été normalisées à des fins d'affichage, nous utilisons pour les calculs les cartes de luminances générées par PROF. On notera que les images pour les plus faibles distances de visibilité sont assez ressemblantes. Cela est en partie dû à la normalisation d'affichage, les répartitions et niveaux d'énergie des cartes sont dissemblables.

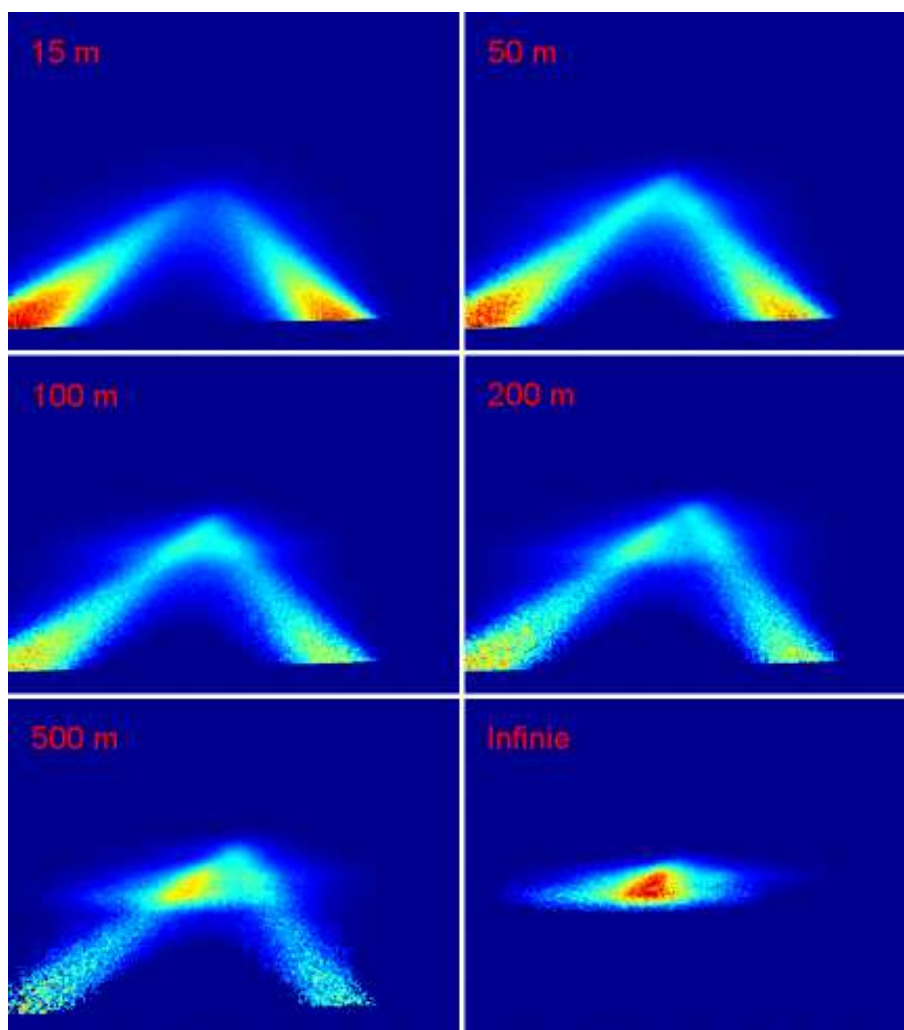


FIGURE 4.52 – Images de référence en fausses couleurs générées avec PROF pour différentes visibilités météorologiques comprises entre 15m et l’infini.

Le tableau 4.53 montre les corrélations normalisées centrées de ces images entre elles. De fait, certains couples ont une corrélation élevée, ce sont essentiellement les cartes de luminances correspondant aux faibles visibilités, la carte $V_{met} = 50 m$ en particulier est très corrélée avec les cartes $V_{met} = 15 m$ et $V_{met} = 100 m$. Il est rassurant de voir la faible corrélation entre $V_{met} = 15 m$ et $V_{met} = 500 m$ ou $V_{met} = \infty$. *A priori*, il serait envisageable d’associer les images les plus semblables à l’image PROF de $V_{met} = 15 m$ à une situation de brouillard et les images de la vidéo proches des images PROF avec $V_{met} = \infty$ seraient associées à l’absence de brouillard. Cela est confirmé par le fait que l’image PROF avec $V_{met} = 500 m$ présente un score intermédiaire entre les deux images PROF extrêmes (une image prise dans un brouillard de visibilité météorologique de $500m$ qui serait identique à l’image PROF avec $V_{met} = 500 m$ aurait un score intermédiaire entre brouillard et sans brouillard, or c’est approximativement la limite usuelle considérée entre les situations avec et sans brouillard).

Nous souhaitons comparer des images acquises en conditions embarquées à ce jeu d’images de référence. Ne disposant pas de séquences acquises en conditions écologiques à l’aide de notre

$V_{met} = 15 m$	1	0,97	0,94	0,85	0,64	0,10
$V_{met} = 50 m$	0,97	1	0,98	0,90	0,75	0,26
$V_{met} = 100 m$	0,94	0,98	1	0,92	0,80	0,37
$V_{met} = 200 m$	0,85	0,91	0,92	1	0,88	0,43
$V_{met} = 500 m$	0,64	0,75	0,80	0,88	1	0,65
$V_{met} = \infty$	0,10	0,26	0,37	0,43	0,65	1

FIGURE 4.53 – Tableau des scores de corrélation inter images de référence.

véhicule équipé d'une caméra, nous avons utilisé les ressources du réseau scientifique et technique de l'équipement et avons placé un véhicule équipé d'une caméra dans la salle de brouillard du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand. Nous décrivons dans la suite l'expérimentation nous ayant permis d'obtenir des images réelles dans le brouillard.

Séquences vidéo de référence : la chambre à brouillard

Cette chambre à brouillard est un outil de recherche permettant de simuler et de reproduire autant que nécessaires des conditions de visibilité dégradées telles que générées par des brouillards naturels. Elle fait partie des plus grandes installations existantes au niveau mondial dans le domaine de la production de brouillards artificiels, les autres salles d'envergure comparable ou supérieure se trouvent au Japon et aux États-Unis.

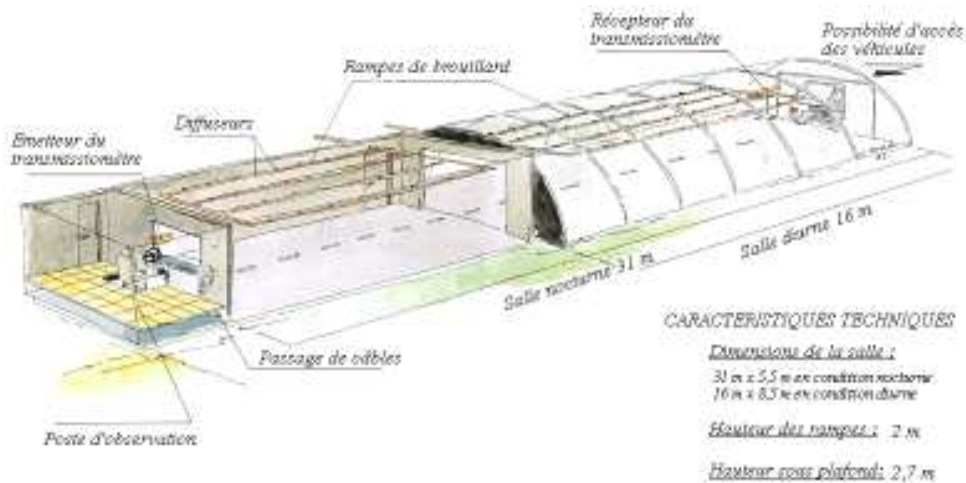


FIGURE 4.54 – Schéma de la chambre à brouillard du LRPC de Clermont-Ferrand.

Comme l'illustre le schéma de la figure 4.54, cette installation comprend un tunnel de 30 m de long et de 5,5 m de large dans lequel sont disposées des rampes d'injection situées à 2 m au dessus du sol afin de pulvériser de l'eau pour recréer un brouillard artificiel. La salle est équipée de deux transmissionmètres pour lesquels la distance entre l'émetteur et le récepteur est différente (12 m et 25 m) ainsi que d'un diffusomètre et d'un granulomètre. Un poste d'observation est séparé de la salle par une paroi vitrée permettant d'observer en conditions sèches l'intérieur de chambre à brouillard. L'installation est équipée d'un vidéo-luminancemètre ainsi que de petites caméras bas-coût (type webcam).

La production de brouillard est pilotée par ordinateur et peut éventuellement être asservie à l'un des deux transmissiomètres. Une condition expérimentale classique consiste à saturer la salle d'un brouillard très dense et ensuite laisser la dissipation faire son œuvre. En fonction des besoins, le brouillard peut être stabilisé à un niveau de densité par asservissement à l'un des transmissiomètres. Dans ce cas de courtes pulvérisations sont effectuées dès que la visibilité mesurée en temps réel chute en dessous du niveau fixé de régulation afin de maintenir la visibilité à ce niveau.

Bien que contrôlé artificiellement, le brouillard ainsi généré reste difficile à manipuler et à reproduire. La salle bien qu'isolée de l'extérieur reste dépendante d'un certain nombre de facteurs extérieurs tels que le rayonnement solaire, la température extérieure et le taux d'humidité de l'air. Ces paramètres peuvent influencer fortement sur la vitesse de dissipation des brouillards créés.

Parmi les possibilités techniques offertes par cette salle il faut noter la possibilité de travailler avec l'eau du réseau public de distribution aussi bien qu'avec de l'eau déminéralisée. La granulométrie des brouillards artificiels produits dans les salles de brouillard est nettement plus influencée par les propriétés physico-chimiques de l'eau que par d'autres paramètres tels que la pression d'injection ou le fonctionnement mécanique des injecteurs. Il est ainsi possible de recréer des brouillards proches de brouillards naturels de type radiatif ou proches de brouillards naturels de type advectif.

Dispositif

Nous cherchons à détecter le brouillard nocturne en nous appuyant sur des images prises par une caméra embarquée dans le véhicule et placée derrière le pare-brise. Nous avons fait pénétrer un véhicule dans la salle et l'avons équipé d'une caméra positionnée telle qu'elles le sont couramment dans nos véhicules d'essai. La caméra est orientée vers l'avant sans mise en œuvre particulière destinée à la détection de brouillard, son mode de fonctionnement n'est pas non plus adapté spécifiquement à la détection de brouillard (son positionnement et son mode de fonctionnement sont classiques en ce sens qu'ils doivent être adaptés au fonctionnement des algorithmes usuels embarqués tels que la détection des marquages, des piétons ou des obstacles en général).

Nous nous appuyons sur la rétrodiffusion des feux du véhicule telle que nous pouvons en voir un exemple sur la figure 4.55.



FIGURE 4.55 – Deux images de rétrodiffusion de la lumière des phares avec des densités de brouillard différentes dans la salle de brouillard de Clermont-ferrand (brouillard plus dense à gauche qu'à droite).

Nous disposons de séquences vidéo obtenues avec une caméra Philips-SPC2050NC placée dans une Renault Clio 2 dans la salle de brouillard. Les séquences vidéo que nous avons acquises correspondent systématiquement à des dissipations de brouillard. Le début des séquences a lieu dans un brouillard plus dense que la fin tel qu'illustré sur la figure 4.55. Nous disposons de séquences prises dans des brouillards présentant des distributions de diamètres de gouttelettes différentes (brouillards assimilables à des brouillards d'advection et de rayonnement).

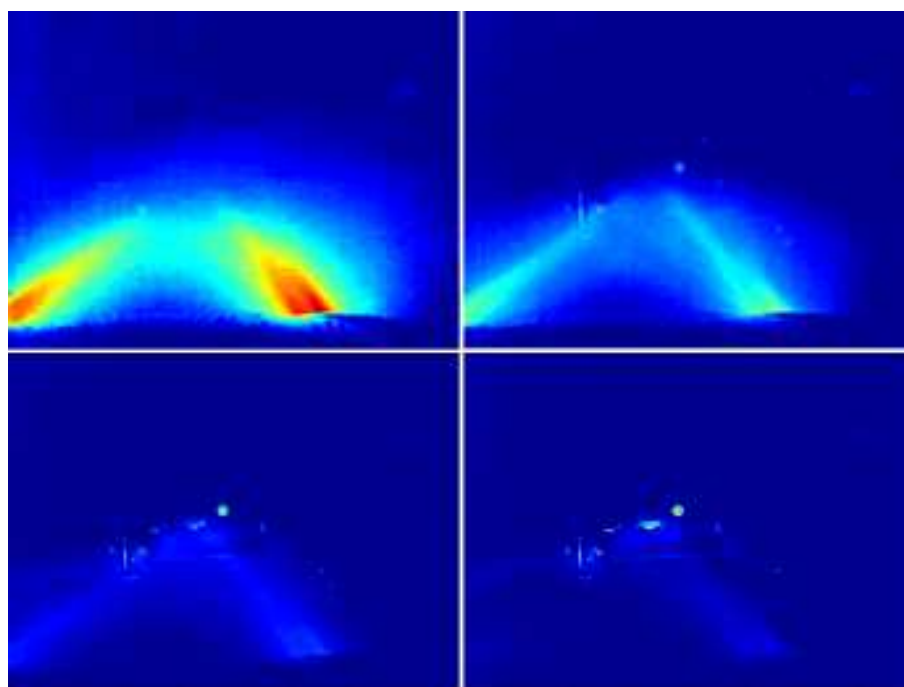


FIGURE 4.56 – Images en fausses couleurs extraites de la vidéo au cours d'une dissipation de brouillard.

Nous proposons de nous appuyer sur les différentes méthodes de calcul permettant de calculer un score de corrélation ou une distance inter-image pour estimer de quelle image de référence se rapproche le plus une image vidéo dans le brouillard.

Comparaison d'images vidéo et d'images de synthèse

Nous disposons à présent d'un jeu d'images de synthèse de référence et d'images issues de la séquence vidéo. Nous souhaitons les comparer entre elles et détecter l'image de référence présentant la plus grande similarité avec l'image vidéo.

Nous avons testé différentes mesures de corrélation parmi les plus utilisées telles que SAD⁴ qui mesure l'écart en valeur absolue entre l'intensité des pixels de chaque image, SSD⁵ qui repose quant à lui sur la distance euclidienne entre les vecteurs d'intensité des deux images à comparer. Ces deux scores sont des mesures de dissimilarité et valent 0 si les deux images sont identiques. Ils offrent d'ailleurs des performances assez comparables et le choix de l'un ou de l'autre repose essentiellement sur le coût calculatoire induit par un calcul de valeur absolue ou d'élévation

4. Sum of Absolute Differences

5. Sum of Squared Differences

au carré. Nous montrons l'évolution de ces scores lorsque l'image vidéo entière est comparée à l'image PROF entière.

Les formulations des scores SAD et SSD sont sensibles aux différences d'illumination entre les deux caméras. Ceci peut être un problème majeur en conditions embarquées puisque les caméras ajustent leur exposition à la scène (*cf.* Sec.4.3 sur le réglage des caméras), un véhicule de face ou une source dans la scène peuvent modifier le niveau global de l'image et fausser ces mesures instantanément. De plus, les valeurs des cartes de luminances de PROF sont directement reliées à des niveaux d'énergie dans la scène virtuelle alors que les images vidéo acquises ont été modifiées par la fonction gamma de la caméra. Nous sommes obligés de ramener les images dans la même dynamique pour les comparer entre elles. Les images vidéo ont été normalisées dans $[0; 1]$ en ramenant les valeurs de $[0; 255]$ dans $[0; 1]$ tandis que les images PROF ont été ramenées par rapport à leur maximum. Les images tirées des cartes de luminances n'ont donc pas subi un processus de transformation similaire à la transformation des niveaux d'énergie en niveaux numériques sur une caméra réelle. Afin de pouvoir mieux comparer ces images entre elles deux choix s'offrent à nous. Premièrement nous pouvons ramener les valeurs des images vidéo dans une échelle linéaire en énergie (correction gamma inverse). Deuxièmement, nous pouvons appliquer des transformations simulant toutes les phases d'une chaîne d'acquisition vidéo aux images PROF (exposition/niveau moyen, bruit thermique ajouté, correction gamma caméra).

La deuxième solution est complexe. Elle demande de connaître le fonctionnement et l'asservissement de l'auto-iris de la caméra ou du logiciel qui pilote son exposition. Elle demande également de connaître certaines caractéristiques du capteur afin de simuler les différentes sources de bruit dégradant l'image. Enfin, elle demande de connaître la fonction de transfert utilisée lors de la conversion des valeurs analogiques en valeurs numériques. La première solution en revanche ne demande que de connaître la fonction de transfert de la caméra. En inversant le gamma de l'image vidéo, on s'assure qu'elle contient des valeurs proportionnelles à des luminances. Les images vidéo et les images PROF peuvent tout de même présenter une forte dissimilarité du fait de niveaux moyens très différents étant donné qu'on ignore la méthode automatique d'exposition de la caméra. Cette faiblesse peut être corrigée en recentrant les intensités des points d'une image sur la moyenne de luminance de celle-ci.

Le score SAD n'est pas borné, en valeur absolue il ne renseigne pas sur le niveau de corrélation de deux images. De plus, ce score n'est pas invariant par rapport à la dynamique des images (exprimées entre 0 et 1, sur 8 *bits*, 12 *bits*, *etc.*). En l'occurrence, sur la figure 4.57(a), on pourra observer le score SAD pour les images PROF normalisées entre 0 et 1 et pour l'image vidéo également normalisée. Quelles que soient les images PROF auxquelles nous corrélons la vidéo, les scores totaux de différence de niveaux sont plus élevés en début de séquence lorsque la visibilité est faible. Cela est dû au niveau moyen de l'image, plus faible en fin de séquence puisqu'il n'y a plus de rétrodiffusion. Ce qui nous intéresse dans le score SAD est le score minimal entre une image vidéo et un image issue de PROF. Nous montrons dans la figure 4.57(b) les scores SAD auxquels on a soustrait le score minimal. Sur le différentiel de score SAD, il y a toujours un score à 0, c'est le score minimal qui correspond à la paire la plus semblable. En début de séquence, jusqu'à ce que la visibilité dépasse 20 *m* c'est l'image PROF générée avec une visibilité météorologique de $V_{met} = 15 \text{ m}$ qui est la mieux corrélée avec la vidéo, ensuite lorsque la visibilité est comprise entre 20 *m* et 170 *m*, c'est l'image PROF avec $V_{met} = 100 \text{ m}$ qui est la mieux corrélée, enfin, au delà de 170 *m* de visibilité météorologique mesurée, c'est l'image PROF générée avec une visibilité météorologique infinie qui est la plus semblable. Ceci va plutôt dans le sens des attentes de corrélation entre images de synthèse et images vidéo.

Lorsque l'on ne souhaite pas pâtir des défauts liés à l'alignement de niveau des deux images

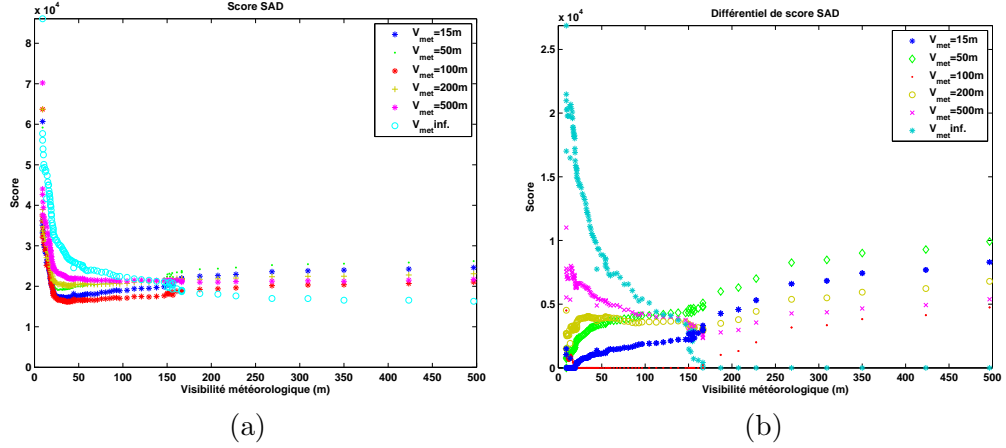


FIGURE 4.57 – Score selon le critère SAD (a) et différentiel de score SAD (b).

des méthodes SAD, SSD, on peut essayer d'utiliser des critères centrés tels que ZSSD⁶ et ZSAD⁷. Mais bien que centrés, ces scores présentent les mêmes défauts que SAD et SSD, ils ne sont pas bornés et dépendent de la dynamique de l'image (donc fortement des paramètres d'exposition de la caméra). Le critère ZNSSD⁸ est une variante du critère ZSSD. Il permet de travailler sur des données centrées et normalisées en variance, de façon à prendre également en compte une éventuelle différence de gain entre les deux images, il est considéré comme le plus robuste de ces critères. Sa valeur tend vers 1 en cas d'identité entre les deux images et vers -1 lorsqu'une image est l'opposée de l'autre. C'est en définitive le score ZNSSD qui a été retenu pour la détection de brouillard en raison de ses propriétés d'invariance par rapport au niveau d'exposition et au gain de la caméra. Pour une image de référence $Iref$ et une image vidéo extraite de la caméra $Ivid$ il est tel que :

$$ZNSSD = \frac{\sum_x \sum_y (Iref_{xy} - \overline{Iref_{xy}})(Ivid_{xy} - \overline{Ivid_{xy}})}{\sqrt{\left(\sum_x \sum_y (Iref_{xy} - \overline{Iref_{xy}})^2\right) \left(\sum_x \sum_y (Ivid_{xy} - \overline{Ivid_{xy}})^2\right)}} \quad (4.13)$$

Nous présentons sur la figure 4.58 les résultats de corrélation par le score ZNSSD sur deux séquences vidéo d'environ huit minutes effectuées lors d'une dissipation complète de brouillard. Les résultats sont nettement plus satisfaisants qu'avec le score SAD. Les images les mieux corrélées en début de séquences sont celles générées par PROF avec une faible visibilité météorologique et elles décroissent au fur et à mesure de la dissipation. Celle générée avec une V_{met} infinie à tendance à être de mieux en mieux corrélée avec les vidéo au cours de la dissipation.

Comme on peut le voir sur la figure 4.58 (a) et (b), les scores sont strictement positifs quels que soient la séquence vidéo et quelle que soit l'image PROF de référence utilisée. Les différents scores évoluent plutôt dans le sens attendu. La corrélation augmente entre la vidéo et l'image PROF de visibilité météorologique infinie au cours de la dissipation et les scores des images PROF contenant du brouillard ont tendance à être moins corrélées avec la vidéo au cours de la dissipation. Si tous les scores sont positifs, c'est en partie du fait que nous comparons l'intégralité des images entre elles. En effet, dans la partie supérieure et sur les bords des images, que ce soit sur la vidéo ou dans les images PROF, la plupart des pixels sont à un niveau très bas. Les

6. Zero-mean Sum of Squared Differences

7. Zero-mean Sum of Absolute Differences

8. Zero-mean Normalized Sum of Squared Differences

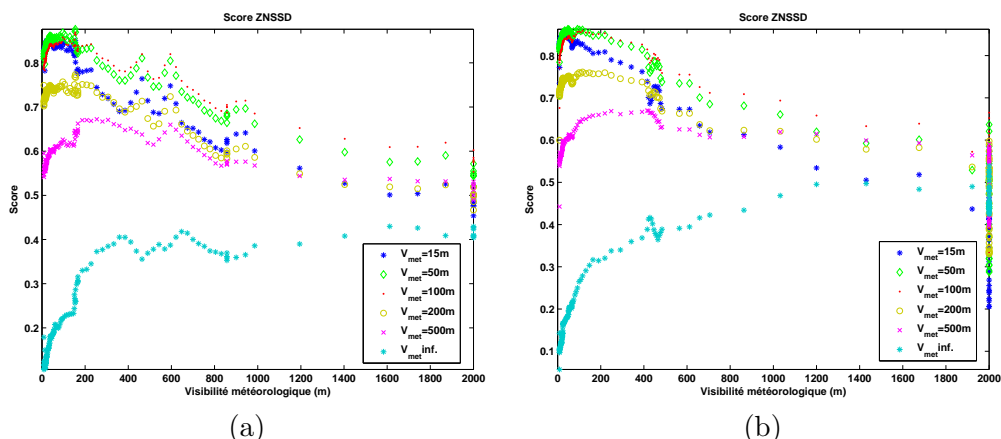


FIGURE 4.58 – Score selon le critère ZNSSD sur deux séquences vidéo acquises au cours d’une dissipation de brouillard.

images vidéo et les images PROF contiennent au moins une moitié de leurs pixels corrélés entre eux du fait qu’on se place dans une scène dans le noir.

On peut constater, aussi bien sur les images PROF que sur les images extraites de la vidéo, un transfert des intensités les plus élevées du bas de l’image vers le lieu où visent les phares en conjonction avec l’augmentation de la visibilité météorologique. Autant, PROF suffit amplement à simuler une image en conditions de brouillard dense puisqu’on ne voit pratiquement que la rétrodiffusion et non l’environnement ; autant, il est impossible de simuler dans le détail l’infinie variété des images possibles en absence de brouillard. L’image PROF peut être très différente de l’image vidéo en fonction de la scène, en particulier lorsque la visibilité météorologique est bonne. On ne souhaite pas comparer tous les pixels en dehors de la trace de rétrodiffusion. Soit ils sont de faible intensité et sont souvent corrélés entre les deux images, soit ils peuvent être très dépendants de la scène et ne seront pas corrélés entre la vidéo et les images PROF. Nous avons donc sélectionné les 10 % et 15 % des pixels les plus intenses des diverses images PROF et les avons concaténés pour en faire deux masques sous lesquels nous souhaitons comparer nos images. Ces deux masques sont présentés sur la figure 4.59.

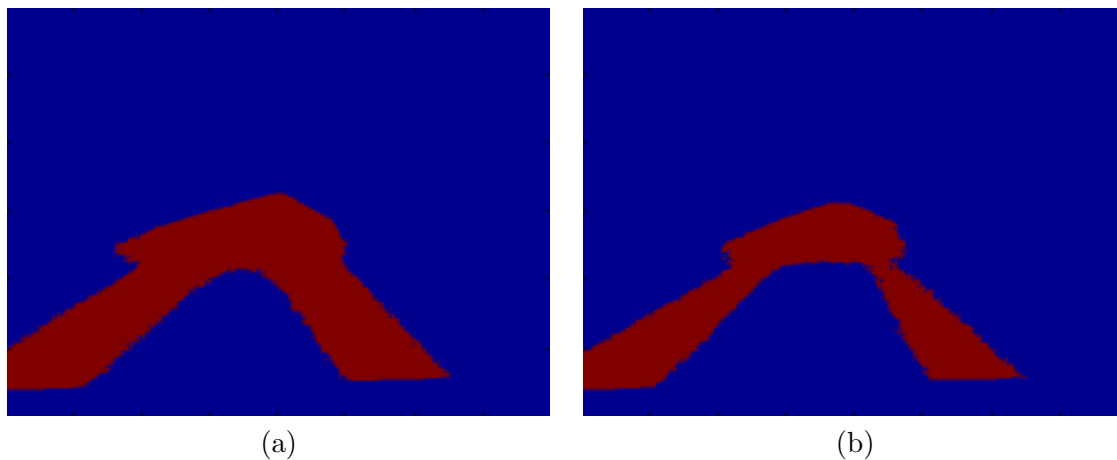


FIGURE 4.59 – Masques correspondant aux 15 % (a) et 10 % (b) des pixels les plus intenses des cartes de luminances générées avec PROF.

Nous pouvons calculer notre score de corrélation dans la zone du masque non nulle (zone rouges sur les figures 4.59(a) et (b)). Nous présentons sur la figure 4.60 les résultats du score ZNSSD sous le masque le plus grand.

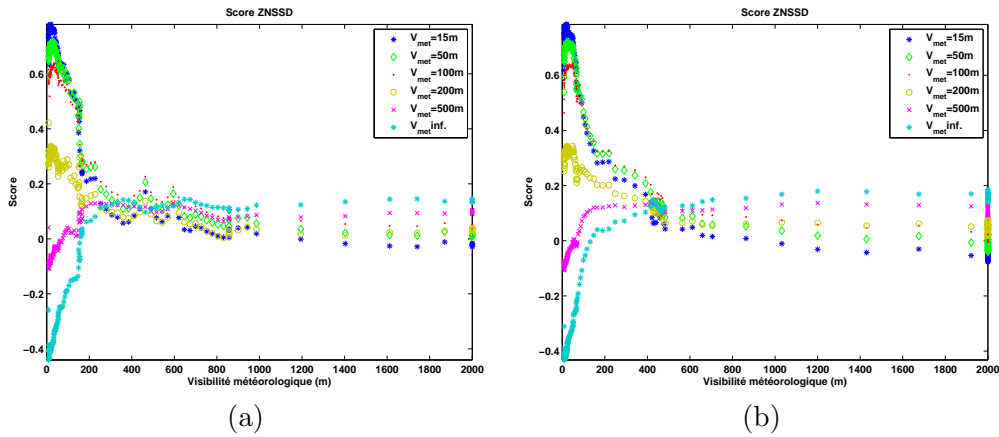


FIGURE 4.60 – Score ZNSSD calculé sur deux vidéos à l’intérieur du masque contenant les 15 % de pixels les plus lumineux.

Les résultats sont très satisfaisants, les images vidéo de début de séquence, lorsque le brouillard est dense, sont corrélées positivement avec les images PROF présentant une faible visibilité météorologique ($V_{met} < 100 m$) et la corrélation est négative avec les images PROF présentant de grandes distances de visibilité météorologiques ($V_{met} = 500 m$ et V_{met} infinie). Inversement, une fois que le brouillard s’est dissipé, les images PROF avec de grandes visibilités météorologiques sont corrélées positivement avec les images vidéo et les images PROF de faibles visibilité météorologique sont corrélées négativement.

Si on se focalise un peu plus sur les zones les plus intenses des images PROF en sélectionnant le masque ne contenant que les 10 % de pixels les plus lumineux, les résultats sont encore plus clairs. L’adéquation entre le jeu d’images de référence générées avec PROF et l’évolution de l’éclairement dans une scène réelle présentant du brouillard est vérifiée comme c’est illustré sur la figure 4.61.

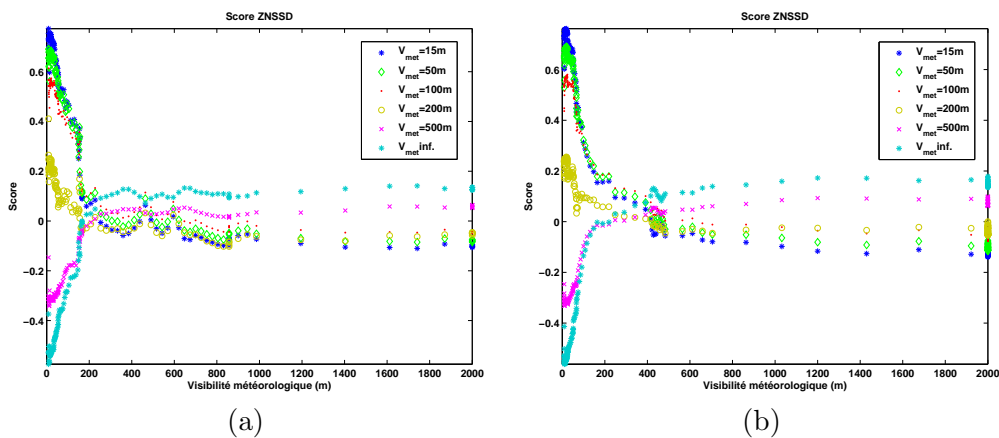


FIGURE 4.61 – Score ZNSSD calculé sur deux vidéos à l’intérieur du masque contenant les 10 % de pixels les plus lumineux.

La corrélation à l'intérieur du masque reflète bien le fait qu'en présence de brouillard la distribution de lumière est proche de la source d'émission, en bas de l'image dans le volume de l'espace de la scène éclairé par les feux. En absence de brouillard en revanche, c'est bien le lieu où visent les feux qui est éclairé et non l'atmosphère et les niveaux de lumière augmentent vers le haut de l'image au détriment du bas. Nous pouvons voir qu'après dissipation complète du brouillard, les différents scores sont tous dissociés et la corrélation avec l'image PROF générée avec une V_{met} infinie est stable et reste la meilleure. Comme avec le masque large, à partir d'environ 400 m à 500 m, c'est clairement la corrélation avec l'image PROF sans brouillard qui a la meilleure corrélation avec la vidéo dès lors que la trace de rétrodiffusion devient suffisamment ténue face à la réflexion de la scène éclairée par les feux. Nous pouvons nous appuyer sur le fait que le score de corrélation ZNSSD avec l'image PROF sans brouillard soit la mieux corrélée avec la vidéo parmi les différentes images PROF pour affirmer ou infirmer la présence de brouillard.

Nous avons souhaité observer quelle était la dépendance de ce critère de détection par le score de corrélation ZNSSD en fonction des optiques des feux utilisés. Nous avons simulé des images de référence PROF en utilisant des diagrammes d'intensité directionnels mesurés sur des feux de dernière génération à technologie au xénon et halogène. Le score est estimé en procédant selon la même méthodologie qu'avec la référence de feux UMTRI. Nous avons généré des images de référence PROF en utilisant la même gamme de coefficients d'absorption (correspondants à des visibilités météorologiques de 15 m à l'infini). Nous avons calculé le masque contenant les 10% les plus intenses des images PROF et corrélon les images vidéo et les images de synthèse sous le masque. Les résultats de ces scores sont illustrés sur la figure 4.62.

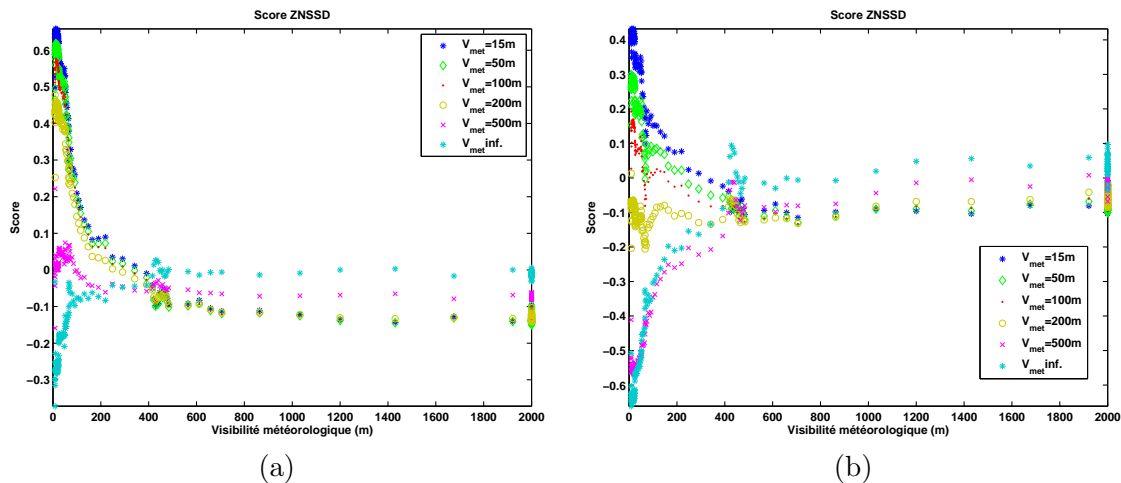


FIGURE 4.62 – Score ZNSSD calculé l'intérieur du masque contenant les 10 % de pixels les plus lumineux dans une scène illuminée par des feux au xénon (a) ou halogènes (b).

Comme nous pouvons le voir au delà de 400 m de distance de visibilité météorologique, c'est l'image PROF de V_{met} infinie qui est la mieux corrélée avec les images vidéos. De même que pour les images générées avec les diagrammes d'intensité médians des feux UMTRI, lorsque le brouillard est très dense ($V_{met} < 80m$) c'est l'image PROF générée avec $V_{met} = 15 m$ qui est la mieux corrélée. En revanche sur la figure 4.62, l'image PROF de $V_{met} = 15 m$ reste la mieux corrélée avec la vidéo jusqu'à environ 400 m de distance de visibilité. L'inversion d'une meilleure corrélation entre les images PROF avec brouillard et la vidéo lorsque la visibilité météorologique est inférieure à 400 m, vers une meilleure corrélation de la vidéo avec l'image PROF sans brouillard lorsque la visibilité est supérieure à 400 m, est stable.

On peut en conclure que le diagramme directionnel d'intensité n'a pas un impact prépondérant sur le score de corrélation et en particulier sur le moment de l'inversion des scores des images PROF avec et sans brouillard. En revanche, il peut avoir un impact sur les images PROF les mieux corrélées en présence de brouillard. Le fait que les scores soient moins bons entre les feux xénon ou halogène et la vidéo qu'entre les diagrammes d'intensité médians UMTRI et la vidéo, nous enseigne également que le diagramme d'intensité médian UMTRI est adapté à la comparaison avec des feux quelconques. Il serait intéressant d'observer si l'utilisation dans PROF du diagramme d'intensité réel des feux du véhicule de la vidéo dans leur référentiel améliorerait la corrélation des images PROF de V_{met} intermédiaire lors d'une dissipation de brouillard.

Le comportement relatifs des différents scores ZNSSD montre un comportement clair d'inversion relative entre présence et absence de brouillard. Dès lors qu'une trace de rétrodiffusion est présente, le score obtenu avec l'image PROF sans brouillard n'est plus le meilleur. Cependant le niveau de basculement entre les scores varie de 250 m à 400 m entre les deux vidéos (cf. Fig. 4.61). Il semble qu'il y ait eu une chute brutale de la visibilité lors de la première vidéo. Il serait intéressant, au travers de tests complémentaires, de vérifier si le point d'alternance entre scores de corrélation des images PROF avec et sans brouillard est plus stable lors de dissipation douces. Notre critère de détection est que le score de ZNSSD de l'image PROF sans brouillard soit supérieur à tous les autres.

4.3.8 Caractérisation embarquée du brouillard nocturne par la rétrodiffusion

Non seulement le brouillard est difficile à reproduire en conditions de laboratoire, mais comme nous l'avons souligné les matériels de mesure ont un biais de mesure dont nous ne connaissons pas l'influence dans les brouillards que nous avons générés dans la chambre à brouillard. Il serait intéressant d'acquérir de nouvelles vidéos en utilisant deux transmissiomètres utilisant une base différente pour estimer une distance de visibilité moins biaisée. De plus, nous avons effectué les expériences en laissant le transmissiomètre sur son pied de laboratoire, à environ 1 m de hauteur. Or, dans la salle de brouillard, du fait de l'absence de vent et de la méthode utilisée pour créer le brouillard, celui-ci a tendance à fortement sédimenter. Il se constitue en couches plus denses à proximité du sol. De ce fait, il y a probablement un autre décalage permanent entre l'estimation de la visibilité météorologique par les transmissiomètres et la densité de brouillard devant les feux.

La figure 4.63 présente un agrandissement de la figure 4.61 pour les scores positifs compris entre 0 et 500 m de visibilité météorologique.

Dans les figure 4.63(a) et (b), le meilleur score de corrélation au delà de 500 m de visibilité météorologique est toujours pour l'image PROF avec V_{met} infinie. Sur la première vidéo, l'image PROF de V_{met} infinie obtient le meilleur score à partir de 250 m de visibilité mesurée et à partir de 400m sur la deuxième vidéo. On peut voir que l'image PROF avec $V_{met} = 15$ m est toujours la mieux corrélée avec la vidéo lorsque la visibilité est inférieure à 100 m. Les images PROF avec $V_{met} = 50$ m et $V_{met} = 100$ m sont le plus souvent les mieux corrélées avec la vidéo lorsque la visibilité est comprise entre 100 m et 400 m. On peut tout de même distinguer deux classes en s'appuyant sur le fait que c'est toujours l'image PROF de $V_{met} = 15$ m qui est la mieux corrélée en cas de brouillards très denses ($V_{met} < 100$ m).

Lorsque nous sommes en présence de brouillard (quand le score ZNSSD entre la vidéo et l'image PROF avec V_{met} infinie n'a pas le meilleur score), nous pouvons faire une catégorisation « brouillard très dense » vs. « brouillard » en nous appuyant sur le fait que le score ZNSSD entre la vidéo et l'image PROF de $V_{met} = 15$ m soit ou non le meilleur. Nous serions en mesure de renseigner trois classes potentielles en conditions embarquées : « inférieur à 100 m » « inférieur à

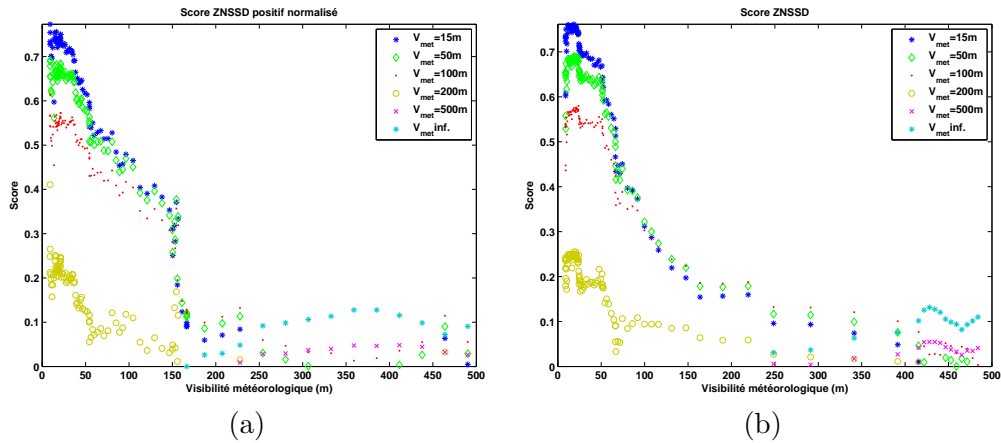


FIGURE 4.63 – Score ZNSSD pour les brouillards denses calculé sur deux vidéos à l’intérieur du masque contenant les 10 % de pixels les plus lumineux.

300 m » et non brouillard. Des tests complémentaires dans des conditions écologiques en présence d’un vrai brouillard, tout en mesurant sa densité, seraient nécessaire pour confirmer et affiner ces classes.

Dans la gamme de densités de brouillards intermédiaires nous n’avons pas de meilleur score stable. Il faut noter que l’image PROF avec $V_{met} = 200\text{ m}$ n’est jamais la mieux corrélée avec l’image vidéo. Nous pensons qu’il faudra explorer quelles sont les améliorations dans les images de référence PROF qui permettraient une meilleure adéquation aux images vidéo, par un meilleur positionnement dans la scène virtuelle de la caméra relativement aux feux, par un réglage de l’orientation des feux virtuels qui soit plus proche de celle du véhicule et par l’utilisation de diagrammes d’intensité directionnels des feux plus proches de ceux des feux réels du véhicule. Il serait également envisageable d’utiliser des images de références non pas issues de la synthèse d’images mais issues d’expérimentations dans le brouillard.

Si nous améliorons l’adéquation entre les simulations PROF et la réalité en tenant compte du positionnement précis de la caméra, voire des propriétés photométriques des feux du véhicule, nous pensons qu’il doit être possible d’améliorer la classification de la densité de brouillard et de voir s’alterner les différentes images PROF avec le meilleur score au cours d’une dissipation. Comme pour la détection et la caractérisation de brouillard fondée sur la présence de halos, le fait de disposer de séquences de routes réelles et d’une mesure simultanée de la densité de brouillard, nous permettrait de vérifier la stabilité des critères de détection. Cela nous permettrait aussi de fixer des seuils pour la caractérisation et ainsi déterminer si les classes discriminées le sont de façon stable dans des séquences réelles.

Comme pour la détection de halos, nous n’avons pas de contrainte temporelle très forte telle qu’une fréquence d’estimation élevée. On pourra sûrement améliorer la stabilité et la robustesse des critères en s’appuyant sur plusieurs images consécutives, voire en calculant la corrélation en aval d’un traitement temporel de la séquence d’images (image moyenne temporelle ou autre).

Afin de définir des critères stables et fiables pour la caractérisation de brouillard, nous souhaitons pouvoir associer une mesure physique caractérisant le brouillard aux séquences que nous ferons à l’avenir. Pour cela, nous proposons d’effectuer une mesure statique sur notre site d’essai en extérieur avant de faire une acquisition vidéo sur la piste adjacente au site. Nous pourrions tester immédiatement sur le site de test notre méthode fondée sur la rétrodiffusion. En revanche, comme il nous faut nous déplacer vers des environnements urbains pour tester la méthodes fon-

dée sur les halos, nous ne disposerons pas d'une vérité terrain en temps réel localisée autour du véhicule, néanmoins nous aurons une idée de la densité du brouillard environnant.

4.3.9 Caractérisation du brouillard de nuit par une méthode statique

Comme nous l'avons fait remarquer à plusieurs reprises, il nous serait très utile de disposer d'une méthode simple nous permettant de caractériser le brouillard de nuit afin de disposer d'une référence météorologique pour analyser nos méthodes de caractérisation dynamiques par la rétrodiffusion et par les halos. Le fait de disposer d'une référence de la visibilité météorologique nous permettrait d'une part de nous assurer que les deux algorithmes ont bien un niveau de détection qui soit le même et qui soit si possible celui des définitions d'une « visibilité atmosphérique routière dégagée » soit 400 *m* (ou 500 *m* pour les normes anglo-saxonnes). Ces références de visibilité météorologiques nous permettraient également de vérifier si le moyennage temporel de la caractéristique Br_{50} ou le meilleur score de corrélation ZNSSD sont des critères stables et qui peuvent être associés à des distances de visibilité météorologique afin d'améliorer la caractérisation embarquée.

Réalisation et exploitation d'un site de test dédié

Le site est situé en extérieur et le matériel ne peut être positionné de façon permanente sur le site. Il nous faut donc un système qui soit transportable, rapide à mettre en œuvre, autonome en énergie et capable de faire une mesure instantanée de la densité de brouillard. Nous disposons en outre d'un appareil photographique Nikon D700 capable d'acquérir des images sur 14 *bits* de dynamique. Nous comptons utiliser cet appareil photographique tel un luminancemètre matriciel afin de mesurer l'intensité de multiples sources de lumière ponctuelles dont les positions sont connues. Le site tel qu'il est équipé actuellement permet d'estimer la densité de brouillard de jour. Nous souhaitons l'équiper de telle sorte qu'il soit également possible de caractériser le brouillard de nuit. Pour cela nous proposons de disposer trois sources de lumière à 33 *m*, 80 *m* et 200 *m* tel qu'illustré sur la figure 4.64.



FIGURE 4.64 – Site de test et simulation PROF des sources de lumière à leurs positions envisagées.

Les sources de lumière sont des ampoules de petite taille et peu lumineuses. Nous avons utilisé des ampoules halogènes basse consommation fonctionnant en 12 *V* et ne consommant que 15 *Watts* d'énergie électrique (dispensant environ 500 *lumens*). Mais des ampoules à incandescence telles celles de feux de véhicule pourraient tout à fait convenir pour peu qu'elles soient protégées

au niveau de l'alimentation pour des environnements très humides. Les sources de moindre intensité sont préférées car dès que l'intensité des sources devient trop élevée, même à de distances de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres, leur intensité peut saturer le capteur quelque soient les réglages d'exposition (*cf.* la problématique d'estimation de l'intensité d'une source dans sa direction évoqué chapitre 4, Sec. 4.3, p.126 et Sec. 4.3.2, p.128).

Il est également important de prendre des sources présentant le plus petit filament possible et un verre de protection le plus sphérique possible afin que l'hypothèse d'une source de lumière ponctuelle soit valide. De plus, si la source émet de façon isotrope, nous n'avons pas à nous soucier des problématiques d'alignement optique entre les sources de lumière et l'appareil lors des tests. Cela procure un gain de temps et une simplicité d'exploitation du procédé de caractérisation statique.

Les ampoules basse consommation présentent en outre l'avantage de pouvoir être alimentées directement par des batteries de véhicules, facilement transportables. Il devient alors simple d'avoir des sources de lumière isotropes autonomes et à des distances connues en les plaçant en des lieux du site préalablement déterminés.

Simulation de sources de lumières sur site expérimental

Nous avons utilisé le logiciel de simulation PROF afin d'apprécier quelle configuration de sources sur notre site nous permettrait à la fois de caractériser la gamme de visibilités météorologiques d'intérêt ($30\text{ m} \sim 400\text{ m}$), tout en s'assurant que le halo autour d'une source proche n'interférerait pas avec la mesure de l'intensité d'une source lointaine (*cf.* figure 4.64(b)).

Nous avons simulé une scène très simple avec trois sources au dessus d'un asphalte (surface lambertienne de 10 % de réflexion). Nous avons pu vérifier que les diffusions simples et multiples autour des sources ainsi que le sol sombre n'interféraient pas avec les mesures d'intensité dans la direction des sources. De telles cartes de luminance peuvent aussi être calculées en s'appuyant sur le modèle décrit au chapitre 3, section 3.4.3 page 105, en s'appuyant sur la théorie du filtrage linéaire. Dans ce cas nous convoluons une image étendue (pixels avec des intensités et des distances associées) avec la Point Spread Function (PSF) de l'atmosphère. La PSF est la transformée de Fourier inverse de la FTM d'une tranche de brouillard. Elle dépend de la transmittance du milieu T ($T = kd$). Connaissant l'intensité et la distance pour chaque pixel, nous calculons l'apparence d'une scène en présence de brouillard.

Approche classique de caractérisation du brouillard

Dans cette configuration des sources et du site, la luminance du brouillard peut être négligée. Seules trois sources sont présentes dans l'environnement et les niveaux de luminance de la scène sont plusieurs ordres de grandeur plus petits que les niveaux en direction des sources. la figure 4.64(b) a été modifiée à des fins d'affichage. Comme nous ne nous intéressons qu'au phénomène d'atténuation en observant que les aspects énergétiques des images en direction des sources, nous n'étudions pas le halo. En négligeant la deuxième partie de l'équation 4.14 (déjà présentée Chap. 3, Eq. 3.25, p. 105) décrivant les effets du brouillard sur une source de lumière :

$$L_s(d) = L_s(0)e^{-kd} + L_s(0) * F^{-1}\{M^{kd} - e^{-kd}\} \quad (4.14)$$

Nous obtenons la description classique de l'atténuation décrite par l'équation de Beer-Lambert (déjà présentée Chap. 3, Eq. 3.17) :

$$E = I.e^{-kd} \quad (4.15)$$

Ce modèle est limité pour deux raisons. Premièrement les gouttelettes d'eau ne sont pas complètement absorbantes, et comme l'albédo de l'eau est pratiquement 1 et que la taille des gouttelettes d'eau peut excéder de 10 fois les longueurs d'onde de la lumière, la plupart de l'énergie est diffusée et non absorbée. En particulier, l'énergie est diffusée essentiellement vers l'avant. Le deuxième défaut de ce modèle pour décrire le brouillard, moins important, est qu'il ne tient pas compte des diffusions multiples. Ici, nous n'exploitons que le phénomène d'atténuation non la diffusion simple/multiple pour extraire des informations sur le brouillard. Nous utilisons l'équation 4.15 afin d'estimer le coefficient d'absorption k .

Nous disposons des trois sources sur le site, nous illustrons sur la figure 4.65 pour la plus proche de ces sources (33 m), les luminances mesurées sur nos cartes de luminances pour des V_{met} comprises entre 66 m et 200 m. Ces courbes obtenues par PROF ont été générées en utilisant des distributions granulométriques suivant le modèle de Shettle et Fenn (*cf.* Chap. 3, Fig. 3.23, p. 102). D'après les quatre distributions granulométriques typiques de brouillards d'advection et de rayonnement, des fonctions de phase équivalentes ont été calculées pour chaque distribution granulométrique selon la théorie de Mie.

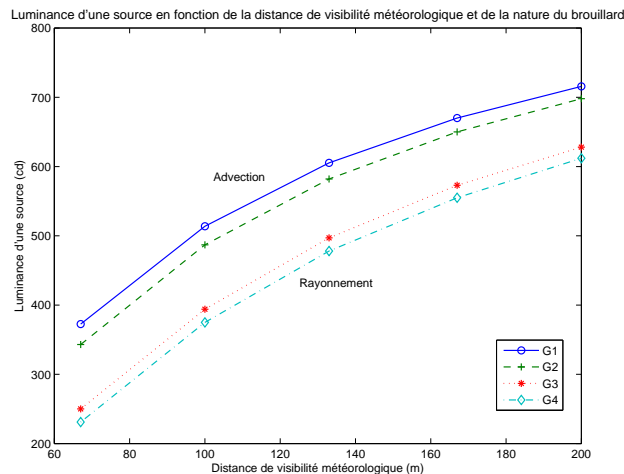


FIGURE 4.65 – Luminance d'une source à 33 m dans 4 brouillards différents en fonction de V_{met} .

Il faut noter, en particulier, qu'en présence d'une très faible visibilité météorologique, l'influence relative sur les luminances observées de la distribution granulométrique des gouttelettes devient plus importante. Pour une source à 33 m et une visibilité météorologique de 66 m, la luminance perçue d'une source dirigée de 900 cd est d'environ 220 cd pour un brouillard radiatif composé de très petites gouttelettes alors qu'elle sera d'environ 390 cd si c'est un brouillard d'advection composé de grosses gouttelettes. La luminance perçue est 180% plus élevée pour un brouillard d'advection.

Modèle à deux sources

D'après l'équation , en utilisant deux sources de lumière L_i et L_j , d'exaltances $L_i(0)$ et $L_j(0)$ à deux distances d_i et d_j , nous pouvons estimer k tel que :

$$k = \frac{\ln\left(\frac{L_i L_j(0)}{L_j L_i(0)}\right)}{d_j - d_i}, \quad \text{et si } L_i(0) = L_j(0) \text{ alors} \quad k = \frac{\ln(L_i/L_j)}{d_j - d_i} \quad (4.16)$$

Pour une paire de sources de lumière identiques positionnées à 80 m et 200 m, nous illustrons sur la figure 4.66 l'estimation de la visibilité météorologique en fonction de la visibilité météorologique V_{met} réelle. Pour une visibilité météorologique réglée dans PROF à 60 m (coefficient d'extinction de $0,05 \text{ m}^{-1}$), une source dirigée de 900 cd à 30 m qui devrait être atténuée à un niveau de 200 cd est vue avec un niveau de 220 cd dans un brouillard de rayonnement. Le coefficient d'absorption est sous-estimé et la visibilité météorologique surestimée. Cet effet est encore plus fort pour les brouillards d'advection.

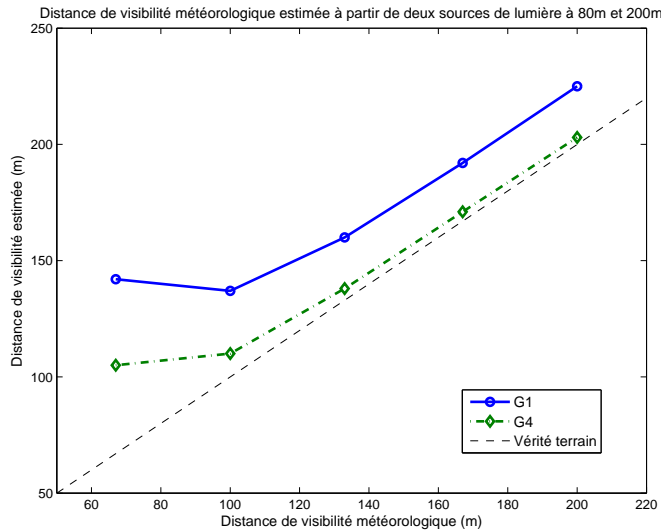


FIGURE 4.66 – Distance de visibilité météorologique estimée avec deux sources à 80 m et 200 m.

Pour un brouillard de rayonnement de type G4 (petites particules, mode du diamètre de la distribution granulométrique des gouttelettes inférieur à $2 \mu\text{m}$), la diffusion en avant n'est pas très importante et le modèle d'extinction de Beer-Lambert est valide, avec une erreur sur l'estimation de k (et donc de la V_{met}) qui dépend de la transmittance de l'atmosphère. Dans notre exemple, l'erreur est inférieure à 10 % pour les densités faibles à moyenne et atteint 50 % pour les brouillards les plus denses. Pour un brouillard d'advection tel que le brouillard G1 (grosses gouttelettes, le mode du diamètre des gouttelettes est supérieur à $3 \mu\text{m}$), la plupart de l'énergie est diffusée vers l'avant. L'erreur est plus importante que pour un brouillard de rayonnement et dépend également de k . Dans notre exemple, l'erreur est supérieure à 100 % pour les brouillards très denses (faibles V_{met}). Cela montre que l'estimation de k est biaisée en fonction de la position des sources et que ce biais provient de l'importance de la diffusion avant par les gouttelettes. Ces niveaux d'erreurs sont trop importants pour pouvoir exploiter ces résultats comme vérité terrain. Pour les améliorer nous proposons d'utiliser 3 sources.

Modèle à n sources

La gamme des brouillards que nous pouvons caractériser dépend de la distance des sources à l'observateur. Les principaux problèmes que nous rencontrons sont dans les cas de brouillard très denses. Mais dans le cadre d'applications à la sécurité routière les distances de visibilité sont critiques et doivent être correctement estimées.

Composition par les sensibilités

En utilisant trois sources, nous pouvons calculer trois estimations de k , donc trois estimations de la V_{met} . Nous proposons d'utiliser la notion de sensibilité afin d'obtenir une meilleure estimation de k . La sensibilité est une façon d'estimer la variance d'un processus calculatoire qui s'appuie sur les dérivées partielles des mesures faites. Ici, nous souhaitons savoir si nous pouvons nous fier à nos mesures en fonction de la position des sources, de leur distance et de l'intensité perçue. Nous calculons la sensibilité telle que la norme $L2$ des dérivées partielles [Hautière 08a] :

$$v(k) = \left(\frac{\partial k}{\partial L_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial L_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial d_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial d_j} \right)^2 \quad (4.17)$$

Nous estimons ensuite k à partir des trois estimations \tilde{k}_{12} , \tilde{k}_{13} et \tilde{k}_{23} :

$$\tilde{k} = \frac{\sum \frac{\tilde{k}_{ij}}{v(k_{ij})}}{\sum \frac{1}{v(k_{ij})}} \quad (4.18)$$

Nous pouvons également estimer la sensibilité de V_{met} avec le même principe et composer ces valeurs.

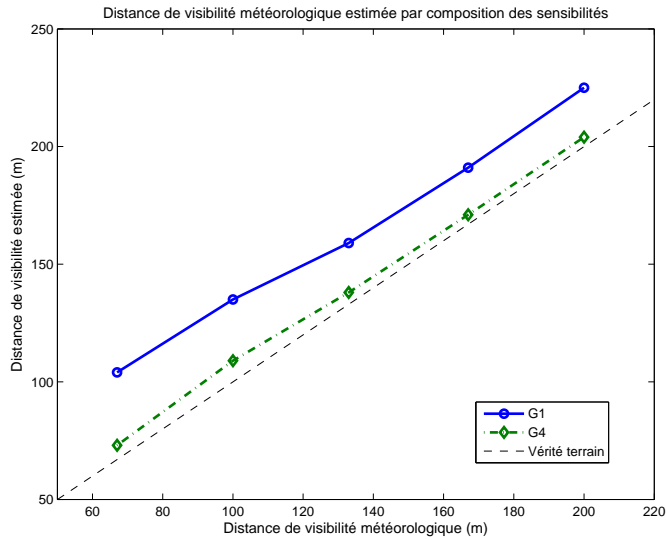
Résultats

En utilisant trois sources S_1 , S_2 et S_3 à 33 m, 80 m et 200 m, nous pouvons voir sur le tableau 4.67 la valeur de la sensibilité associée à chaque estimation de k . Plus la sensibilité est élevée moins nous considérons la valeur de k estimée. Sur la figure 4.68, on peut voir l'estimation de la V_{met} en pondérant les trois estimations faites à partir des trois couples de sources par leurs sensibilités :

$V_{met}(m)$	v		
	v_{12}	v_{23}	v_{13}
33	14	464173	107805
100	517	56	459
200	8441	311	8732

FIGURE 4.67 – Sensibilités en fonction du couple de sources utilisées pour différentes V_{met} dans un brouillard d'advection.

Comme nous le voyons sur la figure 4.68, la composition de nos mesures par la méthode des sensibilités est adaptée à notre problème et améliore les résultats. Les sensibilités sont plus faibles pour des sources proches (1 et 2) en présence de brouillard très dense ($V_{met} = 33$ m) et elle est faible pour des sources éloignées (2 et 3) lorsque le brouillard est moins dense ($V_{met} > 100$ m). Dans tous les cas, nous savons que nous pouvons plus nous appuyer sur une paire que sur les


 FIGURE 4.68 – Estimation de V_{met} avec trois sources et une composition par les sensibilités.

autres parmi les trois paires possibles. Les résultats sont bons, en particulier pour le brouillard de rayonnement mais il reste encore des situations dans lesquelles l'estimation n'est pas très bonne ($V_{met} = 33\text{ m}$, brouillard d'advection, erreur 80%).

La composition par les sensibilités des estimations de k (ou de V_{met}) peut être utilisée avec autant de sources que souhaité à des distances différentes. En supposant que nous ayons de nombreuses sources à des distances différentes de 30 m à 400 m ou plus loin, nous pourrions caractériser des très larges gammes de brouillards. Nous avons testé cette méthode sur des mesures bruitées obtenues par PROF et nous avons pu vérifier que cette méthode augmentait notre robustesse au bruit. Néanmoins le modèle sous-jacent est incomplet et nous surestimons systématiquement les V_{met} .

Biais dû à la diffusion avant

En fonction de la taille des gouttelettes, le brouillard peut avoir des effets visuels très différents de nuit. Cela affecte les intensités perçues et la taille des halos, en particulier pour les sources de lumière. La présence et la taille des halos autour des sources dépend de la granulométrie des gouttelettes et l'intensité perçue d'une source peut différer de la loi d'atténuation de Beer-Lambert en fonction de la transmittance tel que nous l'avons vu sur la figure 4.65. Cela résulte en une estimation biaisée de l'extinction atmosphérique et une surestimation de V_{met} .

Impact de la diffusion avant

Nous avons vu sur la figure 4.68 que même une composition par les sensibilités ne permettait pas d'obtenir des résultats précis dans les brouillards d'advection. En utilisant nos estimations, nous surestimons l'intensité des sources si nous essayons de la recalculer à partir des intensités perçues et de \tilde{k} en utilisant :

$$\widetilde{L_i(0)} = L_i(d)e^{\tilde{k}d_i} \quad (4.19)$$

Nous connaissons l'intensité réelle de nos sources en absence de brouillard et nous calculons l'erreur relative de reconstruction entre intensité d'origine et estimation reconstruite connaissant

d et \tilde{k} en utilisant l'équation 4.19. Nous montrons sur la figure 4.69 l'erreur relative d'estimation des intensités sources en fonction de la V_{met} et de la granulométrie des gouttelettes composant le brouillard.

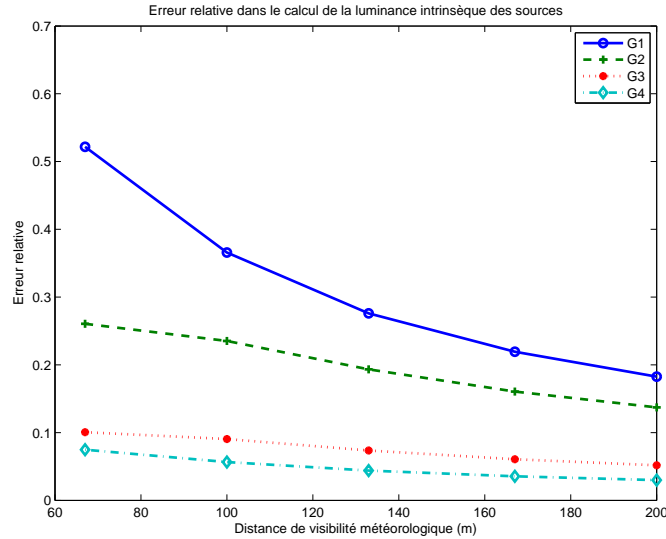


FIGURE 4.69 – Erreur d'estimation de l'intensité des sources en fonction du type de brouillard.

Cette erreur relative est indépendante de l'intensité des sources. Connaissant cette erreur et la V_{met} estimée, nous pouvons classer le type de brouillard en fonction de la diffusion avant. Nous avons tabulé l'erreur relative de reconstruction en fonction de la transmittance et de la granulométrie (*cf.* Fig. 4.69).

Nous proposons une mesure liée à la diffusion avant que nous appellerons FS dans la gamme $[0; 5]$. Pour une distance de visibilité météorologique estimée, nous calculons l'erreur de reconstruction et la localisons par rapport à nos courbes de références correspondant à différents types de brouillards. Les brouillards G4 à G1 présentent des diffusions avant croissantes. Nous attachons à chacune de ces courbes de référence une valeur FS (1 pour G4, 2 pour G3, 3 pour G2 et 4 pour G1). Une mesure FS de 0 correspond à la loi de Beer-Lambert. Pour une erreur relative comprise entre les différentes courbes de référence, la valeur entière de FS correspond à la courbe de référence inférieure et la valeur fractionnelle est la distance relative entre les deux courbes de référence les plus proches. Pour une erreur relative au-delà de la courbe correspondant à G1 ($FS = 4$), la valeur de FS est fixée à 5.

Résultats

Nous avons testé notre mesure de diffusion avant avec des simulations bruitées générées avec PROF. Nous avons choisi d'étudier notre mesure FS à partir de scènes générées avec PROF en utilisant des fonctions de phases réelles. Ces fonctions de phases ne proviennent pas du modèle de Shettle et Fenn pour des modes de diamètres de gouttelettes fixés, mais de mesure de granulométrie de vrais brouillards qui peuvent être reproduits dans la chambre de brouillard de Clermont-Ferrand. Nous avons également utilisé deux fonctions de phase générées directement en utilisant le modèle de Henyey-Greenstein pour des valeurs telles que $q = 0,95$ (correspondant à un brouillard d'advection) et de $q = 0,55$ (brouillard de rayonnement).

Fonction de phase	$V_{met-Ref}$	$V_{met-Est}$	Err. rel.	FS
HG $q=0,55$	100	99,5	0,041	0,71
HG $q=0,95$	100	102	0,228	2,95
Rad - CltFd	100	100,6	0,117	2,1
Adv - CltFd	100	102,3	0,274	3,33

FIGURE 4.70 – Résultat de notre estimation de la diffusion avant pour différentes natures de brouillard.

La mesure FS donne des informations sur la diffusion avant en faisant référence aux brouillards de distributions granulométriques G1 à G4 présentés sur la figure 3.23. Pour un brouillard dont la distributions granulométrique « Rad - CltFd » typique d’un brouillard de rayonnement, l’erreur relative est de 0,117 et $FS = 2,1$, ce qui signifie que ce brouillard présente autant de diffusion avant que G3 et que c’est un brouillard de rayonnement dense d’après [Shettle 79]. Le brouillard de distribution granulométrique « Adv - CltFd » typique d’un brouillard d’advection, présente quant à lui une erreur relative de 0,27 et $FS = 3,3$, il présente une diffusion avant intermédiaire entre un brouillard G2 et un brouillard G1, c’est un brouillard d’advection modéré. Le brouillard présentant une fonction de phase de facteur d’asymétrie $q = 0,55$ est un brouillard de rayonnement extrême, il est classé comme tel avec une mesure $FS = 0,71$ et présente une diffusion avant très faible, entre un brouillard de rayonnement et la loi de Beer-Lambert pour une extinction pure. Le brouillard généré avec un facteur d’asymétrie $q = 0,95$ est classé proche d’un brouillard G2, c’est un brouillard d’advection modéré.

Nous avons souhaité vérifier la faisabilité d’un tel outil de caractérisation du brouillard dans la chambre de brouillard de Clermont-Ferrand (*cf.* Sec. 4.3.7).

Validation expérimentale

Nous avons souhaité vérifier si l’importance du phénomène de diffusion avant observée en simulation était aussi importante sur des sources réelles placées dans le brouillard. Les distributions granulométriques des différents brouillards que nous avons générés ont été enregistrées à l’aide d’un granulomètre Pallas comme illustré pour deux distributions typiques sur la figure 4.71. L’utilisation de l’eau du réseau pour saturer la pièce en eau donne des brouillards dont la distribution de diamètres des gouttelettes a un mode autour de $1\mu m$ et les diamètres distribués entre $0,8\mu m$ et $8\mu m$, typique des brouillards de rayonnement. L’utilisation d’eau déminéralisée pour produire le brouillard conduit à des distributions de gouttelettes plus grosses avec un diamètre moyen autour de $5\mu m$ et une distribution des diamètres entre $0,4\mu m$ et $20\mu m$, typique des brouillards d’advection.

Nous avons positionné quatre sources de lumière à $15 m$, $18 m$, $23 m$ et $28 m$ tel qu’illustré sur la figure 4.74(a) et (b). Les sources ont été positionnées de telle sorte qu’elles n’interagissent pas les unes avec les autres. Les tests consistent à acquérir des images lors de dissipations de brouillard à l’aide du vidéo-luminancemètre LMK Color 98-4 équipé d’un CCD de 12 *bits* de dynamique. Les données de visibilité météorologique données par le transmissiomètre TR30 ont été enregistrées simultanément. Comme cela était anticipé, l’intensité perçue en direction des sources de lumière peut être très élevée, en particulier lorsqu’il n’y a plus de brouillard. Même avec le plus court temps d’intégration, le vidéo-luminancemètre était saturé. Nous avons utilisé des filtres optiques de densité neutre intercalés entre les sources et l’optique afin d’estimer l’intensité des sources par temps clair.

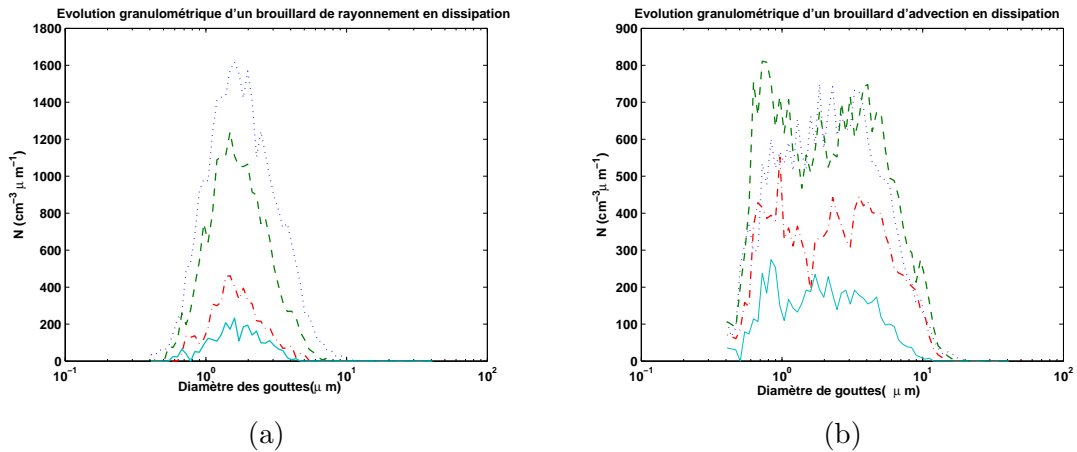


FIGURE 4.71 – Évolution de la granulométrie d'un brouillard de rayonnement (a) et d'advection (b) lors d'une dissipation.

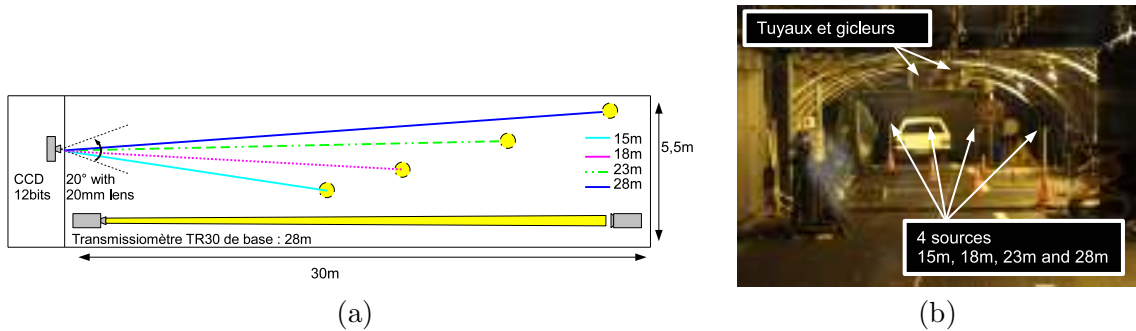


FIGURE 4.72 – Positionnement des sources dans la chambre à brouillard.

Au cours des expérimentations, la densité de brouillard était amenée à son maximum en saturant la pièce en eau pulvérisée. Puis nous avons laissé le brouillard se dissiper naturellement. Il se dissipe par deux phénomènes, les plus grosses gouttes retombent les premières et les autres gouttelettes s'agrègent entre elles et finissent par chuter. Du fait de la nature même de la dissipation, le brouillard se stratifie et les effets sont très variables en fonction de la hauteur du point de vue.

Résultats

Les images simulées avec PROF présentent plus d'intensité au niveau des sources en présence de grosses gouttelettes qu'en présence de petites gouttelettes pour une visibilité météorologique donnée. Tel que nous l'illustrons sur la figure 4.74(a), les luminances observées dans les brouillards d'advection peuvent être jusqu'à dix fois supérieures à ce qu'elles sont dans les brouillards de rayonnement. Cet effet est plus fort qu'en simulation. Cela peut provenir du fait que nous avons à faire à des brouillards très denses. La luminosité relative des sources de lumière est de 4 à 10 fois plus importante dans les brouillards d'advection pour des distances de visibilité comprises entre 15 m et 45 m que pour les brouillards de rayonnement.

Nous avons appliqué aux intensités relevées la même méthode d'estimation de la distance de visibilité météorologique et de la mesure FS que dans les images de synthèse. En utilisant des paires de sources afin d'estimer k (cf. Eq. 4.18) et en composant les estimations par les sensibilités

(cf. Eq. 4.17) nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 4.73. L'estimation de V_{met} est meilleure dans les brouillards de radiation que dans les brouillards d'advection, tel que c'était le cas avec les images simulées. La méthode de la composition a été utilisée avec les six paires possibles parmi les quatre sources mais l'erreur est malgré tout importante. L'erreur moyenne est de l'ordre de 50 % dans les brouillards de rayonnement et de 72 % dans les brouillards d'advection. L'écart entre les valeurs observées et les valeurs attendues par le modèle de Beer-Lambert est plus importante qu'attendue, il est donc logique que l'estimation de la luminance intrinsèque des sources de lumière d'après la méthode exposée dans la section 4.3.9 mène à plus d'erreur que sur les données simulées, que ce soit pour les brouillard d'advection ou les brouillards de rayonnement.

Rayonnement	V_{met}						
$V_{met-Ref}$	8	9	12	16	20	25	34
$V_{met-Est}$	6,3	6,2	8,5	9,5	12,5	15,6	37,5
Advection	V_{met}						
$V_{met-Ref}$	11	15,5	22	28	33	34	43
$V_{met-Est}$	8,2	11,1	12,8	14,1	17,1	17,5	24,7

FIGURE 4.73 – Estimation de la V_{met} avec différentes natures de brouillards.

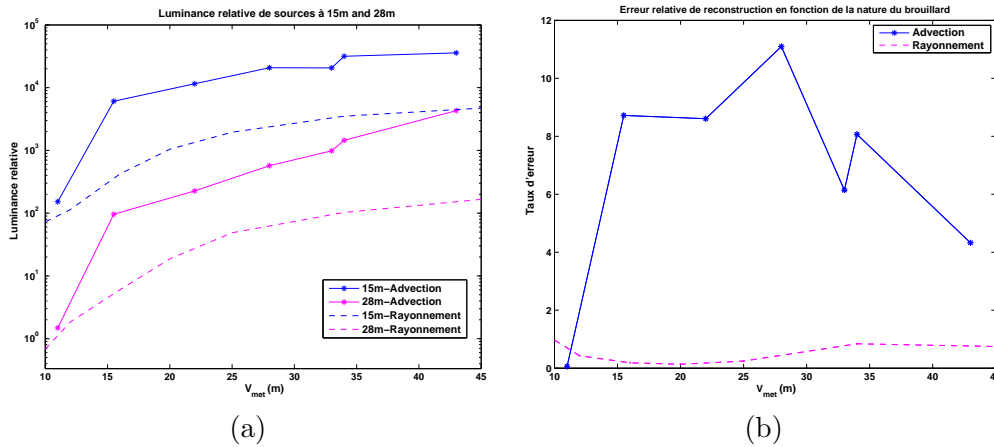


FIGURE 4.74 – Luminance relative des sources (a) et erreur relative de reconstruction (b) en fonction du type de brouillard

Nous pouvons voir que l'erreur relative d'estimation de la luminance intrinsèque L_0 des sources est inférieure à 100 % dans les brouillards de rayonnement. Elle peut être supérieure à 1000 % dans les brouillards d'advection comme illustré sur la figure 4.74(b). Le calcul de la mesure FS en utilisant nos fonctions tabulées extraites des images de synthèse ne donne pas de résultats satisfaisants. Toutes les mesures FS sont supérieures à 5 (erreur relative supérieure à ce qu'elle est avec le brouillard G1 en simulation). Cela provient peut être du fait que nous sommes dans des brouillards très denses et que les fonctions tabulées ont été calculées avec des sources différentes. Nos fonctions tabulées ne sont pas adaptées pour des brouillards réels très denses. Mais le calcul d'une erreur relative d'estimation de la luminance intrinsèque est une méthode exploitable pour différencier des brouillards d'advection et de rayonnement.

Bilan de la caractérisation statique du brouillard de nuit par caméra

Nous avons présenté une nouvelle méthode pour caractériser le brouillard de nuit et estimer la distance de visibilité météorologique de nuit en n'utilisant qu'une seule image et 3 sources d'intensité et à des distances connues. Cette méthode a été testée sur des images de synthèse afin de dimensionner notre site et le positionnement de nos sources. Cette méthode améliore les méthodes antérieures, particulièrement dans le cas de brouillards très denses. Cette méthode donne également une mesure liée à la diffusion avant dans le brouillard, un phénomène relié à la granulométrie des gouttelettes d'eau et qui a un impact important sur l'apparence des sources lumineuses de nuit. Nous avons montré les besoins d'un modèle plus complet que le modèle classique de Beer-Lambert pour la propagation de la lumière dans le brouillard. Nous estimons pour l'instant notre mesure FS en nous appuyant sur des tables d'erreur de reconstruction de l'intensité des sources. La prochaine étape pourrait consister à généraliser l'utilisation de ces fonctions tabulées en trouvant une description fonctionnelle plutôt que tabulée. L'objectif serait désormais de tester notre méthode sur le site afin de vérifier la validité expérimentale du processus avec des sources réelles et un brouillard réel.

4.4 Synthèse

Nous avons présenté dans ce chapitre les méthodes permettant d'estimer la visibilité atmosphérique en conditions embarquées. Nous avons exposé dans le chapitre précédent quels étaient les paramètres qu'il était nécessaire de relever afin d'alimenter les modèles de visibilité atmosphérique. Dans le domaine de la détection et de la caractérisation de la pluie en conditions embarquées, les travaux existants n'étant pas suffisamment performants. Des travaux ont été menés dans le cadre du projet DIVAS afin de combler les manques. Les résultats sont probants. La méthode développée a donné lieu à un dépôt de brevet. La quantification de la densité de pluie surfacique sur le pare-brise donne également des résultats très encourageants mais nécessitera une validation expérimentale avant de pouvoir être utilisée comme outil de mesure de la quantité de pluie. L'objectif étant, à terme, d'estimer directement la quantité de pluie dans l'environnement du véhicule en mettant en relation la densité de pluie sur le pare-brise, la vitesse du véhicule et la hauteur de pluie telle que mesurée selon les standards météorologiques.

Néanmoins, nous pouvons d'ores et déjà utiliser ces outils afin d'alimenter le serveur opérationnel sur la présence ou non de pluie localisée sur le véhicule. Comme nous l'avons détaillé, pour estimer la quantité de pluie afin d'alimenter les modèles d'adhérence et de visibilité atmosphérique, nous pouvons dans un premier temps nous appuyer sur les stations météo de bord de voie. La quantité de pluie serait mesurée par les stations météo et serait interpolée au niveau du véhicule dans le cas où celui-ci détecterait la pluie localement.

Dans le domaine de la détection et de la caractérisation du brouillard de jour en conditions embarquées, les travaux antérieurs au projet DIVAS étaient assez nombreux pour que nous puissions nous appuyer sur l'existant. Les techniques développées dans le domaine de la détection embarquée routière de brouillard de jour, par Hautière en particulier, permettent d'estimer directement la visibilité atmosphérique de jour. Comme nous l'avons montré au chapitre 3, de jour, la distance de visibilité météorologique dans le brouillard correspond bien à un scénario d'accidentologie classique. Nous pouvons exploiter directement cette estimation afin d'alimenter notre module d'estimation du risque.

Concernant la détection et la caractérisation du brouillard de nuit en conditions embarquées, les travaux existants fonctionnent essentiellement en conditions statiques et ne sont pas transposables aux conditions embarquées. Les situations photométriques de nuit sont trop variables

pour effectuer la détection et la caractérisation par une seule méthode. Nous avons développé trois méthodes afin d'enrichir les outils à notre disposition : deux méthodes embarquées complémentaires destinées à détecter et à caractériser la présence de brouillard de nuit en présence et en absence de sources de lumière dans l'environnement et une méthode statique qui nous permettra d'effectuer la validation expérimentale des méthodes embarquées en conditions écologiques.

La détection du brouillard par des méthodes embarquées monocaméra en se fondant sur la présence de halos est performante. Nous avons montré qu'il était nécessaire de s'appuyer sur des critères photométriques et des critères de forme afin de limiter les faux positifs dans la phase de détection des halos. Nous avons montré qu'il était nécessaire d'étudier les halos selon la direction d'émission de la source de lumière. Nous avons montré que l'on pouvait s'appuyer sur une seule mesure telle que Br_{50} pour détecter le brouillard, les performances en détection étant sensiblement les mêmes qu'avec plusieurs caractéristiques pour une charge calculatoire moindre. Nous avons un taux moyen de bonne détection de 99,9 % en détection de brouillard sur nos séquences en nous appuyant sur la moyenne du paramètre Br_{50} de la décroissance de lumière du halo sur 25 images, soit 1 seconde. Un complément de tests sur des vidéos associées à des mesures de la visibilité météorologique doit permettre d'ajuster le seuil sur la moyenne des Br_{50} afin de faire correspondre le seuil de détection avec les standards météorologiques (400 m pour la visibilité routière dans les standards français).

Dans le domaine de la caractérisation, nous avons proposé d'utiliser une méthode similaire en nous appuyant sur la moyenne de Br_{50} extraits. Les résultats préliminaires sont satisfaisants, il y a un ordonnancement globalement correct entre les moyennes extraites et la classification humaine de l'intensité des effets visuels des différentes séquences (*cf.* Fig. 4.48, p. 160). L'intégration temporelle apporte à la fois de la stabilité à la mesure moyenne des Br_{50} et de la fiabilité face à des environnements photométriques qui peuvent être très variés concernant la nature et l'orientation des sources de lumière. Nous aurons besoin de valider la classification avec des séquences pour lesquelles la visibilité météorologique est connue et en particulier de disposer de séquences en présence de brouillards plus denses que ceux rencontrés jusqu'à présent.

Nous avons complété ces travaux lorsqu'il n'y a pas de sources présentes dans l'environnement routier proche. Cette situation est la plus courante dans laquelle se trouve un conducteur seul sur le réseau secondaire. Nous nous appuyons alors sur la trace de rétrodiffusion des feux avant du véhicule. Nous corrélons l'image issue de la caméra embarquée avec une de nos images de synthèse de référence dans une zone image correspondant grossièrement à la direction éclairée par les phares. Les résultats sont clairs. Lorsque l'énergie de la trace de rétrodiffusion diminue au profit d'une hausse de l'intensité de la zone visée par les feux dans l'environnement, il n'y a plus de brouillard. Cela est très bien retranscrit par l'inversion des scores de corrélation des images de synthèse de référence avec et sans brouillard. L'inversion des scores de corrélation des images de synthèse avec et sans brouillard avec la vidéo semble être un bon critère pour juger de la présence ou l'absence de brouillard. Une validation expérimentale complémentaire permettra de s'assurer que c'est un critère stable vis-à-vis d'une référence météorologique de visibilité météorologique de 400 m.

Les résultats en caractérisation de brouillard sont encourageants car nous pouvons distinguer les brouillards très denses, présentant une distance de visibilité météorologique inférieure à 100 m, des brouillards moins denses. Cela nous permet d'alimenter le modèle de visibilité photométrique de nuit. Nous avons proposé des pistes afin d'améliorer et de vérifier la validité d'une telle méthode. En particulier, il serait souhaitable d'étudier l'impact de l'utilisation de diagrammes d'intensité directionnels des feux du véhicule et un ajustement des images simulées à l'orientation réelle des feux. Nous pensons que cette méthode pourra être aisément adaptable à l'évolution future des feux de véhicules. La législation concernant les feux de véhicules évolue et les éclairages

adaptatifs et orientables sont plus courants. On pourra par exemple précalculer dans PROF une batterie d'images de référence avec des orientations des feux variables relativement au véhicule afin d'utiliser le jeu d'images adapté dans le cas de feux avant orientables. Ces travaux sur la détection et la caractérisation par caméra embarquée ont donné lieu dans le cadre du projet DIVAS à un dépôt de brevet auprès de l'INPI.

Comme nous l'avons souligné, nous manquons de données acquises dans de vrais brouillards et associées à des visibilité météorologiques. Afin de pouvoir lier nos futures séquences à des mesures de visibilité météorologique, nous avons proposé une méthode de caractérisation statique du brouillard par traitement d'images. Cette méthode se fonde sur l'analyse photométrique de l'intensité de sources de lumière dans le brouillard. Elle pourra aisément être mise en œuvre sur notre site, sans équipement électrique ni positionnement optique complexe, afin d'obtenir une mesure avant nos acquisitions. Cette méthode a montré des résultats satisfaisants pour les brouillards de rayonnement (erreur inférieure à 10 % sur toute la gamme de distances de visibilité météorologiques d'intérêt). En revanche pour les brouillards d'advection, il persiste un biais dans l'estimation dû aux limites du modèle utilisé pour la caractérisation du brouillard (modèle d'extinction de Beer-Lambert). Ce modèle ne tient pas compte de la diffusion avant lors de l'interaction de la lumière avec les gouttelettes d'eau composant le brouillard. Notre méthode d'estimation permet en outre d'avoir un indice FS relié à la diffusion avant, donc à la granulométrie des gouttelettes.

Nous espérons améliorer les résultats pour ce qui est de la caractérisation du brouillard en présence de brouillard d'advection en utilisant un modèle physique qui prenne en compte la diffusion avant de la lumière. Plutôt qu'une référence à la granulométrie au travers de classes de brouillards existantes, comme nous le faisons avec la mesure FS , nous souhaitons nous rattacher à une mesure conventionnelle de granulométrie telle que le paramètre q du modèle de fonction de phase de Henyey-Greenstein ou encore une mesure telle que le diamètre médian des gouttes (*cf.* chapitre 3, section 3.4.3, pp. 102). L'homogénéisation des résultats entre les deux algorithmes de détection embarqués pourra être effectuée en utilisant des valeurs de V_{met} de référence obtenues avec l'algorithme de caractérisation statique. Il est également envisageable d'homogénéiser les résultats des deux algorithmes en vérifiant la stabilité de la mesure « rétro » et de la mesure « halo » dans des séquences courtes au cours desquelles nous passons rapidement d'un environnement éclairé à une zone non éclairée (avec une hypothèse de préservation de la V_{met} locale).

Nous avons souligné dans le chapitre 3 (section 3.4, p. 91) que la notion de portée optique météorologique (POM), bien qu'elle soit identique à la distance de visibilité météorologique de jour pour un brouillard de coefficient d'extinction k donné, ne correspond pas à un scénario de visibilité sur obstacle tel que c'est le cas de jour. La POM peut difficilement être mise en relation même avec la notion de visibilité sur feux car la visibilité sur feux n'est pas simplement une notion énergétique de quantité d'atténuation (95% d'atténuation d'une source de lumière dirigée). La visibilité sur feux devrait être estimée à l'aide de seuils d'éclairement rétinien ou selon un modèle visuel de visibilité de feux. Nous avons montré dans ce chapitre que l'estimation du paramètre k n'était pas toujours suffisant pour estimer correctement la visibilité atmosphérique selon la définition de la portée optique météorologique, en particulier dans les brouillards d'advection. L'influence de la distribution granulométrique des gouttelettes composant le brouillard est un phénomène non négligeable lors de l'observation de sources de lumière dans le brouillard de nuit. Nous pouvons conclure de ces observations qu'il y a des limites d'adéquation entre définitions, modèles physiques de l'atmosphère et applicabilité des définitions pour la sécurité routière.

Nous avons distingué deux situations pour détecter le brouillard de nuit, nous pensons qu'il faut également distinguer deux situations pour estimer la visibilité routière dans le brouillard

de nuit : environnement sans source de lumière et environnement éclairé de type urbain. Dans chacune de ces situations, la visibilité devrait être estimée selon des scénarios emblématiques tels que la visibilité de la voie et des obstacles, ou la visibilité de feux arrières d'un véhicule.

Nous traitons la principale situation qui nous intéresse à savoir la visibilité sur obstacle pour un véhicule seul. Elle est traitée au travers de la visibilité photométrique estimée selon la méthodologie exposée chapitre 3 (section 3.3.3, p. 88) et nous avons montré que nous pouvions tenir compte de la présence de brouillard et de son coefficient d'extinction k , donc de la visibilité météorologique (section 3.4.4, p. 110). En revanche, nous avons montré dans notre méthode d'estimation statique que concernant la visibilité de feux que l'estimation de la visibilité météorologique ou de la POM était biaisée lors de l'extrapolation de la visibilité météorologique avec le coefficient d'extinction mesuré sur une base donnée. Des expériences psychophysiques sur la visibilité de feux dans des brouillards de densités et de natures différentes permettraient de mieux associer que ne le fait la portée optique météorologique, le coefficient d'extinction, la granulométrie et la visibilité de feux.

Concernant la distance de visibilité sur obstacles ou sur feux dans les environnements éclairés, nous pensons qu'il serait utile d'observer, en simulation ou au travers d'expériences psychophysiques quelle est la relation entre les sources de l'environnement (intensité, orientation), le coefficient d'extinction du brouillard et sa granulométrie et le type de détection que l'on souhaite (obstacles, feux). Il serait en particulier intéressant d'observer dans quelle mesure une scène très éclairée de nuit peut être assimilée à une scène de jour. Il sera peut être alors possible de bénéficier des apports déjà existants en caractérisation du brouillard de jour pour mieux caractériser le brouillard de nuit.

Conclusion

L'étude des mécanismes visuels du brouillard n'est pas récente comme le montre les travaux de Koschmieder datant de 1924. Plus récemment, avec l'utilisation de caméras dans de multiples domaines, différentes études se sont penchées sur l'utilisation de ces dernières pour une caractérisation des conditions atmosphérique ainsi que pour permettre d'identifier le domaine de fonctionnement des caméras et éventuellement corriger l'image dégradée pour rétablir le fonctionnement d'autres algorithmes de traitement d'images. Les travaux de Nayar et Narasimhan [Narasimhan 01, Narasimhan 02, Narasimhan 03a, Narasimhan 03b] en conditions statiques et ceux de Hautière [Hautière 05, Hautière 06c, Hautière 07b, Hautière 09] en conditions embarquées sont emblématiques de cette évolution des méthodes de la détection, vers la caractérisation puis une correction des effets néfastes du brouillard de jour. L'utilisation de caméras a tout naturellement été envisagée car le signal visuel est très impacté en présence de brouillard. Les attentes ont confirmé la faisabilité d'une estimation de la distance de visibilité par caméra, or, ces dernières sont envisagées comme un outil offrant de multiples apports pour la sécurité routière. Elles sont d'ailleurs déjà implantées dans certains véhicules grand public. Les pistes ouvertes dans le traitement embarqué de conditions atmosphériques dégradées par Hautière se sont concrétisées, entre autres, par deux thèses. La restauration des images en conditions de brouillard de jour d'une part. Ce sujet est actuellement traité entre autres au travers d'une thèse dans le projet ICADAC (Improved CAmera based Detection under Adverse Conditions). D'autre part, les travaux concernant essentiellement le brouillard de jour ont naturellement mené à l'exploration de la problématique de nuit. Cette thèse financée dans le projet DIVAS en est la concrétisation. Elle contribue à l'enrichissement de la palette d'outils disponibles en conditions embarquées afin de détecter et de caractériser les conditions météorologiques dégradées.

Cette thèse est également au cœur du projet DIVAS par son aspect d'estimation du risque en conditions météorologiques dégradées et d'une vitesse de conseil adaptée à ces conditions. Le traitement du risque dans DIVAS a considéré deux sources de risques majeures que sont la dégradation de l'adhérence de la voie et la perte de visibilité routière. L'estimation du risque et le calcul d'une vitesse de conseil ont bénéficié des nombreuses contributions du projet, de l'étude d'accidentologie en fonction du réseau à l'estimation de l'adhérence, son modèle d'évolution en fonction de la hauteur d'eau, ou encore les travaux menés concernant l'estimation d'une vitesse de référence ou la méthode de détection et de caractérisation de la pluie en conditions embarquées.

L'ensemble de ces travaux ont impliqué de nombreuses collaborations avec le LEPSiS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations), le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules- Infrastructure-Conducteurs), ESAR (division Entretien Sécurité et Acoustique des routes) et DMI (Division Métrologie Instrumentation), le Centre d'Études Techniques de l'Équipement Normandie-Centre, l'INRIA, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand et sa salle de brouillard, Michelin.

Contributions

Dans le premier chapitre nous avons dressé un bilan de l'accidentologie, montré la nécessité de traiter du cas simple, mais fondamental, des accidents de véhicules seuls sur les routes départementales. Ces accidents sont non seulement nombreux mais ils sont souvent graves. Ils interviennent autant en ligne droite qu'en courbe et sont principalement liés à l'adhérence et à la visibilité. Au vu de l'accidentologie en conditions météorologiques dégradées, on peut également se demander si les conducteurs savent comment adapter leur vitesse dans un certain nombre de situations telles que la pluie ou le brouillard, que ce soit en ligne droite ou en courbe. Nous avons illustré la diversité des travaux liés au risque routier, les différents acteurs, approches, moyens et méthodes d'intervention. À ce propos, nous avons présenté les multiples recherches entreprises au travers de projets récents dans le domaine de la sécurité routière. Nous avons replacé le projet DIVAS dans ce contexte et montré qu'il pouvait être classé dans les systèmes d'anticipation du risque. Nous avons présenté les nouveautés de l'approche de ce projet et avons introduit les travaux de cette thèse ayant contribué au développement d'un système d'adaptation de la vitesse intelligent et d'autres systèmes d'aides à la conduite. Après avoir montré la nécessité d'un traitement du risque par une prise en compte de facteurs tels que la géométrie de l'infrastructure, l'adhérence ou la visibilité dans le chapitre 1, nous proposons une méthode d'estimation du risque en conditions embarquées et le calcul d'une vitesse de conseil adaptée à la dégradation de certaines conditions de conduite.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons dans un premier temps les différentes définitions de la vitesse et nous posons la question de l'estimation d'une vitesse de référence. Nous proposons qu'en conditions idéales (route sèche, beau temps, hors trafic), le 85^e percentile des vitesses, la V_{85} , soit considérée comme une vitesse recommandable, sachant qu'elle est pratiquée et praticable. Nous présentons ensuite les différents travaux visant à proposer une vitesse en fonction de la position du véhicule sur la route. Nous montrons que la plupart d'entre eux s'appuient sur la législation pour ne proposer que la vitesse limite correspondant à la localisation. Certains travaux en revanche, et même si ce n'était pas leur fonction première, peuvent être utilisés afin d'estimer une vitesse, selon des critères dynamiques le plus souvent, adaptée à la géométrie de la route ou à une dégradation de l'adhérence ou de la visibilité. Nous abordons ensuite la problématique de la crédibilité des vitesses proposées et sur l'impact de l'acceptabilité sur l'efficacité des systèmes. Nous montrons que ces travaux abordent le risque selon un scénario particulièrement prudent consistant à éviter tout choc potentiel, sans distinction de conséquences. Nous avons souligné que les vitesses proposées étaient en conséquence très basses. Elles pourraient être inacceptables pour certains conducteurs et les conséquences en seraient une baisse de crédibilité et une perte d'efficacité du système; c'est pourquoi nous utilisons comme référence la V_{85} , vitesse réaliste, pratiquée et praticable. De plus nous montrons qu'une approche fondée sur l'utilisation de scénarios intégrant la notion de choc permet de proposer une modulation de vitesse plus réaliste et intelligible, ce qui est un facteur d'acceptabilité. Notre méthode d'estimation du risque s'appuie d'une part sur une vitesse de référence, mais également sur la typologie et la quantité d'accidents de véhicules seuls sur le réseau secondaire. Elle permet d'estimer une vitesse de conseil en ligne droite aussi bien qu'en courbe grâce à l'utilisation d'un modèle de dynamique véhicule-conducteur-infrastructure et permet d'intégrer de multiples paramètres propres à ces trois entités tels qu'une dégradation d'adhérence ou des performances du véhicule. Elle permet également d'intégrer des paramètres propres au conducteur pour le calcul du risque ou pour une individualisation éventuelle du système. Ce dernier point étant également un facteur d'acceptabilité. Nous montrons enfin que nous pouvons traiter le cas d'une dégradation des conditions de visibilité. Ce modèle présente l'intérêt de ne pas intégrer le risque selon un modèle simple

multiplicatif ou additif avec une prise en compte de l'influence propre des multiples facteurs accidentogène. Ces derniers qui peuvent aboutir la conclusion que la vitesse de conseil la plus sécuritaire est la vitesse nulle. Nous avons montré que nous pouvions tenir compte d'une limite de la visibilité routière sans détailler quelle était la source de limitation de cette visibilité. Après avoir présenté une méthode originale, adaptative et crédible de traitement du risque, nous avons conclu que la mise en œuvre d'une telle méthode en conditions embarquées nécessitait d'estimer deux paramètres majeurs que sont l'adhérence et la visibilité. Nous avons évoqué les solutions et les pistes existantes pour estimer l'adhérence sur la voie, en particulier par une estimation de la hauteur d'eau.

Dans le troisième chapitre, nous traitons de la notion de visibilité. Les champs qu'elle recouvre : visibilité géométrique, photométrique et atmosphérique. Nous présentons les moyens utilisés dans DIVAS afin de caractériser la visibilité routière le long d'un itinéraire. Nous détaillons les modèles de vision humaine et de photométrie permettant d'estimer la visibilité photométrique et montrons comment cette dernière notion évolue en présence d'une dégradation de la visibilité atmosphérique, en particulier au travers de modèles de photométrie en conditions dégradées. Nous rappelons que les notions de visibilité structurelle (visibilités géométrique et photométrique en conditions idéales) peuvent être estimées une fois en amont de la mise en place du système et ne nécessitent ultérieurement qu'une mise à jour régulière. Des conditions telles que la pluie et le brouillard doivent en revanche être détectées et caractérisées en temps réel pour l'environnement proche du véhicule. Nous pouvons intégrer les multiples notions de visibilité afin d'alimenter la méthode d'estimation du risque présentée au chapitre 2, mais il nous faut des méthodes permettant de détecter et de caractériser les conditions atmosphériques en temps réel en conditions embarquées. Après avoir montré comment les différents notions de visibilité interagissaient entre elles, nous concluons sur la nécessité de disposer de méthodes embarquées de détection et de caractérisation des conditions météorologiques telles que la pluie ou le brouillard.

Dans le quatrième chapitre, nous faisons le bilan des méthodes existantes ou développées dans le cadre de DIVAS pour remplir cette tâche. Nous présentons les travaux existant dans des domaines tels que la pluie ou le brouillard de jour, dressons un bilan de leurs performance et de l'exploitation que nous pourrions en avoir afin d'alimenter les modèles d'estimation de la visibilité présentés au chapitre 3. Nous détaillons ensuite les travaux que nous avons menés dans ce domaine en développant une méthode de détection et de caractérisation du brouillard de nuit en conditions embarquées à l'aide d'une caméra. Notre méthode s'appuie sur deux algorithmes traitant de situations distinctes. Lorsque le véhicule est seul et qu'il n'est pas dans un environnement illuminé par de multiples sources de lumière, le principal indice de la présence de brouillard est la trace de rétrodiffusion des phares. Lorsque le véhicule est dans un environnement éclairé à l'aide de nombreuses sources de lumière, cette trace de rétrodiffusion n'est plus visible mais nous pouvons tout de même nous appuyer sur la présence de halos autour des sources de lumière pour détecter et caractériser le brouillard. Nous présentons en détail les traitements que nous appliquons aux images et aux données afin de proposer des indicateurs fiables de la présence de brouillard et de sa densité. Nous exposons nos divers outils de validation expérimentales, que ce soit l'utilisation de séquences vidéos recueillies sur route en conditions écologiques, l'utilisation d'un logiciel de simulation photoréaliste de scènes en conditions de brouillard ou enfin la mise en place d'une série d'expérimentations en salle de brouillard. Nous montrons des résultats encourageants et améliorant les méthodes existantes et nous proposons une méthodologie afin de poursuivre la validation en conditions écologiques avec le développement d'une méthode de caractérisation statique du brouillard par caméra destinée à être expérimentée sur notre site de test.

Nous montrons qu'afin de progresser dans l'ensemble des domaines s'intéressant au brouillard de nuit (la météorologie et les définitions standard, les matériels de mesure, les méthodes de caractérisation utilisant des technologies modernes et l'utilisation qui était faite de ces mesures), il faut progresser dans le modèle sous-jacent décrivant l'interaction du brouillard avec la lumière. Le modèle de Beer-Lambert présente l'avantage d'être simple, et de jour, il est très facile de le faire correspondre avec une notion de visibilité dans le cadre d'un scénario classique de visibilité sur obstacle. En revanche, de nuit, du fait de la nature photométrique complexe des scènes, ce modèle présente de sérieuses limites et introduit un biais important dans l'estimation de la visibilité par les méthodes classiques.

Perpectives

Plusieurs aspects abordés dans cette thèse ont vocations à être traités plus en profondeur. Il serait intéressant de disposer d'une compilation bibliographique des études associant ΔV et gravité des accidents en fonction de paramètres propres au véhicule, au conducteur, à la nature et à la configuration des accidents. On obtiendrait ainsi la possibilité de s'assurer que les courbes utilisées dans le système d'estimation du risque soient plus en adéquation avec la situation réelle.

Une fois le système mis en place, un travail conséquent devra être effectué en collaboration avec des chercheurs en ergonomie dans le cadre d'expérimentations avec des conducteurs multiples afin d'observer l'acceptabilité du système, évaluer les informations à donner aux conducteurs et les méthodes d'interface homme-machine favorisant l'efficacité du système.

Il serait intéressant d'avoir une réflexion en profondeur autour de la notion de vitesse de conseil et de vitesse de référence avant de tester une mise en application de nos méthodes. Pour l'instant, nous considérons que tout couple conducteur-véhicule a vocation à rouler à la V_{85} en conditions idéales. Comment envisager en pratique des profils de vitesse légale ? Quelles solutions techniques pour que les véhicules en soient informés ? Comment faire la transition d'un système de vitesse généralisé par type de réseau à un système avec des vitesses propres aux trajets ?

Sur ces considérations d'acceptabilité et de crédibilité de la vitesse de conseil, il serait intéressant de voir dans quelle mesure la proposition de vitesse de conseil peut prendre en compte des facteurs personnalisés, du point de vue du véhicule ou du conducteur. En particulier, une méthode d'estimation de l'état d'usure des pneus, du pourcentage de rainurage et de leur profondeur permettrait de personnaliser l'estimation de l'adhérence disponible en conditions idéales ou en présence d'eau sur la route. Une estimation du temps de perception réaction du conducteur avant chaque trajet permettrait de fournir une estimation du risque personnalisée. Il serait possible d'adapter le fonctionnement de l'interface pour fournir une information au conducteur selon le meilleur minutage et maximiser l'efficacité.

Actuellement, en conditions dégradées, lorsqu'il s'agit de comparer l'exposition au risque en conditions de référence et à l'exposition au risque en conditions courantes, nous comparons les deux à conducteur égal et à véhicule égal. La prise en compte de données personnalisées propres au conducteur ou au véhicule peut nous amener à penser qu'en conditions de référence, tous les couples conducteur-véhicule n'ont pas forcément vocation à rouler à la V_{85} . On pourrait alors proposer une modulation de la vitesse en conditions idéales en comparant le couple conducteur-véhicule courant à un couple conducteur-véhicule de référence. À cette première modulation de vitesse en conditions de référence s'ajouterait alors une autre modulation de vitesse en présence de conditions dégradées. Cette démarche qui demanderait de discriminer les conducteurs par rapport à leur vitesse maximale praticable est une piste mais pose d'autres problèmes moraux, légaux ou pratiques qu'il faudrait envisager.

La méthode de caractérisation statique du brouillard de nuit a mis en lumière la nécessité de faire évoluer le modèle de diffusion de la lumière dans le brouillard pour une prise en compte de la granulométrie des gouttelettes le composant. Les définitions standard devraient également bénéficier d'une prise en compte de la diffusion avant et les scénarios destinés à la définition de la sécurité routière pourraient prendre en compte ces aspects.

Concernant notre approche dans le domaine de la détection et caractérisation, il reste plusieurs points à éclaircir, tant du point de vue des définitions standard que des modèles physiques sous-jacents. Les deux méthodes en conditions embarquées semblent prometteuses mais nous devons nous assurer de l'homogénéité des résultats. Nous envisageons qu'il puisse être nécessaire de définir deux scénarios génériques sur lesquels s'appuyer pour définir la visibilité routière de nuit dans le brouillard. À l'image de nos algorithmes, on devra peut être différencier un scénario de visibilité sur obstacle en présence d'éclairages externes (peut être plus proche du modèle de Koschmieder de jour que de la définition actuelle d'extinction énergétique de source) et un scénario défini afin d'estimer la distance de visibilité sur obstacle pour un véhicule éclairé par ses seuls phares. Ce deuxième scénario pourrait s'appuyer sur la méthodologie que nous avons utilisée concernant la visibilité photométrique dans le brouillard nocturne.

L'utilisation d'un système stéréoscopique ou d'une méthode monocaméra permettant d'obtenir des informations sur la configuration 3D de la scène permettrait d'ouvrir la voie à l'utilisation de méthodes de restauration de contraste, ce, afin de permettre aux autres aides à la conduite fondées sur l'utilisation de caméras de continuer à fonctionner normalement.

Concernant la détection et la caractérisation embarquée de conditions atmosphériques dégradées. La pluie et ses différents effets sur la visibilité ont peu été étudiés dans la littérature, les modèles existants peuvent être mis en doute et nécessitent d'être affinés, en particulier pour la conduite automobile. Il faudra naturellement se poser la question de la distance de visibilité en présence de neige afin de tenir compte de conditions météorologiques qui peuvent s'avérer courantes dans certaines régions ou pays. Cette information sur la présence de neige devra être traitée comme nous abordons la pluie, en différenciant les effets sur la visibilité et les effets sur l'adhérence. Le développement de méthodes de traitement d'images permettant de détecter la présence de neige au sol serait riche pour renseigner les modèles d'adhérence tandis que la détection d'un événement de chute de neige renseignerait les modèles traitant de la visibilité.

Avec du recul, il faudra se poser certaines questions. Pourra-t-on traiter la visibilité routière dans des conditions de trafic dense à l'aide de méthodes caméra ? Quel sens a la visibilité dans ces conditions et est-elle toujours aussi importante ? Il existe déjà un certain nombre de propositions pour réguler la vitesse en conditions de trafic dense. Certaines sont déjà implantées sur des véhicules grand public comme le « *stop and go* » les régulateurs intelligents (*Automatic Cruise Control*, ACC) et l'aide au freinage d'urgence. On peut imaginer qu'en conditions de trafic dense il n'est pas nécessairement judicieux de proposer une vitesse individualisée et que les solutions actuelles ou une gestion centrale sont peut-être plus appropriées.

Les données recueillies concernant les caractéristiques du tracé et de l'adhérence de la route sont mises à disposition des véhicules et traitées par le module de risque. Ces données n'intéressent vraisemblablement personne d'autre que les usagers empruntant ces routes. En revanche les paramètres qui sont estimés en conditions embarquées tels que la présence de pluie, de brouillard et les limites spatiales de ces événements pourraient être utilisées à de multiples fonctions utiles, non seulement aux usagers de la route, mais à d'autres aspects de recherche comme pour du relevé et de l'estimation des conditions météorologiques pour les modèles d'évolution de la météo, la météo instantanée et les prévisions locales à très court terme. Les échanges entre véhicules et infrastructure locale pourraient être utilisées à plus grande échelle pour des problématiques de planification de trajet et de fluidification des réseaux.

Bibliographie

- [Aarts 06a] L. Aarts, C. Bax, R. Davidse, C. Goldenbeld, T. Janssen, B. van Kampen, R. Mathijssen, P. Morsink, I. van Schagen, C. Schoon, D. Twisk, W. Vlakveld, F. Wegman & P. Wesemann. *Advancing Sustainable Safety*. Rapport technique, SWOV Institute for Road Safety Research, 2006.
- [Aarts 06b] L. Aarts & I. Van Schagen. *Driving speed and the risk of road crashes : A review*. Accident Analysis and Prevention, vol. 38, pages pp.215–224, 2006.
- [Adrian 87] W. Adrian. *Visibility level under nighttime driving conditions*. Journal of the illuminating engineering society, vol. 16(2), pages 3–12, 1987.
- [Adrian 89] W. Adrian. *Visibility of targets : Model for calculation*. Lighting Research and Technology, vol. 21(4), pages 181–188, 1989.
- [Agusdinata 07] D.B. Agusdinata, V.A.W.J. Marchau & W.E. Walker. *Adaptive policy approach to implementing intelligent speed adaptation*. IET Intell. Transp. Syst., vol. 1 (3), pages 186–198, 2007.
- [AIPCR 03] Comité technique AIPCR de la sécurité routière (C13) AIPCR. *Manuel de sécurité routière*. Association Mondiale de la Route, 2003.
- [Andrey 93] J. Andrey & S. Yagar. *A temporal analysis of rain-related crash risk*. Accident Analysis and Prevention, vol. 25(4), pages 465–472, 1993.
- [Antov 02] D. Antov & T. Roivas. *Speed Behaviour Monitoring in Estonia*. Rapport technique, 15th ICTCT workshop on speed behaviour, 2002.
- [Aron 07] M. Aron, R. Bergel-Hayat, G. Saint Pierre & E. Violette. *Added Risk by Rainy Weather on the Roads of Normandie-Centre Region in France*. In Proceedings of the 11th World Conference on Transportation Research, pages 24–28, Berkeley, CA, United States, 2007.
- [ARP 94] *ARP : Aménagement des routes principales*, 1994.
- [Babari 10] R. Babari, N. Hautière, E. Dumont & N. Paparoditis. *Mesure robuste de la visibilité météorologique par camera*. In MANifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (MajeSTIC 2010), 2010.
- [Barnum 10] P.C. Barnum, S. Narasimhan & T. Kanade. *Analysis of Rain and Snow in Frequency Space*. International Journal of Computer Vision, vol. 86, pages 256–274, 2010.
- [Baruya 98] B. Baruya. *Speed-accident relationships on European roads*. In Proceedings of the Conference 'Road Safety in Europe', Bergisch Gladbach, Germany, 1998.
- [Bean 09] D.J. Bean, C.J. Kahane, M. Mynatt, R.W. Rudd, C.J. Rush & C. Wiacek. *Fatalities in Frontal Crashes Despite Seat Belts and Air Bags*. Rapport

- technique DOT HS 811 202, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2009.
- [Bhise 81] V.D. Bhise, J.F. Meldrum, L.M. Forbes, T.H. Rockwell & E.D. McDowell. *Predicting Driver Seeing Distance in Natural Rainfall*. Human Factors, vol. 23(6), pages 667–682, 1981.
- [Bisson 09] O. Bisson & G. Dupré. *Mécanismes d’accidents sur routes bidirectionnelles de rase campagne*. Rapport technique 1.A.4, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France, 2009.
- [Blackwell 46] H.R. Blackwell. *Contrast thresholds of the human eye*. Journal of the Optical Society of America, vol. 36(11), pages 624–632, 1946.
- [Blum 06] J.J. Blum & A. Eskandarian. *Managing Effectiveness and Acceptability in Intelligent Speed Adaptation Systems*. In Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC’06), Toronto, Canada, 2006.
- [Bossu 09] J. Bossu, N. Hautière & J.-P. Tarel. *Utilisation d’un modèle probabiliste d’orientation de segments pour détecter des hydrométéores dans des séquences vidéo*. In XXIIe Colloque GRETSI (GRETSI’09), Dijon, France, 2009.
- [Boussard 08] C. Boussard, N. Hautière & B. d’Andréa Novel. *Vehicle dynamics estimation for camera-based visibility range estimation*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent RObots and Systems, Nice, France, 2008.
- [Bowie 94] N.N. Bowie & M. Waltz. *Data Analysis of the Speed-Related Crash Issue*. Auto and traffic Safety, vol. 2, pages 31–38, 1994.
- [Briton 92] J.-P. Briton, B. Maheu, G. Grehan & G. Gouesbet. *Monte Carlo Simulation of Multiple Scattering in arbitrary 3-D geometry*. Particle and particle systems characterization, vol. 9, No. 1, pages 52–58, 1992.
- [Brémond 07] R. Brémond. *Quality indexes for road lighting : a review*. In Proc. 26th session of the CIE, volume 2, pages 100–103, 2007.
- [Brémond 10] R. Brémond, E. Dumont, V. Ledoux & A. Mayeur. *Photometric Measurements for Visibility Level Computations*. Lighting Research & Technology, vol. 42, pages 1–10, 2010.
- [Brodsky 88] H. Brodsky & A.S. Hakkert. *Risk of a road accident in rainy weather*. Accident Analysis and Prevention, vol. 20(3), pages 161–176, 1988.
- [Busch 98] C. Busch & E. Debes. *Wavelet transform for analyzing fog visibility*. IEEE Intelligent Systems and their Applications, vol. 13(6), pages 66–71, 1998.
- [Carsten 00] O. Carsten & F. Tate. *External Vehicle Speed Control*. Final report : Integration, ITS, University of Leeds, Leeds, 2000.
- [Carsten 05] O. Carsten & F. Tate. *Intelligent speed adaptation : accident savings and cost-benefit analysis*. Accident Analysis and Prevention, vol. 37(3), pages 407–416, 2005.
- [Carsten 08] O. Carsten, F. Lai, K. Chorlton, P. Goodman, D. Carslaw & S. Hess. *Speed Limit Adherence and its Effect on Road Safety and Climate Change*. Rapport technique, University of Leeds - Institute for Transport Studies, october 2008.

- [CEI 99] ISO / CEI. *Aspects liés à la sécurité, principes directeurs pour les inclure dans les normes*, 1999.
- [Chandrasekhar 60] S. Chandrasekhar. Radiative transfer. Dover Publications Inc., 1960.
- [Charbonnier 07] P. Charbonnier. *Mesure de la distance de visibilité*. Rapport technique VIZIR (PREDIT SARI), Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Strasbourg, France, 2007.
- [Charbonnier 10] P. Charbonnier & J.-P. Tarel. *On the Diagnostic of Road Pathway Visibility*. In Proceedings of Transport Research Arena (TRA'10), Brussels, Belgium, 2010.
- [CIE 87] CIE. International lighting vocabulary. Numeéro 17.4. Commission Internationale de l'Éclairage, 1987.
- [CIE 92] CIE. Contrast and visibility. Numeéro 095. Commission Internationale de l'Éclairage, 1992.
- [Cirillo 68] J.A. Cirillo. *Interstate System Accident Research Study II, Interim Report II*. Public Roads, vol. 35(3), 1968.
- [Coleman 50] H.S. Coleman & H.E. Rosenberger. *Spectral Dependence of the Attenuation of brightness Contrast by the Atmosphere*. Journal of Meteorology, vol. 7, pages 259–262, 1950.
- [Cord 08] A. Cord & D. Aubert. *Méthode de détection embarquée de pluie par vidéo*. Rapport technique 2.C.3, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2008.
- [Cord 10] A. Cord & D. Aubert. *Détection de pluie par caméra embarquée*, 2010.
- [COST-331 99] COST-331. *Requirements for Horizontal Road Marking*. Rapport technique, European Commission - Directorate General Transport, 1999.
- [CRT 06] CRT, Centre de Recherche sur les Transports, OCDE. *La gestion de la vitesse*, 2006.
- [Deirmendjian 69] D. Deirmendjian. Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. American Elsevier,, New York, 1969.
- [Dumont 99] E. Dumont. *Semi-Monte-Carlo Light Tracing for the Study of Road Visibility in Fog*. In Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 1998, pages 177–187. Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [Dumont 04] E. Dumont & V. Cavallo. *Extended Photometric Model of Fog Effects on Road Vision*. Transport Research Records, vol. 1862, no. 1862, pages 77–81, 2004.
- [Dumont 09] E. Dumont, R. Brémond, H. Choukour & Y. Guillard. *A Nighttime Visibility Meter for Secondary Roads*. Rapport du Projet VIZIR, 2009.
- [Dumont 10] E. Dumont, N. Hautière & R. Gallen. Atmospheric turbulence, meteorological modeling and aerodynamics, chapitre A Semi-Analytic Model of Fog Effects on Vision, pages 635–670. NOVA Publishers, 2010.
- [Duntley 48] S.Q. Duntley. *The Reduction of Apparent Contrast by the Atmosphere*. Journal of Optical Society of America, vol. 38, pages 179–187, 1948.
- [Dutré 93] P. Dutré, E.P. Lafortune & Y.D. Willems. *Monte Carlo Light Tracing with Direct Computation of Pixel Intensities*. In Proceedings of Compugraphics '93, pages 128–137, Alvor, Portugal, 1993.

- [Ehrlich 06] J. Ehrlich, F. Saad, S. Lassarre & S. Romon. *Assessment of "LAVIA" speed adaptation systems : experimental design and initial results on system use and speed behaviour*. In Proc. of 13th ITS World Congress, United Kingdom, 2006.
- [Eisenberg 04] D. Eisenberg. *The mixed effects of precipitation on traffic crashes*. Accident Analysis and Prevention, vol. 36(4), pages 637–647, 2004.
- [Elvik 04] R. Elvik. *Speed and road accidents : an evaluation of the Power Model*. Rapport technique, Institute of Transports Economics, 2004.
- [(ETSC) 99] European Transport Safety Council (ETSC). *Reducing the severity of road injuries through post impact care*, 1999.
- [Fambro 97] D.B. Fambro, K. Fitzpatrick & R.J. Koppa. *Determination of stopping sight distance*. Rapport technique, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), United-States, 1997.
- [Fang 03] C.Y. Fang, C.S. Fuh, S.W. Chen & P.S. Yen. *A Road Sign Recognition System Based on Dynamic Visual Model*. In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03), Wisconsin, USA, 2003.
- [Fildes 91] B.N. Fildes, G. Rumbold & A. Leening. *Speed Behavior and Drivers' Attitude to Speeding*. Rapport technique, Monash University Accident Research Centre, Victoria, Australia, 1991.
- [Finch 94] D.J. Finch, P. Kompfner, C.R. Lockwood & G. Maycock. *Speed, speed limits and crashes* : Rapport technique 58, Transportation Research Laboratory (TRL), Crowthorne, United Kingdom, 1994.
- [Fleiter 06] J. Fleiter & B. Watson. *The speed parado : the misalignment between driver attitudes and speeding behaviour*. Rapport technique, Centre for Accident Research and Road Safety (CARRS-Q), 2006.
- [Fournela 10] F. Fournela, F. Greffier & V. Boucher. *Pertes de visualisation des éléments de la chaussée en conditions météorologiques dégradées*. Rapport technique, LRPC - Angers, 2010.
- [Gabauer 06] D.J. Gabauer & H.C. Gabler. *Comparison of the Delta-V and occupant impact velocity crash severity metrics using event data recorders*. In Proceedings of the 50th Annual Association for the Advancement of Automotive Medicine Conference, Chicago, IL, USA, 2006.
- [Gabauer 08] D.J. Gabauer & H.C. Gabler. *Comparison of roadside crash injury metrics using event data recorders*. Accident Analysis and Prevention, vol. 40, pages 548–558, 2008.
- [Garber 88] J.N. Garber & R. Gadirau. *Speed Variance and its Influence on Accidents*. Rapport technique 143, Foundation for Traffic Safety, Washington, United States, 1988.
- [Garg 04] K. Garg & S.K. Nayar. *Photometric Model of a Rain Drop*. Rapport technique, Technical Report, Department of Computer Science, Columbia University, Sep 2004.
- [Garg 07] K. Garg & S.K. Nayar. *Vision and Rain*. International Journal of Computer Vision, vol. 75(1), pages 3–27, 2007.

-
- [Gibbons 05] R.B. Gibbons & J.M. Hankey. *Enhanced Night Visibility Series, Volume IX : Phase II-Characterization of Experimental Objects*. Rapport technique FHWA-HRT-04-140, Virginia Tech Transportation Institute, 2005.
- [Glaser 04] S. Glaser. *Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoires limites application au développement de systèmes d'aide à la conduite*. PhD thesis, Univ. Evry-Val d'Essonne, France, 2004.
- [Glaser 07a] S. Glaser, L. Nouveliere & B. Lusetti. *Speed Limitation Based on an Advanced Curve Warning System*. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV'2007), 2007.
- [Glaser 07b] S. Glaser, A. Rakotonirain, D. Gruyer & L. Nouveliere. *An Integrated Driver-Vehicle-Environment (I-DVE) model to assess crash risks*. In Proc. Australian Road Safety Research, Policing, Education Conf., Melbourne, Australia, 2007.
- [Gormer 09] S. Gormer, A. Kummert, S.B. Park & P. Egbert. *Vision-based rain sensing with an in-vehicle camera*. In Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'09)., 2009.
- [Goulette 06] F. Goulette, F. Nashashibi, I. Abuhadrous, S. Ammoun & C. Laugeau. *An integrated on-board laser range sensing system for on-the-way city and road modelling*. In Proc. ISPRS-Commission I (Sensors), Marne-la-Vallee, France, 2006.
- [Guyon 03] I. Guyon & A. Elisseeff. *An Introduction to Variable and Feature Selection*. Journal of Machine Learning Research, vol. 3, pages 1157–1182, 2003.
- [Hagiwara 05] T. Hagiwara & Kaneda Y. *Developing a new method to assess poor visibility level on roads by digital images*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 6, pages 66–76, 2005.
- [Hale 73] G.M. Hale & M.R. Querry. *Optical Constants of Water in the 200nm to 200 μ m Wavelength Region*. Applied Optics, vol. 12, pages 555–563, 1973.
- [Halimeh 09] J.C. Halimeh & M. Roser. *Raindrop detection on car windshields using geometric-photometric environment construction and intensity-based correlation*. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV'2009), pages 610–615, Xian, China, 2009.
- [Hallowell 05] R.G. Hallowell, M.P. Matthews & P.A. Pisano. *Automated Extraction of Weather Variables from Camera Imagery*. In Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, 2005.
- [Hautière 05] N. Hautière. *Détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée*. PhD thesis, Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 2005.
- [Hautière 06a] N. Hautière & D. Aubert. *Visible Edges Thresholding : a HVS based Approach*. In IEEE International Conference on Pattern Recognition (IC-PR'06), pages 155–158, Hong-Kong, China, 2006.
- [Hautière 06b] N. Hautière, R. Labayrade & D. Aubert. *Estimation of the visibility distance by stereovision : a generic approach*. IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E89-D, no. 7, pages 2084–2091, 2006.

- [Hautière 06c] N. Hautière, J.-P. Tarel, J. Lavenant & D. Aubert. *Automatic Fog Detection and Estimation of Visibility Distance through use of an Onboard Camera*. Machine Vision and Applications Journal, vol. 17, no. 1, pages 8–20, 2006.
- [Hautière 07a] N. Hautière, D. Aubert & E. Dumont. *Mobilized and Mobilizable Visibility Distances for Road Visibility in Fog*. In 26th Session of the CIE, D4, pages 92–95, Beijing, China, 2007.
- [Hautière 07b] N. Hautière, J.-P. Tarel & D. Aubert. *Towards Fog-Free In-Vehicle Vision Systems through Contrast Restoration*. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, Minnesota, USA, 2007.
- [Hautière 08a] N. Hautière, D. Aubert, E. Dumont & J.-P. Tarel. *Experimental Validation of Dedicated Methods to In-Vehicle Estimation of Atmospheric Visibility*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 10, pages 2218–2225, October 2008.
- [Hautière 08b] N. Hautière & P. Lepert. *Dialogue between Infrastructure and Vehicles to Improve Road Safety : The DIVAS Approach*. In Transport Research Arena (TRA'08), Ljubljana, Slovenia, 2008.
- [Hautière 09] N. Hautière, J.-P. Tarel & D. Aubert. *Free Space Detection for Autonomous Navigation in Daytime Foggy Weather*. In IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA'09), Yokohama, Japan, May 20–22 2009.
- [Henyey 41] L.G. Henyey & J.L. Greenstein. *Diffuse radiation in the galaxy*. Astrophysical journal, vol. 93, pages 70–83, 1941.
- [Hermans 08] E. Hermans, F. Van den Bossche & G. Wets. *Combining road safety information in a performance index*. Accident Analysis and Prevention, vol. 40, pages 1337–1344, 2008.
- [Hoogendoorn 05] S.P. Hoogendoorn. *Unified approach to estimating free speed distributions*. Transport Research, vol. 39, pages 709–727, 2005.
- [HRB 00] Highway Research Board HRB. *Highway capacity manual*. Special report, Transportation Research Board (TRB), 2000.
- [ICT 00] *ICTAAL : Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison*, 2000.
- [ICT 09] *ICTAVRU : Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines*, 2009.
- [IIHS 05] IIHS. *the risk of dying in one vehicle versus another, drivers death rates by make and model*. Status report 40 (3), Insurance Institute for Highway Safety, 2005.
- [IIS 98] *IISR : Instruction interministerielle sur la signalisation routière*, 1998.
- [ITE 08] Institute of Transport Economics ITE. *Road traffic risk in Norway 2005-2007*, 2008.
- [Jimenez 08] F. Jimenez, F. Aparicio & J. Paez. *Evaluation of in-vehicle dynamic speed assistance in Spain : algorithm and driver behaviour*. IET Intell. Transp. Syst., vol. 2(2), pages 132–142, 2008.
- [Joksch 93] H.C. Joksch. *Velocity change and fatality risk in a crash - a rule of thumb*. Accident Analysis and Prevention, vol. 25(1), pages 103–104, 1993.

- [Kaftory 07] R. Kaftory, Y.Y. Schechner & Y.Y. Zeevi. *Variational Distance-Dependent Image Restoration*. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 1–8, Minneapolis, MN, USA, June 2007.
- [Kawasaki 08] N. Kawasaki, T. Miyahara & Y. Tanmatsu. *Visibility condition determining device for vehicle*, 2008.
- [Kloeden 01a] C.N. Kloeden & A.J. McLean. *Rural Speed and crash Risk*. Rapport technique, Road Accidents Research Unit, Australia, 2001.
- [Kloeden 01b] C.N. Kloeden, G. Ponte & A.J. McLean. *Travelling speed and the risk of crash involvement on rural roads*. Rapport technique CR-204, Australian Transport Safety Bureau, 2001.
- [Koschmieder 24] H. Koschmieder. *Theorie der horizontalen Sichtweite*. Beitr. Phys. fr. Atm., vol. 12, pages 33–55, 1924.
- [Kurihata 05] H. Kurihata, I. Ide, Y. Mekada, H. Murase, Y. Tamatsu & T. Miyahara. *Rainy Weather Recognition from In-Vehicle Camera Images for Driver Assistance*. In Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2005.
- [Kweon 06] Y.J. Kweon & K.M. Kockelman. *Driver Attitudes and Choices : Speed Limits, Seat Belt Use, and Drinking-and-Driving*. Journal of the Transportation Research Forum, vol. 45(3), 2006.
- [Kwon 04] T. M. Kwon. *Atmospheric Visibility Measurements using Video Cameras : Relative Visibility*. Rapport technique, University of Minnesota Duluth, July 2004.
- [Leleve 06] J. Leleve, A. Benshair & J. Rebut. *Procédé de détection de brouillard nocturne et système de mise en œuvre de ce procédé*, 2006.
- [Louah 05] G. Louah. *The Accuracy of a Speed Profile Estimation Method Combining Continuous and Spot Speed Measurements*. In 13th Int. Conf. Road Safety on Four Continents, Warsaw, Poland, 2005.
- [Louah 07] G. Louah, G. Dupré, E. violette & O. Menacer. *Updating French Formulas for operating speeds on horizontal curves*. In Proc. the Int. Conf. on Road Safety Simulation (RSS'07), 2007.
- [Lu 03] J.J. Lu, J. Park, J. Pernia & S. Dissanayake. *Criteria for setting speed limits in urban and suburban areas in Florida*. Rapport technique, Florida Department of Transportation, United States, 2003.
- [Mackenzie 08] J.R.R Mackenzie. *Characteristics of High Injury Severity Crashes on 80-110 km/h rural Roads in South australia*. Rapport technique, Centre for Automotive Safety Research, Australia, 2008.
- [Marshall 48] J.S. Marshall & W.M. Palmer. *The distribution of raindrops with size*. Journal of Meteorology, vol. 5, pages 165–166, 1948.
- [Maycock 66] G Maycock. *The Problems of Water Thrown Up By Vehicles on Wet Roads*. Rapport technique 4, Road Research Laboratory, 1966.
- [Mayeur 10] A. Mayeur, R. Brémond & C. Bastien. *The effect of the driving activity on target detection as a function of the visibility level*. Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour, vol. 13(2), pages 115–128, 2010.

- [Metari 07] S. Metari & F. Deschênes. *A new convolution kernel for atmospheric point spread function applied to computer vision*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, Brazil, October 2007.
- [Michelson 27] A. Michelson. 1927. *studies in optics*. Chicago, IL., 1927.
- [Middleton 52] W.E.K. Middleton. *Vision through the atmosphere*. University of Toronto Press, 1952.
- [Mori 07] K. Mori, T. Takahashi, I. Ide, H. Murase, T. Miyahara & Y. Tamatsu. *Recognition of foggy conditions by in-vehicle camera and millimeter wave radar*. In Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, pages 87–92, Istanbul, Turkey, June 2007.
- [Morris 77] R. Morris, J. Mounce, J. Button & N. Walton. *Field study of driver visual performance during rainfall*. Rapport technique DOT-HS-5-01172, Texas Transportation Institute, 1977.
- [Narasimhan 01] S.G. Narasimhan & S.K. Nayar. *Removing Weather Effects from Monochrome Images*. In Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, volume 2, pages 186 – 193, June 2001.
- [Narasimhan 02] S. G. Narasimhan & S. K. Nayar. *Vision and the Atmosphere*. International Journal of Computer Vision, vol. 48, no. 3, pages 233–254, 2002.
- [Narasimhan 03a] S. G. Narasimhan & S. K. Nayar. *Shedding Light on the Weather*. In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003.
- [Narasimhan 03b] S.G. Narasimhan & S.K. Nayar. *Contrast Restoration of Weather Degraded Images*. IEEE PAMI, vol. 25, no. 6, pages 713 – 724, June 2003.
- [Nilsson 81] G. Nilsson. *The Effect of Speed Limits on Traffic Accidents in Sweden*. In Proc. Int. Symp. on the Effects of Speed Limits on Traffic Accidents and Transport Energy Use. Organization for Economic Cooperation and Development, 1981.
- [Nilsson 04] G. Nilsson. *Traffic safety dimensions and the power model to describe the effects of speed on safety*. In Bulletin, volume 221. Lund Institute of technology, Sweden, 2004.
- [O’Day 82] J. O’Day & J.D.Jr. Flora. *Alternative Measures of Restraint System Effectiveness : Interaction with Crash Severity Factors*. Rapport technique 820798, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, PA., United States, 1982.
- [Oh 01] C. Oh, J.S. Oh & S. Ritchie. *Real-Time Estimation of Freeway accident Likelihood*. In Proceedings of the 80th TRB annual meeting, 2001.
- [ONISR 09a] Observatoire National de la Sécurité Routière ONISR. *Bilan annuel de l’année 2008*, 2009.
- [ONISR 09b] Observatoire National de la Sécurité Routière ONISR. *Les accidents corporels de la circulation routière, bilan 2008*, 2009.
- [ONISR 10] Observatoire National de la Sécurité Routière ONISR. *Bilan de l’année 2009, données définitives*, juillet 2010.
- [Opel] Opel. <http://www.opel-insignia.fr/>.

- [Parker 92] M.L. et al. Parker. *Effects of Raising and Lowering Speed Limits*. Rapport technique FHWA-RD-92-084, Federal Highway Administration (FHWA), Virginia, United States, 1992.
- [Patte 09] L. Patte. *Evaluation du risque en relation avec la visibilité Proposition d'indicateurs de risque pour la visibilité*. rapport risques routiers 11k063, Centre d'études Techniques de l'Équipement (CETE Méditerranée), 2009.
- [Paulmier 04] G. Paulmier. *Fog luminance evaluation in daytime*. Transportation Research Record, vol. 1862, pages 82–88, 2004.
- [Petit 05] C. Petit, W. Reckers, J.-M. Becker & M. Jourlin. *Characterization of diesel spray images using a shape processing technology*. Image Anal. Stereol., vol. 24, pages 95–104, 2005.
- [Pomerleau 97] D. Pomerleau. *Visibility estimation from a moving vehicle using the RALPH vision system*. In IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems, pages 906–911, 1997.
- [Richards 09] D Richards & C. Cuerden. *The Relationship between Speed and Car Driver Injury Severity*. Rapport technique, Transport Research Laboratory, London, UK, 2009.
- [Romano 08] E. Romano, T. Kelley-Baker & R.B. Voas. *Female involvement in fatal crashes : Increasingly riskier or increasingly exposed ?* Accident Analysis and Prevention, vol. 40, pages 1781–1788, 2008.
- [Roser 09] M. Roser & A. Geiger. *Video-based raindrop detection for improved image registration*. In IEEE Workshop on Video-Oriented Object and Event Classification (in conjunction with ICCV), Kyoto, Japan, September 2009.
- [Rou 96] *La Route Automatisée, réflexions sur un mode de transport du futur*. Ouvrage de synthèse, INRETS, INRIA, ENSMP, ENPC, 1996.
- [Roussillon 06] T. Roussillon, I. Sivignon & L. tougne. *Signature de forme discrète, application à l'analyse automatique de la forme des galets*. Rapport technique, LIRIS, 2006.
- [Schoettle 01] B. Schoettle, M. Sivak & M.J. Flannagan. *High-Beam and Low-Beam Headlighting Patterns in the U.S. and Europe at the Turn of the Millennium*. Rapport technique UMTRI-2001-19, The University of Michigan - Transportation Research Institute, 2001.
- [Sentouh 06] C. Sentouh, S. Glaser & S. Mammar. *Advanced vehicle-infrastructure-driver speed profile for road departure accident prevention*. Vehicle System Dynamics, vol. 44, pages 612–623, 2006.
- [Shettle 79] E.P. Shettle & R.W. Fenn. *Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effectsof Humidity Variations on their Optical Properties*. AFGL-TR 79-0214, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom, MA, 1979.
- [Simon 09] L. Simon, J.-P. Tarel & R. Bremond. *Amlerting the driver about road signs with poor visual saliency*. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV'2009), Xian, China, 2009.
- [Sivak 96] M. Sivak. *The information that drivers use : is it indeed 90% visual ?* Perception, vol. 26, pages 1081–1089, 1996.

- [Solomon 64] D. Solomon. *Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver, and Vehicle*. Rapport technique, Federal Highway Administration (FHWA), Washington DC, July 1964.
- [Spetler 08] F. Spetler. *Mécanismes d'interactions Pneu-Chaussée en présence d'eau, Relation texture Adhérence*. rapport du projet ANR DIVAS 2.B.1, Michelin, 2008.
- [Tarel 09] J.-P. Tarel & E. Bigorgne. *Long-Range Road Detection for Off-line Scene Analysis*. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV'2009), Xian, China, 2009.
- [Taylor 02] M.C. Taylor, A. Baruya & J.V. Kennedy. *The relationship between speed and accidents on rural single carriageway roads*. Rapport technique 511, Transportation Research Laboratory (TRL), Crowthorne, United Kingdom, 2002.
- [(TC1-SC) 09] PIARC Technical Committee 1 Surfaces Characteristics (TC1-SC). *Specification for a standard test tyre for friction coefficient measurement of a pavement surface : Ribbed test tyre*. Rapport technique, World Road Association, 2009.
- [Ulbrich 85] C.W. Ulbrich & D. Atlas. *Extinction of visible and infrared radiation in rain : Comparison of theory and experiment*. Journal of atmospheric and oceanic technology, vol. 2, pages 331–339, 1985.
- [van Loon 01] A. van Loon & L. Duynstee. *Intelligent Speed Adaptation (ISA) : A Successful Test in the Netherlands*. Rapport technique, Transport Research Centre (AVV), The Netherlands, 2001.
- [Varhelyi 98] A. Varhelyi, S. Comte & T. Makinen. *Evaluation of In-car Speed Limiters : Final Report*. Final report, Managing Speeds of Traffic on European Roads (MASTER project), 1998.
- [Varhelyi 02] A. Varhelyi. *Dynamic Speed Adaptation in Adverse Conditions - A System Proposal*. IATSS Research, vol. 26(2), pages 52–59, 2002.
- [Vertet 06] M. Vertet & S. Giauressand. *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*. Sétra, 2006.
- [Villiermaux 09] E. Villiermaux & B. Bossa. *Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops*. Nature Physics, vol. 5, pages 697–702, 2009.
- [Wanvik 09] P.O. Wanvik. *Effects of road lighting : An analysis based on Dutch accidents statistics 1987-2006*. Accident Analysis and Prevention, vol. 41, pages 123–128, 2009.
- [Watters 07] P. Watters & M. O'Mahony. *The relationship between geometric design consistency and safety on rural single carriageway in Ireland*. Rapport technique, The University of Dublin, 2007.
- [Weininger 07] P. Weininger & H. Hertz. *Factors influencing the injury pattern and injury severity after high speed motor vehicle accident - A retrospective study*. Resuscitation, vol. 75(1), pages 35–41, 2007.
- [West 71] L.B. West & J.W. Dunn. *Accidents, speed deviation and speed limits*. Traffic Engineering, vol. 41, 1971.
- [Wiscombe 80] W.J. Wiscombe. *Improved Mie scattering algorithms*. Applied Optics, vol. 19(9), pages 1505–1509, 1980.

- [Wood 02] P.W. Wood & C.K. Simms. *Car size and injury risk : a model for injury risk in frontal collisions*. Accident Analysis and Prevention, vol. 34, pages 93–99, 2002.
- [Wood 07] D.P. Wood, N. Veyrat, C. Simms & C. Glynn. *Limits for survivability in frontal collisions : Theory and real-life data combined*. Accident Analysis and Prevention, vol. 39, pages 679–687, 2007.

Productions Scientifiques

Brevets

1. **R. Gallen**, A. Cord, N. Hautière et D. Aubert, *Système vidéo de détection de brouillard de nuit embarqué sur véhicule - A vehicle on-board camera based system able to detect the presence of fog at night.* (demande 1057802 en cours de validation auprès de l'INPI)

Revue internationale avec comité de lecture

2. **R. Gallen**, N. Hautière et E. Dumont, *Static Estimation of the Meteorological Visibility Distance in Night Fog with Imagery*, IEICE TRANS. Inf. & Syst., Special Section on Machine Vision and its Applications, Vol. E93.D(7), pp. 1780-1787, 2010.

Conférences internationales avec comité de lecture et actes

3. **R. Gallen**, N. Hautière, E. Dumont, M. Colomb, *Introducing Forward Scattering in Adaptive Rear lighting Systems*, 27th Session CIE, South Africa, 10-15 July 2011. (soumis)
4. P. Subirats, G. Louah, E. Violette, G. Dupré, N. Hautière et **R. Gallen**, *Estimation of operating V85 on a road itinerary by data fusion. Application Examples*, 24th World Road Congress, Mexico, Mexico, USA, 26-30 September 2011. (soumis)
5. **R. Gallen**, N. Hautière et S. Glaser, *Advisory Speed for Intelligent Speed Adaptation in Adverse Conditions*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'10), San Diego, Californie, USA, 21-24 June 2010.
6. **R. Gallen**, N. Hautière et E. Dumont, *Static Estimation of the Meteorological Visibility Distance in Night Fog with Imagery*, IAPR Conference on Machine Vision and Applications (MVA'09), Yokohama, Japan, 20-22 may 2009, pp. 300-303.
7. **R. Gallen** et S. Glaser, *Vision Based Tangent Point Detection Algorithm, Evaluation and Validation*, IAPR Conference on Machine Vision and Applications (MVA'09), Yokohama, Japan, 20-22 may 2009, pp. 518-521.
8. M. Perrollaz, R. Labayrade, **R. Gallen** et D. Aubert, *A Three Resolution Framework for Reliable Road Obstacle Detection using Stereovision*, IAPR Conference on Machine Vision and Applications (MVA'07), Tokyo, Japan, may 2007, pp. 469-472.

Chapitres dans des ouvrages scientifiques

9. E. Dumont, N. Hautière, et **R. Gallen**, *A Semi-Analytic Model of Fog Effects on Vision, Atmospheric Turbulence, Meteorological Modeling and Aerodynamics*, Nova Publishers,

New York, USA, 1st quarter 2010.

10. **R. Gallen**, N. Hautière et S. Glaser, *Calcul d'une vitesse de conseil en conditions dégradées*, Actes du séminaire DIVAS, Nantes, France, octobre 2010.
11. **R. Gallen**, N. Hautière et E. Dumont, *Caractérisation du brouillard de nuit par une méthode statique*, Actes du séminaire DIVAS, Nantes, France, octobre 2010.

Concours et prix

12. **R. Gallen**, Médaille d'argent de la compétition Young European Arena of Research 2010 organisée dans le cadre de la conférence Transport Research Arena (TRA 2010), *Vehicle Infrastructure Integration for Road Safety*, pilier "Mobility & Intermodality", Bruxelles, Belgique, juin 2010.

ASSISTANCE À LA CONDUITE EN CONDITIONS ATMOSPHÉRIQUES DÉGRADÉES PAR LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE ROUTIER

Résumé

Les conditions atmosphériques dégradées telles que la pluie et le brouillard altèrent temporairement les conditions de conduite. Sur le réseau secondaire, la sur-accidentologie observée dans ces conditions témoigne d'une mauvaise adaptation de la conduite et en particulier de la vitesse. Nous proposons une méthodologie permettant d'estimer une vitesse de référence le long d'un trajet ainsi qu'une méthode fondée sur l'étude du risque routier pour moduler la vitesse en conditions d'adhérence et de visibilité dégradées. Notre estimation du risque routier s'appuie sur la réalisation de scénarios, extraits de l'accidentologie, à l'aide d'un modèle d'interactions véhicule-infrastructure-conducteur. Nous prenons en compte des caractéristiques statiques propres à l'infrastructure et à son environnement et les conditions météorologiques estimées en temps réel dans l'environnement direct du véhicule. Nous montrons qu'il existe des outils permettant d'alimenter les modèles en caractéristiques statiques. Enfin, nous présentons les méthodes fondées sur l'utilisation d'une caméra embarquée permettant de détecter et de caractériser en ligne les conditions atmosphériques dégradées. Nous détaillons en particulier notre contribution au travers d'une méthode de détection et de caractérisation du brouillard de nuit. Celle-ci est constituée d'un système dual s'appuyant sur la détection des halos autour des sources de lumière et sur la détection du voile de rétrodiffusion des phares du véhicule. Nous proposons finalement une méthode statique par caméra permettant de calibrer le système en conditions écologiques.

Mots-clés: systèmes de transports intelligents, aide à la conduite, adaptation intelligente de la vitesse, risque, caméra embarquée, visibilité, brouillard, adhérence, pluie, conditions météorologiques dégradées.

ADVANCED DRIVER ASSISTANCE SYSTEM IN DEGRADED WEATHER CONDITIONS BASED ON RISK INTEGRATION

Abstract

Adverse weather conditions such as rain or fog impair temporarily the driving conditions. On secondary roads, the numerous accidents that occur during these events exemplify a bad adaptation of the driving and specifically of the speed practised. We propose to estimate a reference speed along a path and to adapt speed in degraded conditions of visibility or friction. Our method of assessing roadway risk relies on the realisation of dynamic scenarios, extracted from accident studies, using a model of the interactions between vehicle, driver and infrastructure. We use static characteristics of the infrastructure and of its environment. We also use dynamic characteristics of the meteorological environment of the car estimated in real time. We show that the models used for friction and visibility estimation and we show that tools already exist allowing to estimate the necessary static inputs of the models. We then present the online methods used to detect degraded atmospheric conditions with embedded cameras. We detail an original method allowing night fog detection based on the detection of halos around light sources and on the backscattered veil of the car front lights. We finally present a static method based on the use of a camera intended to calibrate the system in real conditions of fog.

Keywords: intelligent transportation systems, ITS, driving assistance, ADAS, intelligent speed adaptation, ISA, risk, camera, onboard, visibility, fog, friction, skid resistance, rain, degraded meteorological conditions.