



Modélisation et validation expérimentale de concept de Détection Vidéo Coopérative destiné à un système stéréo anticollision inter-véhicule

Shuxian Lu

► To cite this version:

Shuxian Lu. Modélisation et validation expérimentale de concept de Détection Vidéo Coopérative destiné à un système stéréo anticollision inter-véhicule. Optique / photonique. Université Paris Sud - Paris XI, 2015. Français. NNT : 2015PA112154 . tel-01423863

HAL Id: tel-01423863

<https://theses.hal.science/tel-01423863>

Submitted on 5 Jul 2017

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

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

UNIVERSITE PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE : STITS

Laboratoire Charles Fabry

DISCIPLINE PHYSIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 03/07/2015

par

Shuxian LU

Modélisation et validation expérimentale de concept de Détection Vidéo Coopérative destiné à un système stéréo anticollision inter-véhicule

Composition du jury :

Directeur de thèse :

Co-encadrants :

Rapporteurs :

Examineur :

Pierre CHAVEL

Jean-Louis MEYZONNETTE

Christophe LAVERGNE

Pierre AMBS

Frédéric CHAUSSE

Thierry LEPINE

Directeur de recherche au CNRS, IOGS

Professeur, IOGS

Ingénieur, Renault

Professeur des Universités, Laboratoire MIPS, ENSISA

Maître de conférences HdR, Université d'Auvergne

Maître de conférences HdR, IOGS

Remerciement

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Pierre Chavel, pour avoir été mon directeur de thèse et pour ses conseils. Je tiens à remercier également Monsieur Christophe Lavergne, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe pendant la durée de ma thèse et pour sa bonne humeur.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Jean-Louis Meyzonnette, qui m'a encadrée au cours de ma thèse et a su me communiquer son savoir et son enthousiasme.

Je remercie mon équipe Amont Adas Réalité Augmentée, avec qui j'ai partagé de bons moments, pour leurs conseils, support et bonne humeur.

Je remercie également mes collègues à Renault et au laboratoire Charles Fabry pour leur disponibilité et leurs aides précieuses, ce qui a veillé au bon déroulement de cette thèse.

Un grand merci à Stéphane, Samuel et Adrien, pour leur support pour la mise en place d'expérimentations dans les véhicules d'essai.

Je remercie Monsieur Pierre Ambs et Monsieur Frédéric Chausse d'avoir accepté de rapporter mon travail.

C'était un très grand honneur d'avoir eu comme président de jury Monsieur Kurosh Madani.

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes que j'ai été amené à rencontrer au Technocentre, de qui j'ai beaucoup appris : Ikrame, Frédéric, João, Christine, Éric, Oliver, Sophie, Chanthao, Mamy, Marie-Claire, ou encore Piaopiao, Cristiane, Mathilde, Christian, Sandra, Van, et tous ceux que j'aurais pu oublier.

Enfin, je remercie du fond du cœur mes parents, les membres de ma famille et mes amis, qui m'ont toujours soutenue.

Table des matières

Remerciement.....	2
Introduction.....	6
Chapitre I Choix du principe de Détection Vidéo Coopératif (DVC).....	8
I.1 Bibliographie : systèmes classiques de détection d'obstacle dans le domaine automobile.....	8
I.1.1 Systèmes actifs	8
I.1.2 Systèmes passifs.....	14
I.1.3 Systèmes actifs-passifs.....	20
I.1.4 Synthèse.....	23
I.2 Principe choisi : système anticollision par vision stéréo coopérative.....	25
I.2.1 Exemples de systèmes coopératifs	26
I.2.2 Système choisi : la vision coopérative.....	27
I.3 Techniques de détection vidéo coopérative	29
I.3.1 Rétine	29
I.3.2 Filtrage par traitement d'image	31
I.4 Conclusion.....	34
Chapitre II Spécification géométriques et optiques du système	35
II.1 Contexte routier.....	35
II.1.1 Géométrie des routes.....	35
II.1.2 Scénarii typiques fronto-arrière et fronto-frontal	36
II.2 Couverture : volume de détection	38
II.2.1 Portée du système	38
II.2.2 Champ de vision.....	40
II.3 Précision de mesure sur la position instantanée d'un feu à Leds.....	44
II.3.1 Précision théorique de mesure de position par caméra stéréo.....	44
II.3.2 Spécification de la précision du système.....	48
II.4 Cadence des mesures	48
II.4.1 Vitesse angulaire des cibles	49
II.4.2 Cadence des mesures brutes	52
II.5 Calcul du signal utile (feux à Leds)	53
II.5.1 Caractéristiques des feux à Leds.....	53
II.5.2 Radiométrie d'un capteur de caméra vidéo	56

II.6 Calcul du signal de fond	59
II.7 Rapport entre signal d'un feu à Leds stationnaire et bruit de fond.....	62
II.7.1 En absence de filtrage	62
II.7.2 Avec filtrage adapté à la fréquence de modulation des feux à Leds	64
II.7.3 Cas du passage rapide d'un signal ($\tau < T_{\text{mesure}}$)	67
II.8 Origines des fausses alarmes dans notre système.....	67
II.9 Conclusion	70
Chapitre III Filtrage numérique par traitement d'image.....	72
III.1 Critères de performance du système anticollision.....	72
III.1.1 Caractérisation du système.....	72
III.1.2 Probabilités de détection et de fausses alarmes d'un capteur	74
III.1.3 Probabilités de détection et de fausses alarmes de la caméra stéréo.....	76
III.2 Choix de la forme de la modulation du signal issu des feux à Leds	77
III.2.1 Échantillonnage des feux à Leds modulés en sinusoïdal et en créneau.....	78
III.2.2 Signal en sortie du filtre numérique des signaux recherchés modulés en sinusoïdal et en créneau	80
III.2.3 Fonctions de transfert théoriques des filtres numériques en sinusoïdal et en créneau.....	82
III.2.4 Choix des principaux paramètres du filtrage numérique	87
III.3 Étude comparative de 3 filtres numériques.....	87
III.3.1 Filtre 1 : filtre adapté en créneau « classique »	88
III.3.2 Filtre 2 : filtre adapté en créneau « 4-phases ».....	89
III.3.3 Filtre 3 : filtre « multicanaux » sur la dérivée du signal brut	90
III.3.4 Signal de sortie des filtres sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0	92
III.3.5 Signal de sortie des filtres sur signal d'entrée du fond	95
III.4 Optimisation de performance des filtres numériques	97
III.4.1 Principe de la normalisation des signaux bruts.....	97
III.4.2 Signal de sortie du filtre sur signal brut normalisé	98
III.4.3 Examen de l'amplitude de modulation des signaux bruts.....	101
III.5 Résultats de simulation des signaux à problème.....	102
III.5.1 Fond variable	102
III.5.2 Passage de motif répétitif.....	106
III.5.3 Soleil en direct proche de l'horizon ou phares d'autres véhicules.....	107

III.5.4 Mauvaises conditions météorologiques.....	107
III.6 Conclusion	108
Chapitre IV Évaluation et validation expérimentales des filtres.....	110
IV.1 Présentation des matériels utilisés	110
IV.1.1 Véhicules d'essai.....	111
IV.1.2 Caméra rapide + objectif Fisheye	111
IV.1.3 PC enregistreur de la caméra rapide.....	113
IV.1.4 Feux à Leds de voiture.....	115
IV.1.5 Sources à Leds isotropes.....	116
IV.1.6 Strobe Controller	117
IV.2 Caractérisation des réponses des pixels de la caméra rapide.....	117
IV.2.1 Caractérisation en statique.....	117
IV.2.2 Caractérisation en mouvement.....	123
IV.3 Évaluation sur la détection des feux à Leds	131
IV.3.1 Scénarii en statique.....	131
IV.3.2 Essais à vitesses angulaires de feux « faibles »	139
IV.3.3 Essais à vitesses angulaires de feux « élevées ».....	148
IV.4 Évaluation des fausses détections	149
IV.4.1 Présentation des roulages	150
IV.4.2 Résultat d'évaluation	151
IV.5 Conclusion.....	153
Conclusion et perspectives.....	155
Annexes.....	157
A. DONNEES SUR LA GEOMETRIE ROUTIERE	157
B. Cinématique des véhicules sur la route.....	159
C. Synthèse de la spécification du filtre numérique	163
D. Probabilité de détection expérimentale de la lanterne	164
Liste des figures.....	169
Bibliographie.....	176

Introduction

Dans le contexte routier existant, il est de plus en plus important d'améliorer la sécurité du conducteur en réduisant l'impact de ses propres erreurs d'appréciation sur l'état de la circulation, par exemple sur les positions, les vitesses et les accélérations des véhicules qui l'entourent.

Dans le cadre du développement de systèmes de trajectographie vidéo dédié à éviter des collisions fronto-arrière et fronto-frontales, l'objectif de la thèse est de concevoir et d'expérimenter des solutions optoélectroniques innovantes pour améliorer la fiabilité de détection et la performance de mesure de trajectographie des véhicules. Cette fiabilité de mesure permet de mieux comprendre les trafics dans tous environnements de conduite, pour toutes conditions météorologiques et radiométriques de la scène. Les informations issues du système, à savoir la position et la vitesse des véhicules environnants, pourront être utilisées par des applications ADAS (Advanced Driver Assistance System) à plus haut niveau : Forward Collision Warning (FCW); Avertissement sur Freinage d'urgence; AEBS, Stop&Go, Low speed following, ACC (Autonomous Cruise Control), etc. Il pourra servir également aux applications comme VA (Véhicules Autonomes).

Les systèmes actuellement sur le marché ont des contraintes de performances limitées à cause de la lourdeur des traitements d'images traditionnels : des champs de vision trop faibles pour assurer la prise en charge de tous les véhicules pouvant être à l'origine de la collision, des portées insuffisantes pour prévenir les collisions suffisamment tôt, des taux de détection trop faibles dans des mauvaises conditions (brouillard, pluie, neige, ...), etc. Pour les fournisseurs spécialisés dans les systèmes d'aide à la conduite en imagerie passive ou active continue (utilisation d'une source d'éclairage Infra Rouge d'appoint), les meilleurs taux de détection inter véhicule à une distance de 70 mètres se situent autour de 85% pour un taux de fausses alarmes à la limite de l'acceptabilité pour les conducteurs (1 à 2 fausses alarmes pour 100 km). Le nombre élevé de détections manquées se concentre dans les situations pour lesquelles le conducteur a le plus besoin d'une assistance à la conduite : roulage de nuit, roulage par temps de pluie et de brouillard, situation d'éblouissement ...

Pour atteindre les performances requises, nous proposons un système coopératif basé sur la détection de sources à Leds modulées, destiné à filtrer les signaux issus de la scène et à rejeter le fond de la scène naturelle, qui est souvent non modulé ou peu modulé, de façon à réduire considérablement le nombre d'information à traiter par image.

Cette thèse s'appuie sur la révolution des technologies optoélectroniques dans le domaine de l'automobile pendant la décade passée. Les caméras mégapixel de « grand champ », embarquées sur la frontale du véhicule, permettent d'enregistrer des images brutes de la scène à une cadence souvent entre 25Hz et 60Hz. D'ailleurs, des feux à Leds, comme les Day Running Light (DRL), qui sont devenues obligatoires en Europe depuis 2011, les codes et les phares (Véhicule Full LED) et les feux arrière de position ou de freinage sont de plus en plus utilisés dans l'automobile. Les LEDs peuvent être modulées très facilement dans une bande de fréquence allant de quelques Hz à la centaine de MHz. Cela donne diverses possibilités pour fiabiliser la détection des véhicules environnants sur la route.

Le manuscrit de thèse est composé de 5 chapitres, comme décrit ci-dessous :

Le chapitre 1 présente une revue de divers systèmes mis en œuvre ou envisagés pour la détection d'obstacles et l'anticollision, que l'on a classés en 3 familles : les systèmes purement actifs, tels que Radars, Lidars, ou caméras Time-of-Flight « ToF »; les systèmes passifs, tels que caméras monoculaires ou stéréo ; et les systèmes actifs-passifs, tels que l'association d'un Radar à une caméra. Pour améliorer la fiabilité et la robustesse sur la détection d'obstacle, nous avons proposé un système coopératif en utilisant la modulation des feux à Leds embarqués sur les véhicules. Le fait que ces feux sont modulés rend les véhicules présents sur la route plus visibles pour le système de détection et en conséquence plus faciles à détecter. On expose donc le principe de système coopératif qui est proposé dans cette thèse et deux formes de mise en œuvre qui apparaissent envisageables pour un tel système : soit par rétines artificielles avec filtrage analogique à l'intérieur du pixel, soit par traitement numérique des images acquises par des caméras rapides. C'est cette dernière solution qui a été choisie pour raison de non disponibilité des rétines correspondant au besoin.

Le chapitre 2 traite de la spécification globale d'un tel système anticollision. La première est la spécification géométrique et radiométrique de la scène observée, y compris le volume de détection recherché, les différents scénarii routiers de type fronto-arrière et fronto-frontal à prendre en compte, les vitesses angulaires des objets de la scène, et en particulier des feux à Leds, le bilan radiométrique de la scène et des feux. La seconde concerne le capteur lui-même, à savoir : sa cadence d'information, son dimensionnement, la précision sur la mesure de positionnement et de vitesse des véhicules, leurs probabilités de détection, etc.

Le chapitre 3 présente les études théoriques des trois filtres par traitement numérique des images : un filtre dit « classique », un filtre dit « 4-phases » et un filtre dit « multicanaux ». Pour chaque filtre, nous présentons son principe, sa courbe de fonction de transfert, et ses réponses possibles sur différents signaux d'entrée en provenance d'une scène typique. Suite à nos analyses théoriques, nous donnons des solutions d'optimisation de ces filtres, que nous validons par des simulations numériques.

Le chapitre 4 présente les résultats expérimentaux de ces filtrages que nous avons obtenus en laboratoire et sur le terrain, et qui confirment les études théoriques décrites dans les chapitres 2 et 3, sur la performance en détection du signal utile et en réjection des fonds. Ceci a été effectué en statique (caméra et feux à Leds fixes), puis en dynamique (caméra sur véhicule en roulage).

La conclusion résume les résultats obtenus et complète les travaux de cette thèse par les perspectives de technologies pour un futur système : les rétines avec des circuits analogiques intégrés, qui permettront d'améliorer les performances en filtrage du fond, également de réduire le volume et le coût du capteur ; les capteurs « Back-side Illuminated », qui ont des pixels photosensibles sur 100% de leur surface.

Mots clé : système d'aide à la conduite (ADAS), caméra stéréoscopique, anticollision inter-véhicules, LEDs modulées

Chapitre I Choix du principe de Détection Vidéo Coopératif (DVC)

I.1 Bibliographie : systèmes classiques de détection d'obstacle dans le domaine automobile

Depuis quelques années les constructeurs automobiles s'efforcent d'améliorer la sécurité et le confort des passagers par la mise en œuvre d'équipement d'aide à la conduite [1]. Parmi ceux-ci, les systèmes anticollision visent à prévenir le conducteur de la présence d'un obstacle à une distance minimale de sécurité ou à agir sur la dynamique du véhicule afin d'éviter la collision [2][3]. On parle donc de la détection d'obstacles en milieu routier, qui est l'étape essentielle pour l'évitement d'obstacles d'une façon intelligente.

Aujourd'hui, il existe trois grandes familles de dispositifs pour la détection d'obstacles, qui sont basées sur des mesures de trajectographie : les systèmes actifs, les systèmes passifs, et les systèmes mixtes (actifs-passifs) [4][5].

Les systèmes actifs les plus connus sont les Radars ("RADio Detection And Ranging") [6], les Lidars ("LIght Detection And Ranging") [7] et les caméras ToF (« Time of Flight »). Les systèmes passifs sont essentiellement des caméras (monoculaire ou stéréo), permettant de détecter ou d'identifier les objets par différentes méthodes de traitement d'image, comme la reconnaissance des formes, la détection des zones d'intérêt, l'analyse du flux optique, etc. [8]. Enfin les systèmes actifs-passifs associent les capteurs des deux familles précédentes.

I.1.1 Systèmes actifs

1) Radar

Les Radars sont des émetteurs/récepteurs micro-ondes calculant la distance en mesurant le temps d'aller-retour du signal réfléchi par les objets de la scène, et leur vitesse relative par effet Doppler.

Comme le montre la figure I.1, le Radar embarqué sur le véhicule porteur émet un signal microonde dont il détecte l'écho après un temps de vol, Δt , représentatif de la distance D de l'objet, tel que :

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \quad (1.1)$$

Avec c la vitesse de propagation de l'onde radiofréquence.

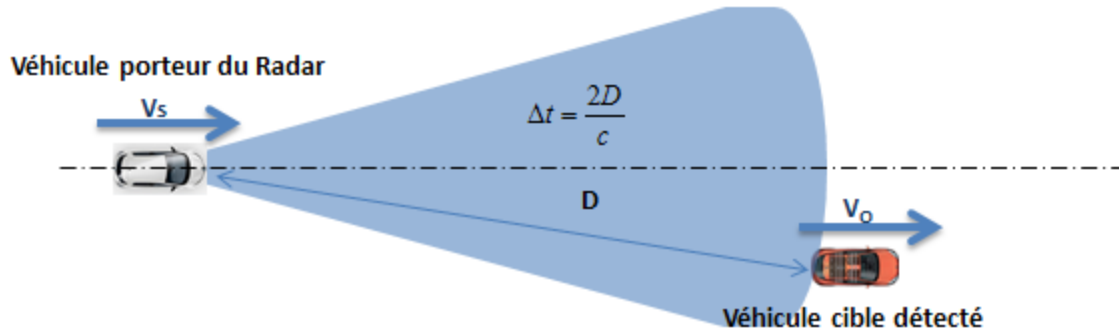


Figure I.1 Mesure de position et de vitesse par Radar

La translation de fréquence Δf_D du signal reçu due à la vitesse relative V_R entre véhicules porteur et suivi est donnée par l'effet Doppler :

$$\Delta f_D = \frac{2V_R}{\lambda} = \frac{2V_R f}{c} \quad (1.2)$$

Les Radars automobiles fonctionnent typiquement en mode FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave : émissions continues modulées en fréquence). Ils peuvent être divisés en trois grandes familles : les « short range » (portée inférieure à 40m), les « middle range » (portée inférieure à 120m) et les « long range » (portée inférieure à 250m) [9]. Les Radars « long range », beaucoup utilisés pour les applications ACC, aide au freinage et alerte de collision, sont souvent installés à l'avant du véhicule et balayent la scène devant ce dernier. Les « short range » et « middle range », d'autre part, sont positionnés à différents endroits selon leurs fonctions, comme le montre la figure I.2, où les Radar BSD (Blind Spot Warning) et AAP (Aide Au Parking) sont installés sur l'arrière du véhicule.

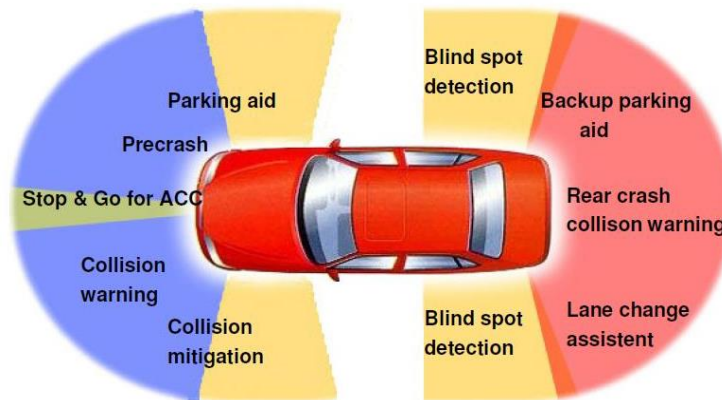


Figure I.2 Applications d'aide à la conduite par les Radars

Aujourd'hui, la plupart des radars sur véhicules opèrent soit à 24GHz (Low-cost ACC / Lane Change Assist), soit à 77GHz (ACC / ACC Stop &Go / AEBS /Lane Change Assist). Il existe aussi des Radars à 24/26 GHz (sauf en Corée et en Chine) et à 79 GHz (seulement en Europe et à Singapour).

La figure I.3 présente le Radar ACC AC20 développé par Autocruise, qui est un Circuit intégré monolithique hyperfréquence (en anglais : « Monolithic Microwave Integrated Circuits » ou MMIC) basé sur la technologie GaAs.



À titre d'exemple, voici quelques unes de ses caractéristiques techniques :

- Fréquence : 76-77 GHz
- Portée : de 1 à 150 m
- Champs de vision : 12°
- Précision sur mesure de vitesse : < 0.2 km/h
- Précision angulaire : < 0.3°
- Coût : ~ 1000 €
- Fonctionne à faible vitesse

Figure I.3 Radar AC20 Autocruise

2) Lidar à balayage (télémètre)

Les Lidars à balayage permettent de faire des mesures de distance par chronométrie du temps de vol du signal émis par le système et réfléchi par les véhicules cibles. Ils sont constitués d'un émetteur de faisceau laser infrarouge qui balaye le champ de vision attribué grâce à un miroir rotatif par un moteur électrique, qui permet d'orienter le faisceau selon un grand nombre de directions, toutes coplanaires [10]. Ainsi, un large angle de vue peut être exploré, avec une grande précision angulaire. Il permet de plus de détecter tout type d'objet (voiture, piéton, vélo...) rétro-réfléchissant une fraction suffisante de la lumière incidente. Une optique de réception proche de l'émetteur collecte les échos laser réfléchis par les obstacles, qui sont analysés par l'électronique de traitement du signal, par la chronométrie et la mesure de distance.

Comme dans le cas du Radar (figure I.4), la distance D d'un véhicule est donnée par le temps de vol Δt et la vitesse de lumière c :

$$D = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1.3)$$

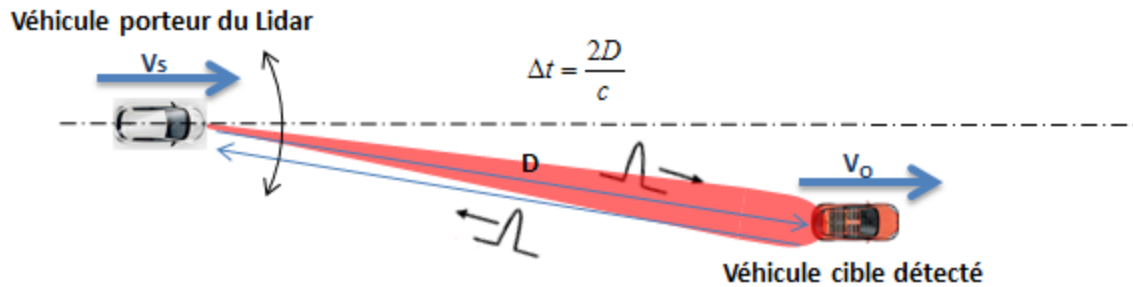


Figure I.4 Mesure de position par Lidar

Continental a annoncé en 2012 le module du capteur SRL-CAM400 avec Lidar intégré, qui émet trois faisceaux impulsionnels à 905nm et qui est opérationnel jusqu'à une dizaine de mètres.

En 2013, Fiat a annoncé un système d'AEBS (Advanced Emergency Braking System) appelé « City Brake Control » [11], qui permet d'aider sur les freinages d'urgence autonomes pour éviter des collisions fronto-arrière à faible vitesse avec des véhicules qui sont à l'arrêt ou qui se déplacent dans le même sens (figure I.5). Ce système consiste en un Lidar, placé derrière la partie supérieure du pare-brise pour surveiller une zone de 10-12 m présentant un risque de collision à l'avant du véhicule, pour des vitesses de véhicule comprises entre 5 km/h et 30 km/h. Si une collision est imminente et si le conducteur ne réagit pas, la commande de « City Brake Control » intervient sur les freins de façon rapide et à un niveau adapté au besoin. Si la collision devient plus imminente, le système rend la fonction d'assistance au freinage hydraulique plus sensible, en renforçant la pression de freinage pour réduire la distance de freinage. Si le conducteur n'entreprend toujours pas d'action, la commande de freinage City applique les freins de façon autonome et avertit en même temps (un signal sonore avec un signal visuel sur le tableau de bord) le conducteur que le système a dû intervenir pour éviter un accident. Entre 5 km/h et 20 km/h, les freins appliquent une décélération maximale de 10 m/s^2 ; entre 20 km/h et 30 km/h, la décélération maximale est de 6 m/s^2 . Peu avant une collision, si le conducteur essaie de freiner, la commande de freins City optimise le freinage et aide à éviter la collision.



Figure I.5 Système "City Brake Control" de Fiat

3) Caméra ToF

Une caméra Time-of-Flight est une caméra destinée à fournir des images tridimensionnelles d'une scène en éclairant celle-ci au moyen d'une source impulsionnelle à base de Leds, voire de diodes laser, et d'en déduire la distance de chaque pixel de cette scène, par la mesure du temps de vol aller-retour de la lumière correspondant grâce à un récepteur matriciel de type CMOS ou CCD (figure I.6). Une méthode très couramment mise en œuvre consiste à moduler sinusoïdalement la lumière émise et à mesurer le déphasage subi par la lumière détectée par rapport à la lumière émise.

Si la fréquence de modulation de la lumière émise est ν , et le déphasage entre la lumière émise et la lumière détectée est $\Delta\varphi$, la distance D entre les deux véhicules est donnée par l'équation suivante :

$$D = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \frac{c}{\nu} \quad (1.4)$$

Où c est la vitesse de lumière.

Quant à la position angulaire du véhicule, elle est déduite des coordonnées du pixel correspondant à l'écho détecté.

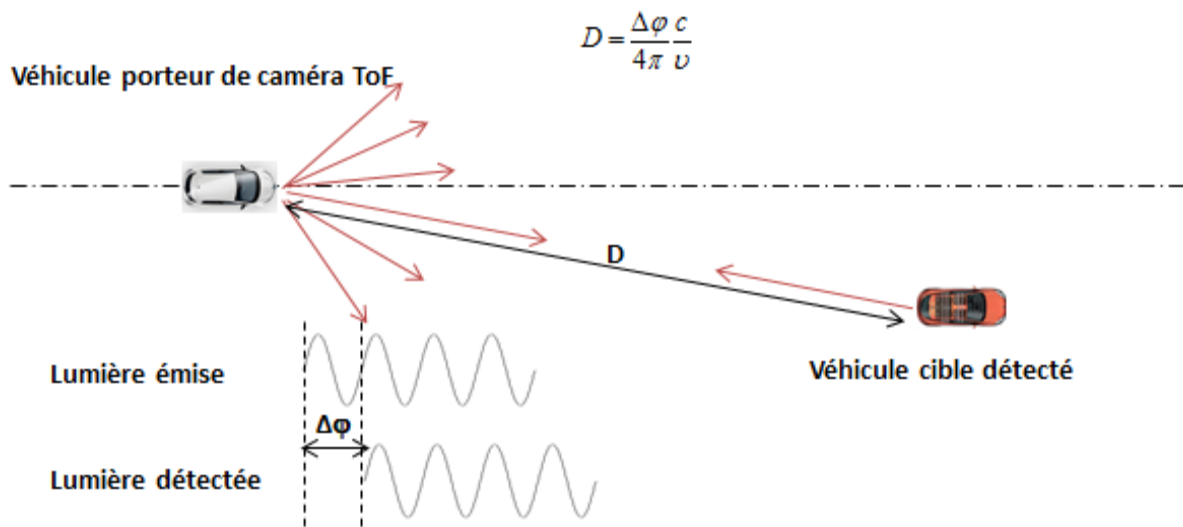


Figure I.6 Mesure de position par caméra ToF

Le principe de fonctionnement d'une caméra ToF est contraint par sa « distance d'ambiguïté », qui correspond à un déphasage maximal de 2π rad, car un déphasage est connu à $2k\pi$ près. En pratique, cette portée est limitée à quelques centimètres voire à une dizaine de mètres suivant la dimension du champ à couvrir et la puissance de l'émetteur. Pour cette raison, ces caméras sont souvent utilisées à l'intérieur des véhicules : par exemple, le système « Eye Tracking », embarqué sur Hyundai HCD14 et conçu par Tobii Technology, comporte deux capteurs d'images et des émetteurs dans le proche infrarouge, dont la distance de fonctionnement est 50-80 cm [12]. Ce système permet de détecter le mouvement des yeux du conducteur.

La figure I.7 ci-dessous montre une application de caméra ToF en extérieur : il s'agit de la caméra « A-Muster » Audi développée par PMD (Photonic-Mixer-Devices) Technologies, qui est envisagée pour des applications ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) comme Stop&Go, PreCrash et Pedestrian Safety.

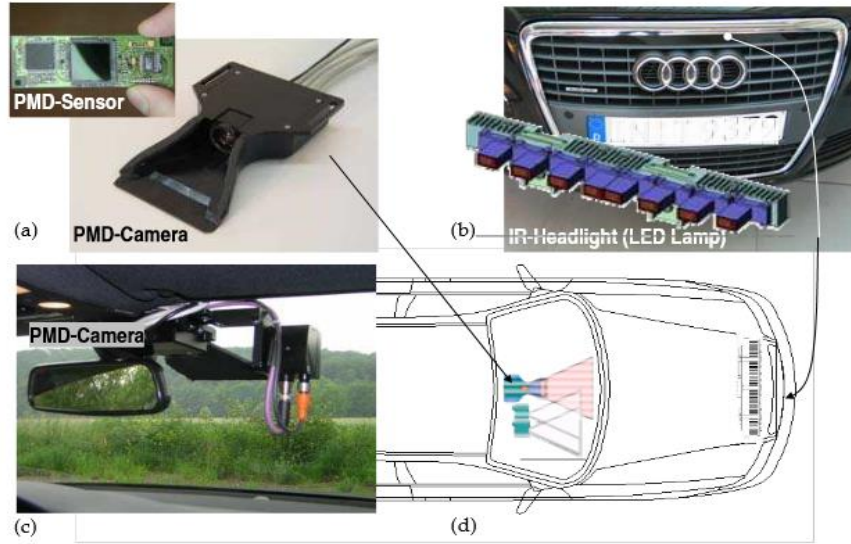


Figure I.7 Caméra ToF destinée aux applications pré-crash

Cette caméra est installée dans l’habitacle, derrière le pare-brise, et surveille l’avant du véhicule. Comme le montre la figure 7(d), des émetteurs infrarouges de faible puissance (1W, détail figure 7(a)) sont placés à côté de la caméra ToF, pour éclairer les objets proches (à moins d’une dizaine de mètres). D’autres émetteurs infrarouges, plus puissants (8W, figure 7(b)), sont installés à l’avant du véhicule, pour éclairer des objets plus éloignés. Les fréquences de modulation sont de 6,2 MHz et de 7,5 MHz, et la résolution en distance du système est ± 10 cm.

D’autres systèmes à base de caméra ToF sont aussi en réalisation chez des fournisseurs du secteur automobile, comme Melexis, SoftKinetic, Texas Instruments, Samsung, etc.

I.1.2 Systèmes passifs

1) Caméra monoculaire

Dans le domaine automobile, la méthode associant une caméra monoculaire à des algorithmes de traitement d’image est actuellement la plus utilisée dans les applications ADAS : le calcul de la distance d’un véhicule est basé sur l’identification de ce véhicule à partir des images brutes et sur la mesure de la dimension de son image donnée par la caméra. Une fois que l’objet a été identifié, et sa distance estimée, sa vitesse relative est déduite de la variation de sa distance en fonction du temps [13].

Comme le montre la figure I.8, l’objet cible ayant été identifié, sa distance D est donnée par la relation ci-dessous :

$$D \approx \frac{d}{\varepsilon} \approx \sqrt{\frac{A}{\Omega}} \quad (1.5)$$

Où d est une dimension caractéristique du véhicule observé, ε l’angle mesuré par la caméra (les logiciels s’appuient aussi sur le rapport de la surface A à l’angle solide Ω).

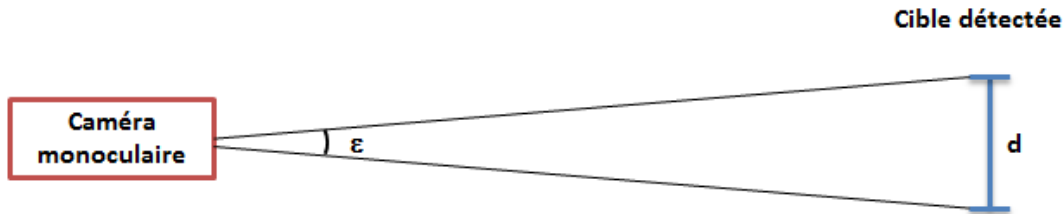


Figure I.8 Mesure de distance par caméra monoculaire

Il existe plusieurs algorithmes d'identification de véhicules, dont l'un des plus connus consiste à reconnaître la forme, qui s'applique dans les régions d'image où les contours d'objets ont été détectés par les primitives, pour reconnaître s'ils appartiennent effectivement à un type d'obstacle connu [14][15][16].

La figure I.9 montre les images brutes de plusieurs véhicules enregistrées par une caméra et comparées avec des modèles de bord de l'un d'entre eux dans différentes orientations, qui sont pré-caractérisés et enregistrés dans une bibliothèque accessible au système. Les véhicules ayant été identifiés, l'information sur le vrai dimensionnement de chaque véhicule associé avec l'angle mesuré permet de déduire leur distance et direction. Cette méthode nécessite une base de données énorme pour garantir l'efficacité d'identification, parce que le bord varie suivant l'orientation et les conditions d'éclairage du véhicule. De plus, cette méthode est moins efficace si un véhicule est plus ou moins caché derrière d'autres objets. Il faut aussi prendre en compte différents modèles de véhicules qui pourraient se présenter sur la route.

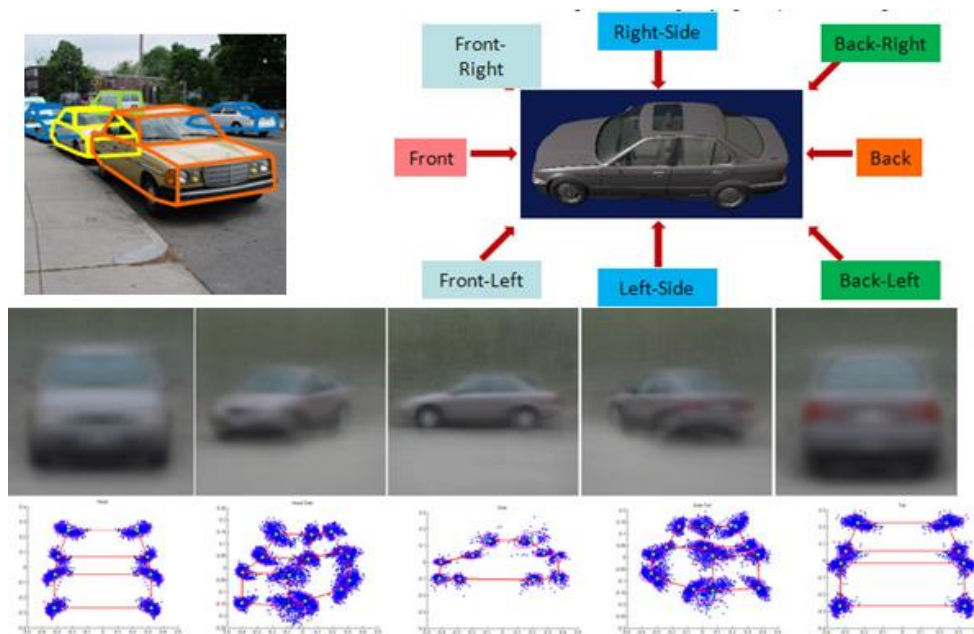


Figure I.9 Reconnaissance de forme d'un véhicule suivant différentes orientations

Un autre algorithme qui est également souvent utilisé consiste en l'analyse du flot optique introduit par les véhicules, sur une succession d'images fournies par la caméra embarquée. Tous les éléments immobiles de la scène sont, du point de vue du système de détection, animés d'un même mouvement. L'estimation de ce mouvement dominant permet donc de trouver les objets immobiles qui, une fois supprimés, laissent apparaître des pixels appartenant théoriquement aux objets mobiles. Ceux-ci peuvent alors être suivis pour assurer leur détection. L'estimation du mouvement dominant nécessite l'emploi d'une méthode robuste, car un grand nombre de pixels n'appartiennent pas à ce mouvement, ou appartiennent au fond de la scène mais sont trop lointains pour permettre une estimation précise. De nombreux auteurs font donc l'hypothèse d'une route plane, pour diminuer le nombre de paramètres à estimer et faciliter la mise en place d'une méthode robuste. Ces méthodes exploitant un calcul de flot optique sont limitées dans leur portée, en particulier dans la direction d'évolution du véhicule. Plutôt que d'exploiter la composante temporelle pour réaliser la détection des obstacles, celle-ci peut être dédiée au suivi des obstacles précédemment détectés. Ainsi, il a été proposé de créer un modèle d'un obstacle lors de sa première détection et de le rechercher dans les images suivantes par corrélation.

L'utilisation de l'infrarouge thermique est une solution attractive en caméra monoculaire pour la détection des piétons et des cyclistes, car elle permet de distinguer efficacement les sources de chaleur, et donc les humains. Le proche infrarouge, qui ne nécessite qu'une modification mineure aux caméras courantes (silicium) présente par rapport au visible la possibilité d'utilisation de nuit, grâce à l'éclairage de la scène avec une source infrarouge proche pour augmenter le contraste.

2) Stéréovision (méthode classique)

La stéréovision est une technique de vision fondée sur l'utilisation de deux, voire plus, capteurs d'image. En combinant les différents points de vue de ces capteurs, on peut accéder à des informations de profondeur difficilement accessibles dans le cas d'une caméra unique [17].

La figure I.10 montre le principe de la mesure de position (distance R et direction θ) par une caméra stéréoscopique, constituée de deux capteurs d'image, montée sur véhicule. Les deux capteurs d'image de gauche et de droite sont identiques, et placés horizontalement à la même hauteur, de façon telle que leurs axes optiques sont parallèles entre eux. Nous faisons l'hypothèse que l'axe de la caméra stéréo est l'axe mécanique du véhicule porteur du système stéréovision. La distance de séparation l'un de l'autre, B , est appelée « base ». Grâce à cette base, les objets d'une même scène ne sont pas vus par les deux capteurs sous le même angle [18].

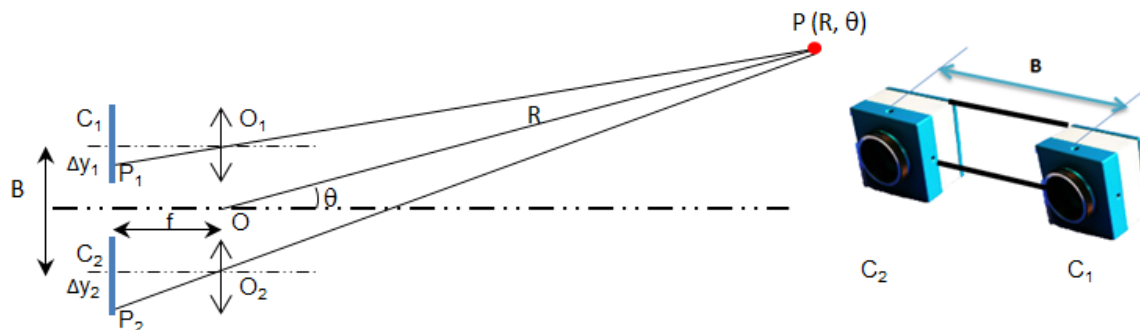


Figure I.10 Système stéréoscopique

Le point d'origine des coordonnées O se situe au centre de O_1O_2 , où O_1 et O_2 sont respectivement des optiques identiques des deux capteurs de gauche et de droite. Les deux matrices de détecteurs, C_1 pour le capteur de gauche, C_2 pour le capteur de droite, sont chargés de détecter les véhicules cibles qui sont dans leur champ de vision, situés en avant du véhicule porteur.

Supposons qu'un véhicule cible se trouve dans le champ de la caméra stéréo au point $P(R, \theta)$, et que P_1 et P_2 sont les positions respectives des images de P sur les deux matrices, aux plans focaux des deux capteurs. Δy_1 est l'écart entre P_1 et l'axe du capteur de gauche (C_1) et Δy_2 , l'écart entre P_2 et l'axe du capteur de droite (C_2). Si P_1 ou P_2 se situe à droite de la colonne centrale de la matrice de détecteurs correspondant, Δy_1 ou Δy_2 est positive. Si P_1 ou P_2 est à gauche, Δy_1 ou Δy_2 est négative.

Si f est la focale commune des deux capteurs d'images de la caméra stéréo, les coordonnées du point P sont données par les équations suivantes, pour une optique de type traditionnel (dite « sténopé ») :

$$\begin{cases} R = \frac{B\sqrt{(\Delta y_1 + \Delta y_2)^2 + 4f^2}}{2(\Delta y_2 - \Delta y_1)} \\ \theta = \arctan\left(\frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2f}\right) \end{cases} \quad (1.6)$$

Ici R est l'inter-distance entre O et P , soit la distance entre le point central O de la caméra stéréo du véhicule porteur du système et le point caractéristique du véhicule « cible », et θ l'angle entre la direction du véhicule « cible » et l'axe mécanique de la caméra stéréo.

Comme illustration, la figure I.11 présente deux images brutes enregistrées respectivement par les capteurs de gauche (en haut) et de droite (en bas) d'une caméra stéréoscopique, sur lesquelles apparaissent les images d'un véhicule. Chaque point du véhicule est décalé en horizontal des quantités Δy_1 et Δy_2 sur les images de gauche et de droite, ce qui introduit un décalage relatif $\Delta d = \Delta y_2 - \Delta y_1$ entre images, dénommé « disparité ». L'équation 1.6 ci-dessus permet de déduire la distance R et la direction θ de chaque point du véhicule à partir des paramètres $B, f, \Delta y_1$ et Δy_2 .

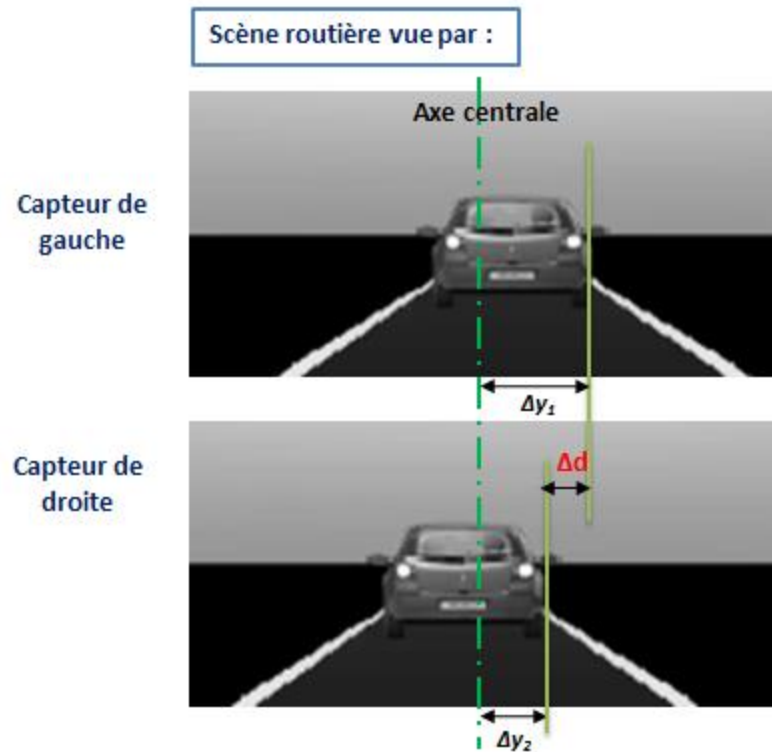


Figure I.11 Mesure de distance par caméra stéréoscopique

L'appariement entre les images des deux capteurs, c'est-à-dire la mise en correspondance des informations issues de chaque couple d'images du système stéréoscopique, permet de construire une image de disparité qui peut être interprétée comme une vue tridimensionnelle partielle de la scène observée [19][20]. Connaissant la configuration du capteur, par calibrage par exemple, les informations de disparité que contient cette image peuvent être traduites en mesures métriques. C'est donc la segmentation de cette image de disparité qui permet de réaliser la détection des objets présents.

L'identification d'un point donné de la scène par les deux capteurs est un point essentiel au bon fonctionnement du système. Elle est en général obtenue par l'une ou l'autre des méthodes utilisées dans les systèmes à caméra monoculaire, telles que celles décrites dans le paragraphe I.1.2) [21][22][23].

Cependant, comme il existe énormément de points dans une image, surtout pour les caméras de haute résolution, les algorithmes actuels de l'identification et de l'appariement ne sont pas assez efficace pour atteindre une performance de niveau suffisant élevé pour le besoin dans l'automobile.

Les premiers utilisateurs de caméra stéréoscopique dans le domaine de l'automobile sont principalement utilisateurs étant Mercedes-Benz, Subaru et Lexus/Toyota.

Le système EyeSight [24], développé en collaboration par Subaru et Hitachi, est un système d'aide à la conduite, qui avertit le conducteur de façon sonore et visuelle en cas de danger potentiel de collision frontale, et qui lui procure, si besoin est, quatre moyens d'assistance préventive : régulateur de vitesse adaptatif ; freinage précollision ; gestion de l'accélération précollision ; alerte de louvoirement et de

déviations de trajectoire. Comme le montre la figure I.12, les deux capteurs qui observent la route devant le véhicule, sont montés derrière le pare-brise, en hauteur, de part et d'autre du rétroviseur intérieur. Ces deux capteurs sont à la distance de 35 cm l'un de l'autre, leur champ de vision est de 25° en horizontal et de 13° en vertical, la portée de 50m, et la précision en mesure de position a été annoncée être de quelques centimètres à 2m. Le bloc de traitement du système, fourni par Fuji, permet d'identifier les objets en tant que véhicules, vélos, piétons et motos. Le coût d'un tel système est de 2200 dollars (il était de 4000 dollars pour la 1^{ière} génération).



Figure I.12 Caméra Stéréo EyeSight (Subaru)

Un autre exemple de caméra stéréoscopique est le système « 6D Vision » de Mercedes-Benz (figure I.13), le terme « 6D » traduisant le fait que le système est supposé prédire ce que sera la scène en 3D 0,5s après la scène en 3D actuellement mesurée [25]. Ce système permet de prendre des décisions à la place du conducteur en analysant les mouvements des cibles détectées, pour des vitesses inférieures à 50km/h. Il possède les spécifications décrites ci-dessous :

- La base de la caméra est 30 cm
- Champ de vision horizontal : 45°
- Portée d'un capteur seul : 500m
Portée de l'ensemble des deux capteurs pour l'imagerie en 3D : 50m
- Temps de réponse : 200 ms
- Identification entre véhicules, piétons, vélos et animaux
- Le système est associé à un Radar pour les applications Stop&Go et ACC à une vitesse maximale de 40 km/h



Figure L13 Prototype Caméra 6D Vision Mercedes-Benz

I.1.3 Systèmes actifs-passifs

Une troisième approche est de coupler 2 types de capteurs, actifs et passifs, soit de concevoir un système « multi-capteurs », ce qui permet d'améliorer la fiabilité grâce à la combinaison des informations issues de plusieurs capteurs et permet d'accéder à des mesures complémentaires ou à une redondance d'informations qui assure une plus grande fiabilité de fonctionnement [26].

De nombreuses équipes en recherche et développement ont travaillé sur des systèmes spécifiques exploitant un couple de capteurs constitué, la plupart du temps, d'un capteur de vision associé à un capteur actif. Il existe des exemples de coopérations entre radar et vision monoculaire, lidar et vision monoculaire, ou encore lidar et stéréovision [27][28]. La combinaison de plusieurs algorithmes de vision ou de la vision monoculaire avec la stéréovision sont des pistes qui ont également été explorées avec succès [29][30].

Par exemple, le projet CARSENSE (2000-2002), regroupant 12 partenaires, industriels et laboratoires de recherche, y compris deux constructeurs automobiles, Renault et BMW, a pour but de récupérer des informations fiables sur le trafic en conditions urbaines (conduites à faible vitesse) destinées aux applications ADAS, plus particulièrement l'ACC [31]. Le trafic dans ces zones concerne des scénarii compliqués, caractérisés par :

- Présence des embouteillages avec des véhicules arrêtés ou roulant à faibles vitesses
- Beaucoup de motos
- Des croisements
- Trafic mêlant des transports motorisés, des vélos et des piétons
- Des géométries routières pouvant comprendre des courbes, des ponts, des mini-tunnels et des travaux routiers

Le système développé dans le projet CarSense est un système de fusion de données multi-capteurs destiné à détecter des objets situés en avant le véhicule porteur du système. Il est constitué d'un

l'ensemble de capteurs internes et externes où l'information obtenue par chaque capteur est ensuite fusionnée dans une unité de traitement spécifique. Les capteurs internes donnent des informations sur le véhicule porteur, telles que sa vitesse et l'angle de volant. Les capteurs externes comportent un Radar, un Lidar et des capteurs d'image, qui donnent l'information externe au véhicule, telles que les obstacles qui sont présent devant lui. Les capteurs et les unités de fusion de données sont reliés entre eux par le bus CAN.

La figure I.14 ci-dessous montre l'architecture de l'enregistrement des données des capteurs internes et externes du système CarSense.

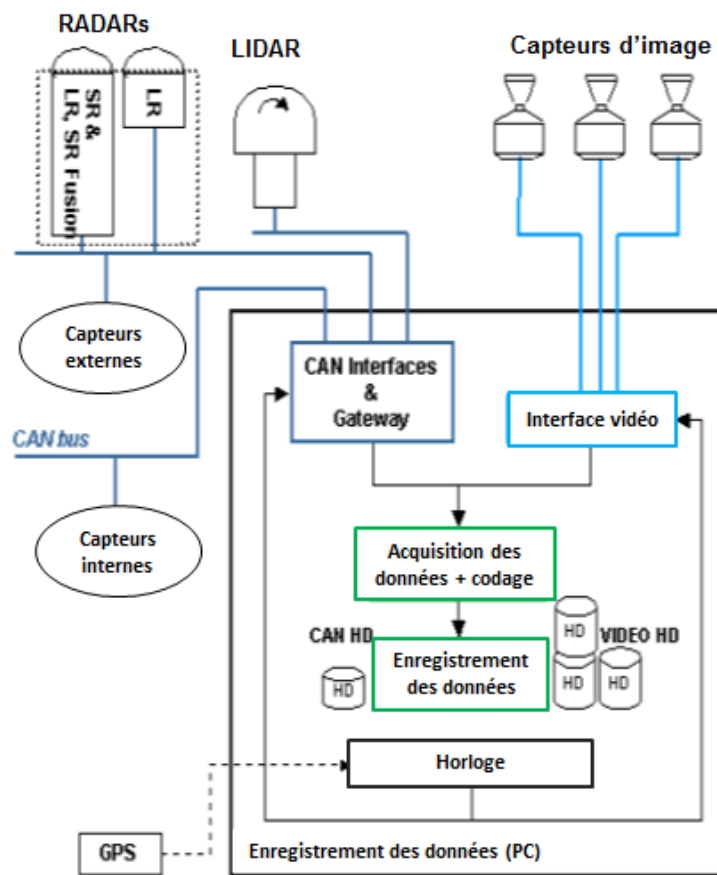


Figure I.14 Architecture de l'enregistrement de données CARSENSE

L'un des Radars qui sont utilisés dans le projet CarSense est le Radar AC20 Autocruise, décrit dans le paragraphe I.1.1, qui permet des mesures de la vitesse relative avec une précision de 0,2 km/h.

Le Lidar utilisé est un scanner laser IBEO LD Automobile, de faible divergence et possédant un DSP intégré pour le traitement du signal. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Angle de balayage horizontal : 180°
- Angle de balayage vertical : 3,2°
- Séparation angulaire du faisceau : 0,25°

- Divergence du faisceau laser : 5 mrad (diamètre du faisceau : 50 cm à 100 m)
- Fréquence de balayage : 10 Hz
- Portée :
 - Cibles réfléchissantes : 150 m
 - Cibles sombres (réflectivité 5%) : ~30 m
- Écart type de mesure de distance : +/- 5 cm (1 sigma)
- Eye-safe laser (classe 1)

Le système comporte également une caméra stéréo à grande dynamique (HDR) et à haute résolution, développée par Jena-Optronik GmbH. Cette caméra 512 x 512 pixels a une cadence image minimale de 20 Hz, possède une dynamique de plus de 100 dB et un dispositif anti-Blooming. Ses caractéristiques sont telles que :

Capteur (Optique + détecteurs) :

- Distance de mise au point : 5 m - ∞
- FOV : 40° en horizontal / 40° en vertical
- Spectre : 400-800nm
- Type : Active Pixel B/W CMOS
- Résolution : 512 x 512 pixels
- Dimensionnement : 6,4 x 6,4 mm²
- Cadence : ≥ 20 Hz
- Lecture : accès direct
- HDR : > 100 dB
- Anti- Blooming
- Synchronisation entre les capteurs

Interface et conditions de fonctionnement :

- Output : data de 12 bits (3 signaux de contrôle)
- Output après sérialisation : 4 paires de signal LVDS
- Horloge de transmission des pixels : 20 MHz
- Alimentation : 12 ± 1.2 V
- Dimensionnement global : 140 x 50 x 50 mm³
- Opération : -20 °C - +55 °C
- Stockage : -20 °C - +70 °C

La figure I.15 montre le véhicule d'essai du projet CarSense, l'Alfa 156 Sportwagon 2.0 Selespeed, avec les capteurs embarqués. On notera que chacun contribuant au système par les mesures qui lui sont propres, cette complémentarité permet une meilleure fiabilité des résultats.

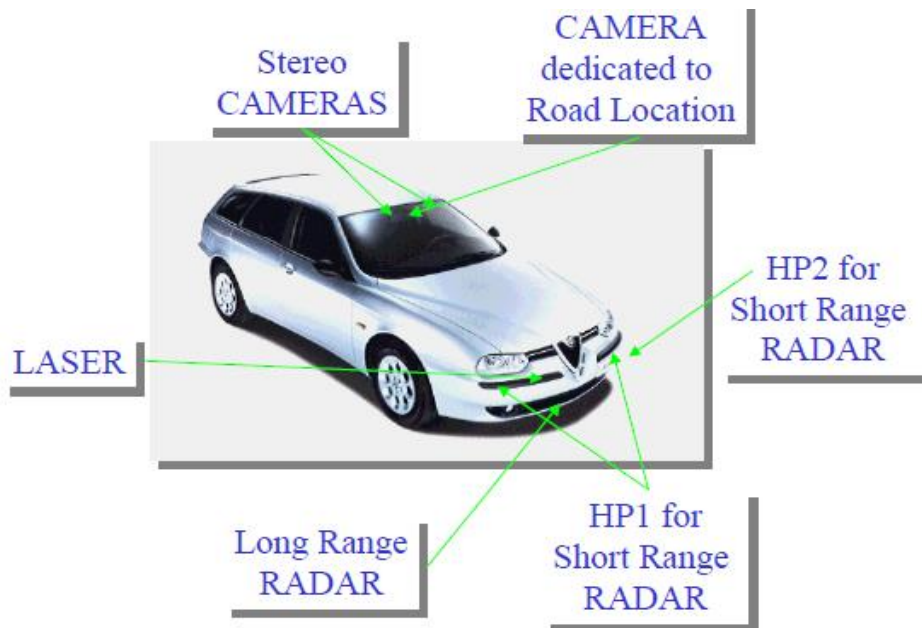


Figure I15 Véhicule d'essai CarSense : Alfa 156 Sportwagon 2.0 Selespeed

D'autres constructeurs automobiles, comme Volvo, Mercedes-Benz, Honda, etc., proposent également des systèmes actifs-passifs. Volvo a équipé ses limousines V60 et V80 d'un système d'aide au freinage devant les piétons, qui consiste en un ensemble constitué d'une caméra monoculaire développée par Mobileye et d'un Radar, destiné à détecter les piétons et les vélos situés devant le véhicule, à prévenir le conducteur du danger et à prendre la main au cas où ce dernier ne réagissait pas suffisamment rapidement.

I.1.4 Synthèse

Une synthèse de comparaison des différentes méthodes analysées dans ce chapitre est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau I-1 Synthèse de comparaison des différents systèmes anticollision

	Systèmes actifs			Systèmes passifs		Systèmes actifs-passifs
	Radar	Lidar	Caméra ToF	Monoculaire	Stéréovision	
Champ de vision	o	--	++	++	++	++
Portée	++	++	--	o	o	+
Résolution angulaire	-	+	+	+	+	+
Conditions météorologiques	++	-	-	-	-	+
Consommation d'énergie	-	-	-	++	++	-
Complexité traitement	-	-	-	--	--	-
Sécurité oculaire	++	o	-	++	++	++
Interférence EM	--	++	++	++	++	o
Coût	--	--	-	++	++	--

++ : Performant + : Bien o : Réalisable - : Possible mais du travail doit être consacré -- : Difficile

L'avantage du Radar par rapport aux capteurs optiques est leur capacité à fonctionner dans la plupart des conditions météorologiques, comme la pluie, la neige, le brouillard. Également, ils possèdent une portée et une précision en distance importantes [32][33].

Cependant, le radar présente un certain nombre de limitations :

- L'angle de vue est en général faible pour l'application envisagée (environ 10 degrés pour un radar longue portée, jusqu'à 70° pour un courte portée) et ne permet donc pas de percevoir des objets situés autour de ce cône d'ouverture. La résolution angulaire étant par ailleurs très limitée, elle ne permet pas nécessairement de distinguer deux objets situés côte à côte.
- L'étude de données radar laisse apparaître de nombreux échos parasites dans la chaussée ou sur les bords de route. Pour éviter que cela ne provoque un grand nombre de fausses détections, les objets immobiles sont généralement filtrés en comparant la mesure de leur vitesse à la vitesse du véhicule équipé. Un véhicule à l'arrêt au milieu de la voie ne sera donc pas détecté.
- Très forte variation de la SER (Surface Équivalente Radar) d'un véhicule à un autre : par son principe même, le radar détecte avec difficulté les cibles de faible SER. Par ailleurs, si ces technologies sont efficaces pour la détection de véhicules partiellement métalliques, elles sont peu efficaces pour détecter des piétons, ce type de cible créant peu d'écho.

De son côté, le Lidar est très sensible au tangage du véhicule instrumenté à cause de la finesse du faisceau laser, ce qui peut amener le plan de balayage à couper la surface de la route, qui peut alors être perçue comme un obstacle [34]. Ce défaut est parfois corrigé par l'utilisation d'un laser multi-plans qui permet de reconstruire une vue 3D partielle de la scène. Si ce type de capteur est de plus en plus étudié, il reste néanmoins une solution à long terme pour le contexte automobile, tant l'utilisation de parties mécaniques mobiles à l'intérieur le rend fragile et onéreux.

En ce qui concerne la caméra ToF, ses mesures de distance sont très précises, mais sa portée est très faible, souvent d'une dizaine de mètres. Or, cette portée est insuffisante pour réagir dans les scénarii pour l'évitement des collisions potentielles.

Pour ce qui est de la caméra monoculaire, elle permet, pour un coût très faible, d'accéder à une grande quantité d'informations sur un large champ de vue. Cependant, elle doit faire appel à des algorithmes de traitement d'images complexes pour assurer l'identification d'un véhicule, paramètre indispensable à la mesure de distance du véhicule détecté. Cette identification est rendu très difficile par les variations de l'éclairage ambiant et l'orientation du véhicule.

Pour s'affranchir des variations de l'éclairage ambiant, et optimiser les capacités d'identification, les systèmes utilisent des caméras mégapixels et HDR (High Dynamic Range). Malgré cela, le calcul est souvent lourd, et le temps de réponse du système est de beaucoup supérieur au temps de réaction exigé. Pour cette raison, la caméra monoculaire est rarement utilisée seule mais souvent avec d'autres moyens comme les Radars, ou les Lidars, ce qui est commenté dans le chapitre suivant.

Les caméras stéréoscopiques classiques, sont en performance par leur capacité à reconnaître et à appairer un véhicule donné sur les deux images des véhicules. De nombreuses fausses alarmes peuvent

perturber ces systèmes à cause de la complexité des traitements d'image nécessaires à la détection des véhicules « cible » et à la mise en correspondance des images des deux capteurs. L'algorithme de traitement est assez lourd mais pas toujours très efficace.

Ainsi, pour ces systèmes passifs, la complexité de la scène routière d'aujourd'hui est un défi. Le traitement à appliquer doit être adapté à chaque situation particulière (type d'environnement, vitesse roulante, éclairage du fond...). En plus, l'efficacité de l'algorithme de traitement dépend largement de la qualité de l'image originale enregistrée. Si les images brutes ne sont pas de bonne qualité, les traitements ne sont pas efficaces par manque d'information, ce qui ne permet pas de prendre des décisions appropriées. Pour ces raisons, les systèmes passifs ne sont pas suffisamment robustes pour adapter à toutes les conditions de conduite. Une très bonne synthèse de ces différentes familles de systèmes peut être consultée dans l'article de Sayanan Sivaraman et Monubhai Trivedi [35].

Pour conclure, aucun des systèmes décrits précédemment n'est parfaitement satisfaisant, sauf peut-être les systèmes actifs-passifs, qui proposent la combinaison des multi-capteurs et ainsi la fusion des données brutes, ce qui est une voie prometteuse en termes de performance et de robustesse. Leurs défauts comportent la complexité de traitement et de fusion des données ainsi que leur coût élevé.

I.2 Principe choisi : système anticollision par vision stéréo coopérative

La demande exigeante par les applications de sécurité en automobile, destinée pour prévenir de toutes les collisions possibles par des véhicules présentés sur la route, montre qu'il nous faut un système de détection fiable, décrit par les caractéristiques principales ci-dessous :

- Capable de détecter les véhicules environnants et de mesurer la trajectographie de chaque véhicule détecté
- Grand champ pour prendre en charge de tous les véhicules environnants
- Longue portée pour réagir suffisamment tôt aux collisions
- Bonne résolution et bonne précision pour des mesures fiables
- Système qui fonctionne dans n'importe quelle condition météorologique et dans tous les scénarii routiers (complexe, à grandes vitesses)

Auprès l'analyse sur des systèmes existant décrit dans le paragraphe précédent, la mesure de distance par la triangulation (caméra stéréoscopique) nous apparaît satisfaisante [36]. Cependant il faut un système qui est plus robuste en détection et en capacité du traitement des données.

L'introduction dans le domaine de l'automobile de sources optiques modulables aussi bien spatialement que dans le temps permet d'envisager de nouveaux systèmes optiques de détection que nous dénommons coopérative dans le sens où les sources contribuent fortement à leur propre détection et éventuellement à l'enrichissement d'informations supplémentaires [37]. De façon plus générale, nous désignons par cette appellation générique tout système permettant aux différents acteurs d'une scène de "s'entraider" afin de fournir un gain en performance globale. Ainsi, cela nous a conduits à envisager une solution dite « coopérative », qui permet de réduire considérablement le nombre de points à traiter sur des images brutes de la scène grâce à la coopération entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, l'image obtenue de la scène se résume à un « fond noir avec des points ou des zones brillants », qui

représentent chacun une cible détectée. Un autre avantage de la méthode choisie est qu'il pourrait posséder une grande portée et en même temps un grand champ de vision.

Nous décrivons le principe du système choisi dans le paragraphe 1.2.1. Le paragraphe 1.2.2 suivant décrit des applications très variées existantes ou proposées dans cette configuration, en particulier dans le domaine des télécommunications inter-véhicules.

I.2.1 Exemples de systèmes coopératifs

Fabrizio propose d'équiper les obstacles routiers de codes-barres, et constitués de bandes adhésives comprenant des grains réflecteurs dans le proche infrarouge, visibles à longue portée, et pouvant contenir une information codée [38]. Aufrère et al. ont équipé un véhicule d'amers, soit deux feux arrière et un phare sur le toit, pour en faciliter la détection et obtenir immédiatement une mesure de distance en vision monoculaire, la position relative des amers étant connue [39].

Les télécommunications inter-véhiculaires (V2V) [40][41], ou l'infrastructure aux véhicules (I2V22), par radio, constitue l'un des domaines les plus explorés actuellement pour le développement d'aides à la conduite. Un état de l'art des technologies exploitables peut être trouvé dans [42]. Les télécommunications permettent de transmettre des avertissements de façon quasi-immédiate, ou du moins nettement plus rapidement qu'un système de détection ne pourrait les fournir, ce qui apporte un gain réel en termes de sécurité. Elles peuvent également fournir des informations en provenance de l'infrastructure, permettant par exemple d'avertir le conducteur d'un danger situé au-delà de la portée des autres systèmes perceptifs du véhicule. Outre la transmission de ces données symboliques, l'émission de données numériques (vitesse, poids, dynamique, ...) par les différents acteurs d'une portion de réseau routier permet la construction de cartes dynamiques enrichies de l'environnement proche, par chacun des véhicules récepteurs. Celles-ci peuvent alors être utilisées pour des fonctions avancées d'aide à la conduite, comme la prévention des dangers en intersection.

Pour qu'un message envoyé par un véhicule à un autre soit exploitable par ce dernier, celui-ci a besoin d'identifier le véhicule émetteur car les télécommunications V2V qui ne sont pas directives [43]. Cela peut être obtenu par une localisation très précise des différents protagonistes de la scène dans un référentiel absolu, la localisation de l'émetteur étant alors envoyée avec le message. Le récepteur étant lui aussi localisé dans le même référentiel, il peut vérifier à l'aide d'un système de cartographie si l'émetteur est sur sa voie de circulation et donc si le message le concerne. Cette solution est cependant peu compatible de la précision des systèmes de localisation actuellement disponibles pour des applications automobiles (type GPS) [44]. De plus, même dans le cas de systèmes très précis, de type GPS différentiels, le fonctionnement de tels systèmes n'est pas assuré dans de nombreuses situations, comme les tunnels ou les canyons urbains. Un système d'identification de véhicules, fondé sur la vision, permet de pallier cette faiblesse des télécommunications V2V.

Un système d'identification de véhicules, fondé sur la vision, permet de pallier cette faiblesse des télécommunications V2V [45]. Premachandra [46] propose un système de 'VLC' (Visible Light Communication) entre une caméra rapide de cadence d'image 1000 Hz et des Leds modulées à 500 Hz [47][48]. La détection des Leds modulés est faite en calculant la différence des deux images successives,

ainsi qu'en appliquant plusieurs caractéristiques de vérification. Par exemple, la dimension de l'image des Leds et l'intensité des pixels ont été examinées. Cependant, pour que leur algorithme de détection fonctionne correctement, la distance de détection est limitée entre 20m et 70m à l'avant du véhicule. En plus, le suivi des Leds nécessite des algorithmes lourds supplémentaires, qui consiste principalement à la détection des contours et des flux optiques.

De nombreuses méthodes autres que l'utilisation de caméra rapide ont été développées récemment. Yang et al. [49] présente la méthode de 'modulation d'amplitude d'impulsion différentielle' (Differential pulse amplitude modulation) qui consiste à transmettre différents signaux NRZ-OOK d'amplitude identique et de retard propre à chaque LED, ce qui permet de faciliter la démodulation et d'augmenter le débit des données. D'autres algorithmes sont tous des méthodes récentes pour augmenter le taux de détection, comme la 'sub-pulse Manchester modulation' [50], segmentation de couleur ensemble avec CAMSHIFT (Continuously Adaptive Mean Shift) [51], modulation ON/OFF [52].

Peu de méthodes ont été proposées pour réaliser une telle identification par voie optique : l'une des solutions envisagées est la lecture de plaques d'immatriculation ou de codes-barres coopératifs, mais la portée reste néanmoins fortement limitée par la résolution du capteur, puisque cette solution suppose la reconnaissance d'un motif spatial. Pour tirer parti de la grande portée des télécommunications, il est donc préférable de coder l'identifiant de façon temporelle. Takada propose pour cela un système qui combine deux émetteurs infrarouge et une trame de télécommunications, qui ont un protocole commun permettant de les associer [53].

I.2.2 Système choisi : la vision coopérative

Le développement récent de LEDs très performantes et économes en énergie favorise la conception de systèmes optiques coopératifs pour l'automobile [54][55][56] ou pour des systèmes de navigation en robotique en intérieur [57][58]. Par exemple, on citera le cas des DRL (Day Running Light), qui sont devenue obligatoires en Europe depuis 2011. Dans le cadre de la thèse, nous proposons d'une part que les feux à Led avant et arrière des véhicules soient modulés à une fréquence plus élevée que celle de la plupart des sources lumineuses constituant une scène routière typique et d'autre part que les caméras d'observation soient filtrées à cette fréquence de modulation.

La méthode est applicable à la vision monoculaire, et c'est à cela qu'est consacré le travail effectué au cours de cette thèse. Si l'on allait plus loin dans le sens d'estimer la distance des obstacles, l'avantage de cette coopération est de réduire le nombre de points à appairer dans les images stéréo aux seuls feux à Led, par filtrage sur l'ensemble de la scène routière, chaque caméra se comportant comme un filtre à la fréquence de modulation des Leds présentées dans son champ de vision. L'hypothèse étant qu'une scène naturelle est non modulée ou très peu modulée à cette fréquence, les capteurs sont seulement sensibles à des signaux modulés à cette fréquence particulière et donc rejettent le fond qui n'est pas recherché.

Le résultat attendu de chaque capteur de la caméra stéréo est présenté sur la figure I.16. On voit sur l'image brute d'un capteur de la caméra une scène où une vingtaine de véhicules sont présents sur la route. Pour la clarté de la démonstration, nous supposons que trois véhicules sont équipés de feux à Led arrière modulés à une certaine fréquence connue, à laquelle le capteur est adapté. Le filtrage transmet

les signaux issus des feux modulés et rejette, au moins dans une large mesure, les signaux qui ne sont pas à la fréquence recherchée. Le traitement étant appliqué en parallèle sur chaque pixel de la matrice de détecteurs, chaque capteur délivre théoriquement une image de la scène constituée seulement des feux à Led modulés à la bonne fréquence, comme le montre l'image de droite de la figure 16. Le fond de l'image, peu ou pas modulé à cette fréquence, a été éliminé complètement, ce qui donne un fond noir.

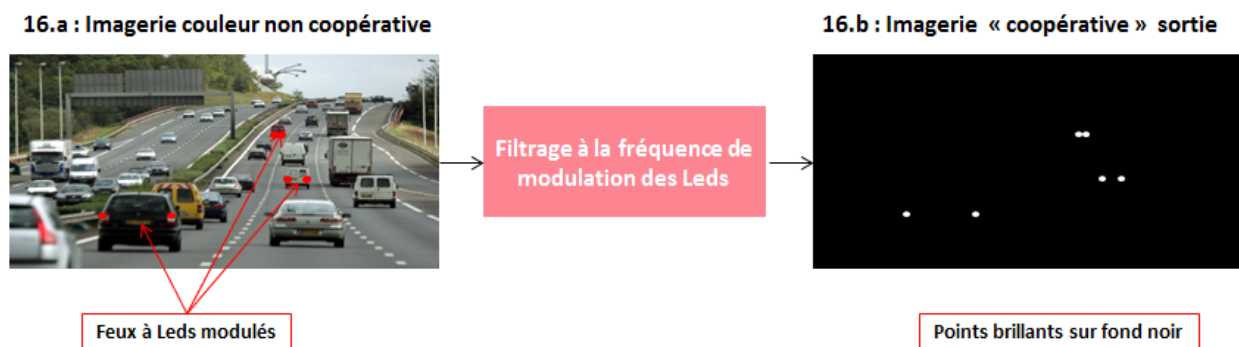


Figure I.16 Exemples d'une imagerie sur 3 paires de feux à Leds arrière modulés

Pour que le système fonctionne correctement, il faut que l'ensemble des véhicules soit équipé de feux modulés à une fréquence unique, identique pour tous. Les images issues de chaque capteur après filtrage seront comparées par le système stéréo pour la mise en correspondance de chaque paire de points amers et pour le calcul de la position de chaque véhicule « cible » par le principe de la triangulation, exposé dans le paragraphe I.1.2.

Par rapport aux méthodes classiques en stéréovision, la détection des véhicules « cibles » par notre système est simplifiée par le fait que les images à appairer ne contiennent qu'un très faible nombre de points lumineux sur fond uniforme noir, ce qui est un avantage décisif pour la mise en correspondance entre les images des deux capteurs. Comme le nombre de points à traiter et le calcul correspondant sont significativement réduits, l'efficacité de la mise en correspondance et la robustesse aux erreurs sont beaucoup améliorées.

La mise en œuvre générale du système proposé devrait être compatible de tous les feux à Leds qui sont déjà embarqués sur les véhicules, à l'avant ou à l'arrière, modulés à la même fréquence, et nécessite leur installation sur les véhicules qui en sont dépourvus. Comme le montre la figure I.17, le véhicule A est le véhicule « suiveur » qui est constitué d'une caméra stéréoscopique ainsi que les feux à Leds modulés. Le centre de la caméra stéréo est indiqué par le cercle vert, la caméra étant installée de façon à observer l'avant du véhicule, soit au niveau des phares, soit à l'intérieur du véhicule juste derrière le pare-brise. Les véhicules B et C sont des véhicules « cibles » par rapport au véhicule A, qui sont aussi équipés deux feux à Leds modulés à la fois à l'avant et à l'arrière. On note que le véhicule B roule dans le même sens et sur la même voie que le véhicule A, alors que le véhicule C roule sur la voie voisine à côté, dans le sens inverse de croisement, ce qui explique respectivement les scénarii fronto-arrière et fronto-frontale. Ce sont deux configurations typiques pour les scénarii routiers, qui représentent les deux possibilités les plus souvent dans le cadre de détection des véhicules « cibles » par la caméra stéréoscopique.

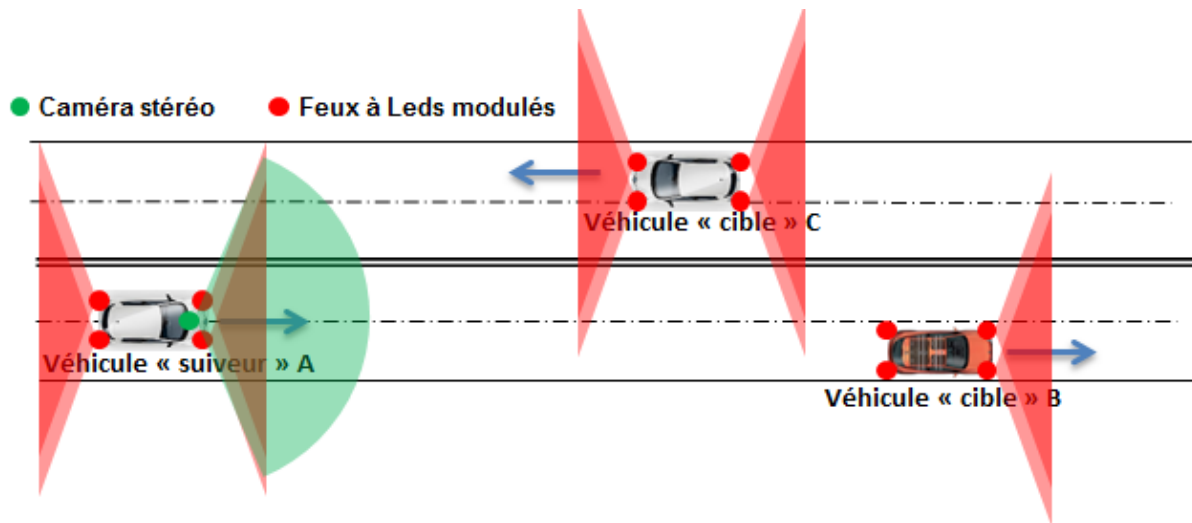


Figure I.17 Système vidéo coopératif inter-véhicules

La zone d'éclairage des LED est très large, comme le montrent les zones en rouge. La caméra dispose d'un grand champ de vision, qui permet de détecter tous les feux dans son champ de vue, quel que soit le sens de roulage du véhicule « cible ».

Il est envisageable que les véhicules « cibles » soient eux aussi équipés de caméra stéréo. Dans ce cas, le véhicule C est aussi capable de détecter le véhicule A, et de réagir de son côté, si nécessaire, aux collisions potentielles avec ce dernier.

I.3 Techniques de détection vidéo coopérative

Pour réaliser le filtrage temporel spécifique du signal issu des feux à Leds modulés par rapports à celui de l'ensemble des autres points de la scène, nous avons envisagé deux solutions, décrites ci-après : soit un filtrage analogique par rétine artificielle, soit un filtrage numérique par traitement d'image.

I.3.1 Rétine

La solution de filtrage par « rétine » artificielle consiste en l'utilisation de capteurs dotés de cette capacité au niveau du plan focal, dans le circuit à l'intérieur du capteur, permettant de bénéficier d'une puissance de calcul importante intra-circuit et d'effectuer des calculs massivement parallèles à basse consommation d'énergie, et de réduire au minimum voire d'éviter le développement de matériels nécessaires à la mise en œuvre des nouvelles applications et de bénéficier de toute la souplesse d'une solution logicielle [59].

Le développement des rétines artificielles a été soutenu par celui de la technologie CMOS submicronique, qui permet d'intégrer du traitement au sein de chaque pixel dans le plan focal du capteur d'image. Ces unités peuvent faire appel à des montages soit analogique, soit numérique, appelés processeurs élémentaires, soit les deux à la fois.

La figure I.18 montre une possibilité de filtrage par rétines, où chaque pixel comprend une succession de composants analogiques : un filtre passe-bande suivi d'un redresseur et d'un intégrateur, qui transforme

chaque signal incident modulé en niveau de gris (en anglais : DN ou Digital Number), mais ne délivre pas de signal de sortie en réponse à un signal d'entrée continu, la valeur du DN représentant l'énergie reçue en provenance des sources modulées pendant une trame d'acquisition de la caméra.

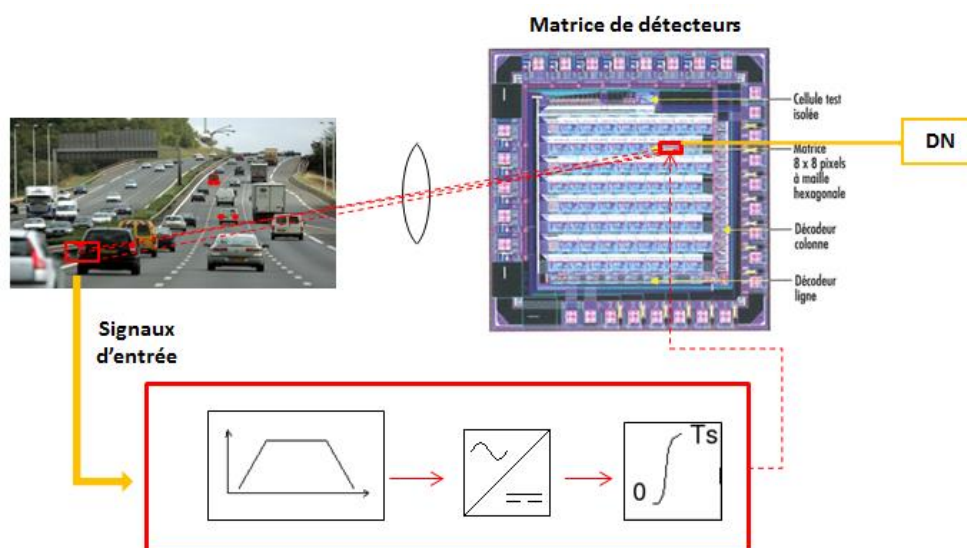


Figure I.18 Principe de rétine à filtres analogiques

Un seuillage sur le niveau de gris permet d'éliminer la plupart des pixels de la scène pour ne conserver que les quelques pixels correspondant aux feux modulés.

La figure I.19 montre un exemple de carte intégrant une rétine artificielle et son optique associée, développée par Digiteo Labs. L'architecture de la rétine comprend une matrice de photorécepteurs de type APS et des opérateurs câblés, sur le bord de la matrice, programmables (un égaliseur d'histogramme, un filtre Gaussien capacitif, un filtre DoG ou « Difference of Gaussians » et un extracteur de primitives Min/Max) [60]. La rapidité du traitement analogique 1D compense non seulement le mode séquentiel du traitement, qui se fait dans ce cas en ligne par ligne, mais diminue aussi le temps du traitement global et rend configurable le temps d'exposition des pixels. Cette répartition favorise naturellement la résolution spatiale, la surface photosensible et la mise en œuvre des opérateurs plus complexes sans trop pénaliser la performance globale de système de vision.



Figure I.19 Carte Digiteo Labs intégrant la rétine et l'optique associée

Néanmoins, la réalisation d'une rétine est un défi en microélectronique. Les rétines sont réalisées par des « fondeurs », tels que CMP (Circuits Multi-Projets) à Grenoble, et un développement de rétine

comporte plusieurs processus, comme l'établissement du cahier des charges, le choix des technologies, la conception et la validation du montage, la fabrication et le test. Comme les technologies actuelles ne garantissent pas un fonctionnement satisfaisant, il est souvent nécessaire, à la suite des tests, de faire des modifications et de relancer une fabrication. En général, il faut compter 2-3 ans au minimum et un coût important pour développer une rétine.

Par ailleurs, à cause de l'intégration des unités de traitement dans les pixels, l'architecture des pixels d'une rétine est profondément modifiée par rapport à celle de matrices classiques, dont les pixels ont des tailles minimales de l'ordre de quelques microns. Au contraire, les pixels des rétines artificielles, doivent être assez grands pour pouvoir y implanter toutes les unités ou composants de traitement. Il en résulte que la taille d'un pixel de rétine artificielle est souvent de l'ordre de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, avec un taux de remplissage faible et une résolution de capteur limitée.

Ainsi, pour des contraintes de temps, de budget, et de maturité insuffisante du sujet de recherche initié par cette thèse, la solution de filtrage analogique par rétine artificielle n'a pas été retenue dans le cadre de la thèse. C'est pourquoi nous avons choisi une solution numérique par traitement d'image après acquisition par la caméra, solution dont le principe général est décrit dans le paragraphe I.3.2 suivant.

I.3.2 Filtrage par traitement d'image

Au contraire du filtrage par rétine, le filtrage par traitement numérique des images s'effectue à l'extérieur de la matrice et s'applique sur les images déjà acquises par la caméra et transmises à travers son interface de sortie. Pour le système anticollision, nous proposons le filtrage du signal utile modulé, provenant des feux à Leds, au niveau de chaque pixel d'un capteur rapide, sur les DN de chaque pixel de ces images, alors que les signaux du fond, non ou peu modulés, sont éliminés. La question sera examinée en détail au chapitre 3. Dans cette fin d'introduction, nous rappelons que la transformée de Fourier elle-même constitue un filtre adapté à la recherche de signaux sinusoïdaux. Si la modulation du feu à Leds est sinusoïdale, la recherche de cette fréquence est donc une première approche utile du filtrage à effectuer : c'est ce que nous développons ici en quelques lignes.

Dans le cadre de la thèse, nous avons élaboré et testé plusieurs filtres qui sont des variantes du filtrage adapté par TFD (« Transformée de Fourier Discrète »), qui permet à partir de l'échantillonnage régulier d'un signal, d'en calculer la composition spectrale sur un ensemble discret de fréquences [61].

La sélectivité en fréquence d'un filtre TFD repose sur les propriétés de l'analyse en fréquence de la transformée de Fourier : soit un signal $x(t)$ échantillonné sur N valeurs x_n à intervalles de temps égaux consécutifs $\Delta T (n=0, 1, 2 \dots N-1)$, donc à la fréquence d'échantillonnage f_e , donnée par la relation :

$$f_e = \frac{1}{\Delta T} \quad (1.7)$$

La TFD décompose le signal échantillonné sur un nombre fini N de fréquences, pour lesquelles il délivre la composante spectrale normalisée $X[k]$, qui comporte une partie réelle et une partie imaginaire, données par la sommes des produits des échantillons respectivement avec les cosinus et les sinus indiqués par l'expression suivante :

$$X[K] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2\pi K}{N} n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos\left(\frac{2\pi}{N} Kn\right) - j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin\left(\frac{2\pi}{N} Kn\right) \quad (1.8)$$

Avec K , nombre entier entre 0 et $N-1$, lié à la fréquence analysée f_K par :

$$f_K = \frac{K f_e}{N} \quad (1.9)$$

Par exemple, $X[0]$ est la valeur moyenne des échantillons x_n :

$$X[0] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad (1.10)$$

$X[1]$ correspond à la composante spectrale du fondamental, pour lequel 1 cycle est compris dans les N échantillons.

Comme nous envisageons de ne détecter que des signaux modulés à une fréquence unique et connue, nous ne recherchons pas une analyse spectrale complète, mais nous définissons une fenêtre d'observation centrée à cette fréquence, en enregistrant le module du spectre, $X[K]$, à la fréquence concernée [62] :

$$|X[K]| = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos\left(\frac{2\pi}{N} Kn\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin\left(\frac{2\pi}{N} Kn\right)\right)^2} \quad (1.11)$$

On pourrait en principe se limiter à calculer ce signal à la fréquence de modulation des Leds, que nous appellerons f_0 . Soit K_0 est le nombre de périodes échantillonnées du signal à la fréquence connue f_0 , retenu pour l'opération de filtrage, que nous supposerons entier :

$$N = K_0 \times N_0 \quad (1.12)$$

Le module du spectre du signal recherché, qui est modulé à la fréquence f_0 , à la fréquence concernée f_0 est donc donné par l'expression suivante :

$$|X[K_0, N_0]_{f=f_0}| = \frac{1}{N_0 K_0} \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} x_n \cos\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} x_n \sin\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right)\right)^2} \quad (1.13)$$

La nécessité de contrôler la réjection des signaux continus ou accidentellement modulés à une fréquence différente de la fréquence de f_0 conduit à calculer l'ensemble de la TFD, au moins au stade de la modélisation. Pour cela, nous pouvons écrire la Fonction de Transfert (FT) du filtre, qui est la transformée de Fourier de la fenêtre, soit un sinus cardinal, composé d'un lobe principal et de lobes secondaires, centré sur la fréquence cible f_0 :

$$H_{TFD}(K_0, f)_{f_0} = \left| \sin c \left[K_0 \left[\left(\frac{f}{f_0} \right) - 1 \right] \right] \right| \quad (1.14)$$

Où f est la valeur quelconque d'une fréquence de modulation d'autres signaux modulés,

La figure I.20 ci-dessous montre les courbes théoriques du filtre adapté par TFD pour $K_0=1, 2, 3, 4, 5$ (soit respectivement 1, 2, 3, 4 et 5 périodes échantillonnées du signal modulé à la fréquence connue) :

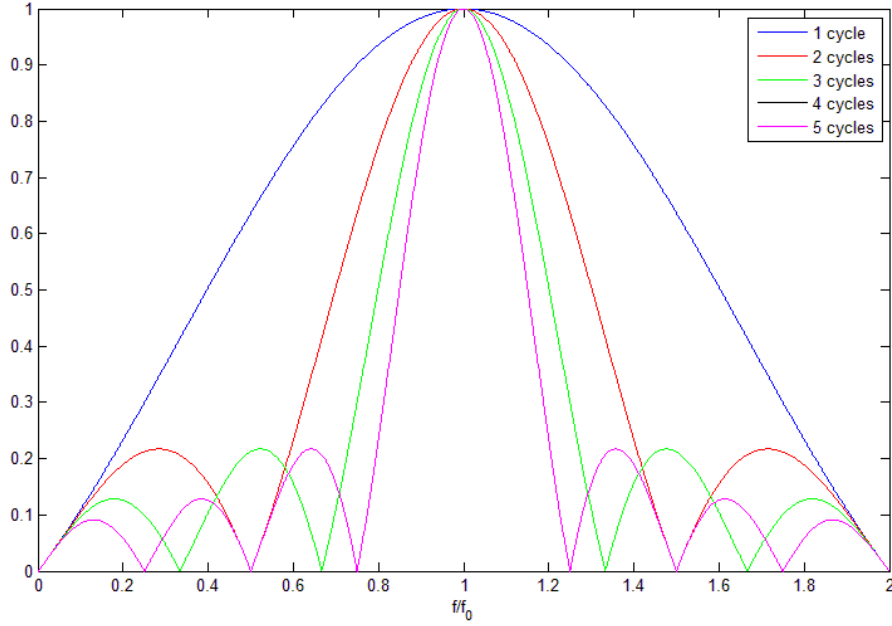


Figure I.20 Courbes théoriques du filtre adapté par TFD (1, 2, 3, 4 et 5 périodes échantillonnées du signal recherché)

On voit que les courbes théoriques du filtre adapté par TFD possèdent un lobe principal centré sur la fréquence recherchée et, pour les fréquences inférieures à celle-ci, un nombre de lobes secondaires qui dépend du nombre entier de périodes de signal recherché échantillonnées. L'axe x représente la fréquence des signaux par rapport à la fréquence recherchée, et l'axe y représente le taux de transmission normalisé à chaque fréquence.

Il est clair que lorsqu'on augmente le nombre de périodes échantillonnées du signal recherché, la sélectivité du filtrage s'améliore, mais en même temps, on augmente le temps de réponse du système de traitement. On verra par la suite que ceci nous impose un compromis sur le nombre de périodes de signal à échantillonner, qui assure à la fois une réduction efficace des basses fréquences, et un temps de réponse compatible avec les mouvements des véhicules.

Le résultat d'un traitement numérique des images attendu par filtrage TFD est montré sur la figure I.21. Les images sont enregistrées de la façon telle que la fréquence d'acquisition est suffisamment grande pour satisfaire les conditions d'échantillonnage de Nyquist. Ce filtrage s'applique sur une séquence de N images brutes données par la caméra rapide, soit les images 1, 2, 3 ... et N, et il se continue tout au

long du fonctionnement du système. Ceci permet de repérer le déplacement des points lumineux (amers) en fonction du temps.

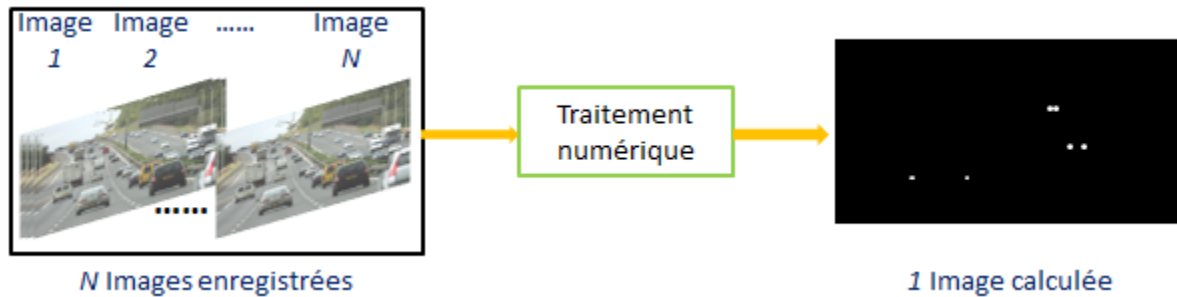


Figure I.21 Image de la scène filtrée à un instant donné

I.4 Conclusion

Dans le chapitre I, nous avons effectué une étude bibliographique sur les différentes technologies de systèmes anticollisions, pour faire ressortir 3 principales familles : les systèmes actifs, les systèmes passifs et les systèmes actifs-passifs, ce qui nous a conduits à envisager une solution innovante, après l'analyse soignée de ces systèmes existants, sachant que leurs performances ne sont pas suffisantes pour répondre au besoin dans l'automobile.

Pour cela, nous proposons d'utiliser les feux à Leds des véhicules, qui correspondent à la tendance de l'éclairage des véhicules d'aujourd'hui. Les caractéristiques électroniques de ces feux nous ont permis d'envisager de faciliter la détection des véhicules cibles par la modulation de tous les feux à une fréquence identique. Ceci rend les véhicules plus visibles par rapport aux autres sources dans la scène observée en appliquant un filtrage sur les images obtenue par la caméra. En plus, l'intensité importante de ces sources permet d'augmenter la distance de détection.

Nous avons choisi dans la thèse le principe de la vision stéréo coopérative comme base du système anticollision envisagé. La coopération entre sources Leds modulées et caméras stéréo filtrées réduit énormément la quantité d'information nécessaire à l'appariement entre les deux images des capteurs de la caméra stéréo, et en conséquence devrait permettre de réduire le temps de réponse du système et la probabilité de fausses alarmes.

Parmi les 2 solutions de filtrage initialement envisagées, à savoir traitement numérique d'images rapides et rétine artificielle, nous avons retenu la 1^{re} solution par manque de maturité technologie de la seconde.

Chapitre II Spécification géométriques et optiques du système

Dans ce chapitre, nous établissons les spécifications de notre système de vision stéréo « coopératif », qui devraient permettre répondre besoins de l'anticollision inter-véhicule, sur les aspects principaux suivants :

- La zone à couvrir (champ, portée), à partir du contexte routier et des scénarii envisagés
- La précision des mesures en position de véhicules « cibles », ce qui impose géométrie des capteurs
- La cadence des mesures de vitesses angulaires des mouvements relatifs entre véhicules
- Les probabilités de détection et de fausses alarmes, en fonction des intensités respectives des feux à Leds et du fond

II.1 Contexte routier

II.1.1 Géométrie des routes

En général, le tracé en plan de routes comporte trois formes : des lignes droites, des arcs de cercle et des raccordements à rayon progressifs. Une synthèse de ces paramètres est décrite dans le tableau II-1 ci-dessous [63]. L'explication détaillée de la géométrie des différents types de route est présentée dans l'annexe A.

Tableau II-1 Caractéristiques de différentes catégories de routes

Type route Grandeurs	L (autoroutes)	T (routes express à une chaussée)	R (réseaux des voies principales de rase campagne)
Description	de grande liaison	de transit	multifonctionnelles
Catégories possibles	L80 ou L100 ou L120	T80 ou T100	R60 ou R80 ou R100
Voies et chaussées*	2 chaussées (3 voies + BAU**)	1 ou 2 chaussées (2 voies + BAU) + 2 voies opposées	- R routes : 1 chaussée 1 voie + 1 voies opposé + BAU - R artères interurbaines : 2 chaussées
Limitation de vitesse	130 km/h	110 km/h	- R routes : 90 km/h - R artères interurbaines 110 km/h
Vitesse max retenue	150km/h	130km/h	130km/h
Dévers maximale (d_{max} (%))	7%	7%	7%
Rayon de courbure minimal retenu	L80 : 240m L100 : 425m L120 : 665m	T80 : 240m T100 : 425m	R60 : 120m R80 : 240m
Rayon avec dévers minimum de 2,5%	L80 : 650m L100 : 900m L120 : 1500m	T80 : 650m T100 : 900m	R60 : 450m R80 : 650m
Rayon non déversé	L80 : 900m L100 : 1300m L120 : 1800m	T80 : 900m T100 : 1300m	R60 : 600m R80 : 900m

Déclivité maximale en pente montante (%)	L80 : 6 L100 : 5 L120 : 4	T80 : 6 T100 : 5	R60 : 7 R80 : 6
Déclivité maximale en pente descendante (%)	L80 : 6 L100 : 5 L120 : 5	T80 : 6 T100 : 5	R60 : 7 R80 : 6

* Une chaussée d'autoroute comporte de 2 à 4 voies de circulation larges de 3.50 m

** La largeur des BAU (bande d'arrêt d'urgence) est comprise entre 2.50 et 3.00 m

On retiendra de ce tableau qu'une route ou une autoroute comporte au maximum 4 voies de circulation, que la vitesse de roulage maximale est de 150km/h, et que la déclivité maximale est de 7%.

II.1.2 Scénarii typiques fronto-arrière et fronto-frontal

Pour configurer le système en termes de portée et de champ de vision, et pour déterminer les cas les plus contraignants pour la détection, nous avons défini 4 scénarii routiers typiques fronto-arrière et fronto-frontal, qui sont représentatifs de la plupart des configurations routières.

Ci-dessous les 4 scénarii routiers que nous avons étudiés dans la thèse :

- 1) Scénario fronto-arrière sur voies multiples en ligne droite
- 2) Scénario fronto-arrière de dépassement en ligne droite
- 3) Scénario fronto-arrière en courbe
- 4) Scénario fronto-frontal de croisement sur ligne droite

Le ou les véhicules cibles pris en compte dans ces scénarii peuvent être des véhicules particuliers, des véhicules utilitaires, des camions, des motos et des mobylettes, tous ces véhicules étant équipés de feux arrière et avant, avec leurs propres sources et systèmes catadioptriques normalisés.

Scénario 1 : scénario fronto-arrière en ligne droite

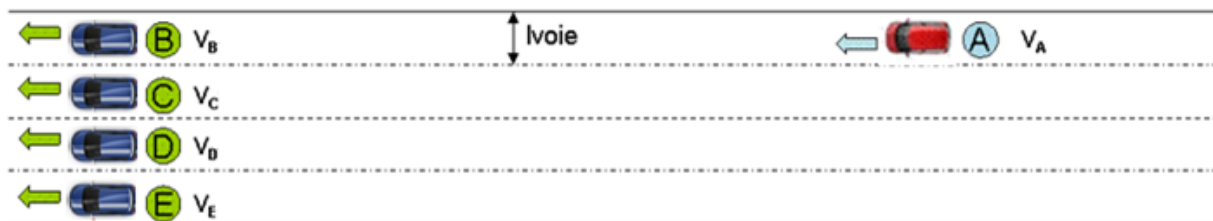


Figure II.1 Scénario 1

Le scénario 1 est un scénario fronto-arrière en ligne droite. Comme le montre la figure II.1, le véhicule A est le véhicule « suiveur » équipé du système de caméra stéréo et les véhicules B, C, D et E sont les véhicules « cibles », qui sont équipés de feux à Leds modulés.

En ce qui concerne le véhicule B, il roule sur la même voie que le véhicule A et son déplacement horizontal relatif par rapport au véhicule A est nul. Si les véhicules A et B sont loin l'un de l'autre, l'image de B donnée par la caméra est au centre du champ. Lorsqu'ils se rapprochent l'un de l'autre, cette

image se déplace verticalement dans le champ, en fonction de la différence de hauteur entre le feu et la caméra.

En ce qui concerne les véhicules C, D et E, qui se trouvent sur d'autres voies que celle du véhicule A, les directions sous lesquelles ils sont observés par la caméra, dépendent de leurs distances à cette dernière, et de la voie sur laquelle ils se trouvent. Plus ils sont près du véhicule A, plus ils sont situés en bord de champ de la caméra, et ce d'autant plus qu'ils sont sur une voie éloignée de celle de A.

Scénario 2 : scénario fronto-arrière de dépassement en ligne droite

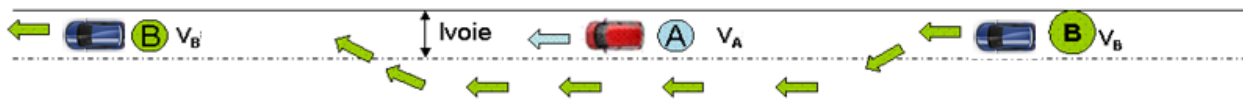


Figure II.2 Scénario 2

Le scénario 2 décrit le cas où le véhicule cible, B, double le véhicule suiveur, A, sur une voie droite (figure II.2). Le véhicule B doit être présent à l'intérieur du champ de vision de la caméra stéréo du véhicule A pour être détectable par le système anticollision. Pour cela, nous décomposons ce scénario en trois phases, comme le montre la figure II.3 ci-dessous : une phase 1 de 'pré-dépassement' (de longueur D_1), une phase 2 de 'rabattement sur la droite' (de longueur D_2) et une phase 3 fronto-arrière en ligne droite, qui est identique au cas du véhicule B du scénario 1 précédent.

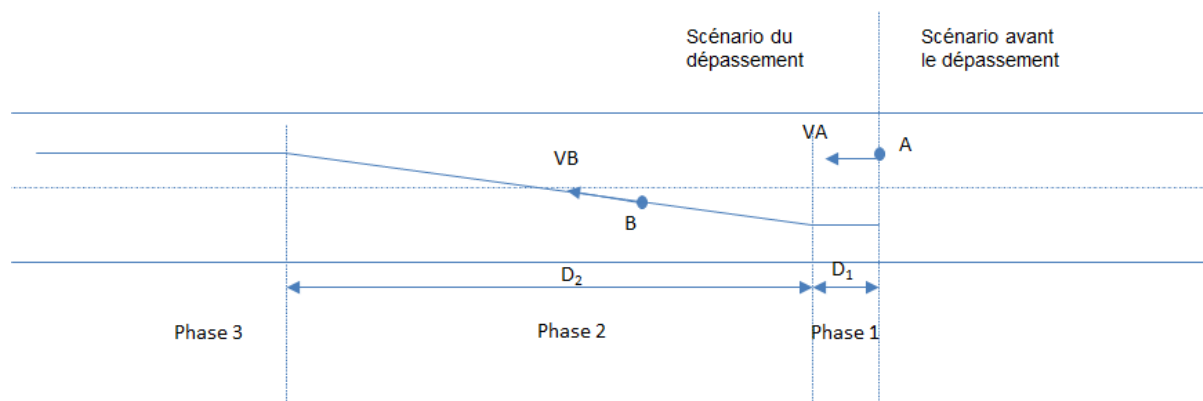


Figure II.3 Schéma du scénario Fronto-Arrière de dépassement en ligne droite

Scénario 3 : scénario fronto-arrière en courbe

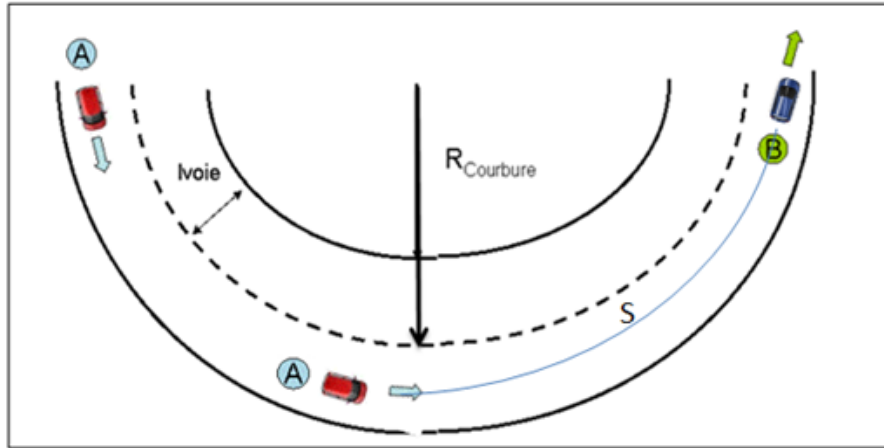


Figure II.4 Scénario 3

Le scénario 3 est un scénario fronto-arrière en courbe, comme le montre la figure II.4. Le véhicule A est équipé de la caméra stéréo, le véhicule B est une « cible » pouvant donner lieu à une collision. La vitesse limite des véhicules roulant sur cette courbe est imposée par le rayon de courbure de la route.

Lorsque les véhicules se rapprochent l'un de l'autre, le véhicule B se déplace horizontalement vers le centre du champ du système anticollision et, verticalement vers le haut ou le bas du champ en fonction de la différence de hauteur entre la caméra et le feu à Leds.

Scénario 4 : scénario fronto-frontal de croisement sur ligne droite

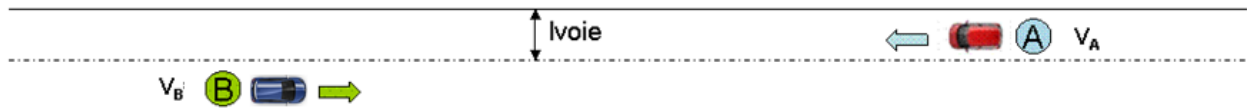


Figure II.5 Scénario 4

Le scénario 4 décrit le croisement des deux véhicules A et B qui roulent sur deux voies adjacentes en ligne droite (figure II.5). Pour raison de moindre dangerosité, les scénarii de croisement sur des voies plus éloignées ne sont pas pris en compte. De même que précédemment, lorsque les deux véhicules sont loin l'un de l'autre, le véhicule B se trouve au centre du champ de la caméra, et se rapproche du bord de champ au fur et à mesure où leur distance se réduit.

II.2 Couverture : volume de détection

La couverture que doit assurer le système est une caractéristique de base dans la définition de ce système. Nous l'avons définie à partir des données qui caractérisent les 4 scénarii routiers typiques ci-dessus, comme le rayon de courbure et la largeur des voies, la vitesse des véhicules, la déclivité des routes ou autoroutes, les décélérations, etc.

II.2.1 Portée du système

La portée qui est exigée du système est la distance à laquelle le système anticollision doit détecter un véhicule cible pour éviter une collision. Cette portée doit donc être supérieure ou égale à la distance d'arrêt du véhicule, qui est par définition la distance parcourue par le véhicule et son conducteur

lorsque ce dernier perçoit un obstacle devant lui et freine jusqu'à l'arrêt du véhicule, et qui est donc déterminée par la vitesse et la distance de freinage du véhicule.

Cette distance d'arrêt S_a (en m) est en fait la somme d'une distance de perception/réaction, S_{pr} , c'est-à-dire la distance parcourue pendant le temps de perception et de réaction du conducteur, et d'une distance de freinage, S_f , c'est-à-dire la distance parcourue durant le freinage :

$$S_a = S_{pr} + S_f \quad (2.1)$$

Si t_{pr} est le temps de perception et de réaction en seconde, la distance de perception/réaction S_{pr} en mètre est donnée par l'expression :

$$S_{pr} = V_0 \times t_{pr} \quad (2.2)$$

Où V_0 est la vitesse du véhicule (en m/s) avant le freinage, que l'on a prise comme étant égale à la valeur maximale autorisée par la géométrie de la route. Une synthèse des vitesses que nous avons retenues dans les scénarii est présentée dans l'annexe B.

Généralement, une valeur de 2 secondes est conseillée pour les calculs de t_{pr} , soit 1,3 s à 1,5 s de temps physiologique de perception-réaction et 0,5 s pour réagir sur les freins. Cette valeur peut être réduite à 1,8 s si la vitesse du véhicule est supérieure à 100 Km/h. Pour la spécification de notre système, nous avons choisi 1,5 seconde comme temps de perception-réaction du conducteur, ce qui est la valeur maximale préconisée par les experts du domaine.

Quant à la distance de freinage S_f en mètre, elle est donnée par l'expression :

$$S_f = \frac{V_0^2}{25.92g(c_{fl} + p)} \quad (\text{en m}) \quad (2.3)$$

Où g est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²), c_{fl} le coefficient de frottement longitudinal et p la déclivité du profil en long.

La somme de c_{fl} et p s'appelle le coefficient d'adhérence f . L'équation (2.3) devient donc :

$$S_f = \frac{V_0^2}{25.92gf} \approx \frac{V_0^2}{254f} \quad (2.4)$$

Sur route sèche et horizontal, f peut être de l'ordre de 0,8 pour un béton bitumineux propre et sec, de l'ordre de 0,7 pour un revêtement moyen et de l'ordre de 0,6 sur pavé. Sur route mouillée, on peut retenir 0,4 comme valeur de f .

Soit $a_{fr} = - (g \times f)$ la valeur de la décélération en m/s². Les valeurs correspondantes aux quatre coefficients d'adhérence donnés ci-dessus sont -7,8 m/s², -6,9 m/s², -5,9 m/s² et -3,9 m/s² respectivement.

De ce fait, S_f est donnée par l'équation :

$$S_f = -\frac{V_0^2}{2a_{fr}} \quad (2.5)$$

Le tableau II-2 ci-dessous montre le résultat du calcul de S_a (en m) pour différentes vitesses initiales V_0 (en m/s) et différentes décélérations a_{fr} (en m/s²) dans des scénarii fronto-arrière.

Tableau II-2 Distances d'arrêt S_a en fonction de la vitesse initiale et de la décélération

V_0 (m/s)	8,3	13,9	19,4	25	30,6	36,1	41,7
V_0 (km/h)	30	50	70	90	110	130	150
$a_{fr} = -4 \text{ m/s}^2$	25,4	51,9	86,2	128,1	177,8	235,2	300,3
-5 m/s^2	23,6	47,1	76,7	112,5	154,5	202,6	256,9
-6 m/s^2	22,5	43,9	70,4	102,1	138,9	180,9	228
-7 m/s^2	21,7	41,6	65,9	94,6	127,8	165,3	207,3
-8 m/s^2	21	39,9	62,5	89,1	119,5	153,7	191,8

Nous nous sommes basés sur une valeur de décélération de -5 m/s^2 , qui nous paraît raisonnable pour que le conducteur puisse mettre en œuvre de la façon appropriée la manœuvre d'évitement d'accident. Il en résulte donc que la portée souhaitée pour notre système est de l'ordre de 250 m.

II.2.2 Champ de vision

Le champ de vision (en anglais : Field of View ou FOV) nécessaire pour éviter les collisions selon les données citées ci-dessus a été calculé en évaluant les angles des directions extrêmes des véhicules cibles par rapport à l'axe de la caméra, soit à courte soit à longue distance, aussi bien horizontalement que verticalement, quelle que soit la pente et la courbure de la route.

1) Champ de vision horizontal

À longues distances, le champ de vision horizontal du système doit lui permettre de détecter des véhicules sur une voie en courbe, comme le montre la figure II.6. Sa valeur dépend des rayons de courbures des routes, de la limite de vitesse des véhicules, et de la distance de freinage maximale dans chaque configuration.

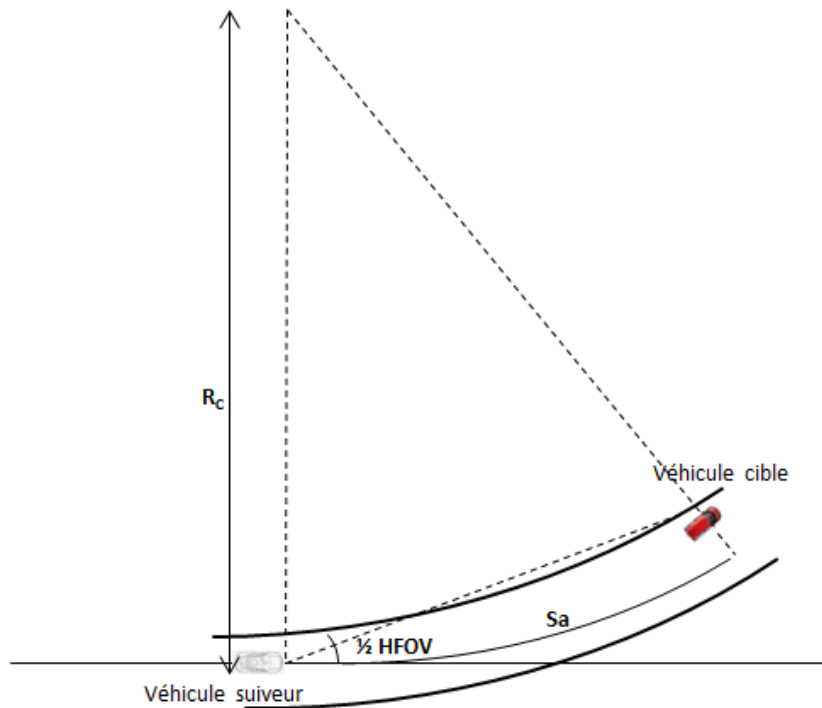


Figure II.6 Le champ de vision horizontal nécessaire à longues distances

Nous avons calculé les champs horizontaux nécessaires pour différentes valeurs de courbures et de vitesses, comme le montre le tableau II-3 ci-dessous.

Tableau II-3 Champs horizontaux nécessaires sur voie en courbe

	<i>Autoroute</i>	<i>Route de transit</i>	<i>Multifonctionnelle</i>	<i>Urbain</i>
<i>V Max retenue (m/s)</i>	42	36	31	25
<i>V Max retenue (km/h)</i>	150	130	110	90
<i>Rayon de courbure minimal</i>	665m	425m	240m	120m
<i>Largeur des voies</i>	13,5 m	10 m	10 m	10 m
<i>HFOV max à -5m/s²</i>	28°	32,8°	45°	65°
<i>Distance parcourue (m)</i>	250	200	150	110
<i>Largeur de la zone (m)</i>	±60	±55	±55	±50

À courtes distances, le champ de vision horizontal est imposé par l'une ou l'autre des configurations des scénarios 1 (avec le véhicule E) ou 2 (dépassement), illustrées par la figure II.7 ci-dessous.

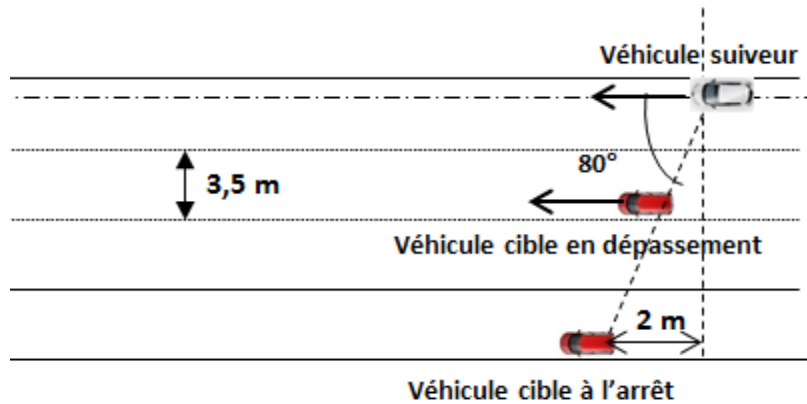


Figure II.7 Le champ horizontal à courte distance

Par exemple, pour le scénario 2, nous désirons que le système anticollision détecte le plus tôt possible un véhicule cible qui est en phase de dépassement. Nous nous sommes fixés comme limite de configuration la situation où la Led à l'arrière du véhicule cible se trouve 1 mètre devant le système, avec un décalage latéral de 1,5 voie (soit environ 5 m). Dans ces conditions, le champ de vision horizontal à courtes distances doit être au minimum de :

$$\frac{1}{2} FOV_{CourtePortée} = \arctan\left(\frac{5}{1}\right) \approx 80^\circ \quad (2.6)$$

En conclusion, le champ de vision horizontal du système doit être de l'ordre de $\pm 80^\circ$.

2) Champ de vision vertical

Le champ de vision vertical du système imposé par les courtes distances, doit être tel qu'il permette au système, de détecter vers le bas les feux à Leds quelles que soient les différences de hauteur entre le feu et le système. Pour être capable de détecter les feux à Leds des véhicules au plus près du véhicule porteur, on envisage d'implanter en extérieur notre système soit au niveau des phares, soit dans l'habitacle derrière le pare-brise, au niveau du rétroviseur, quelle que soit son implantation. Dans ce cas, les cas les plus contraignants sont les feux en bas et à longues distances, sur route à forte déclivité.

Nous avons fait l'hypothèse que la différence de hauteur éventuelle entre les feux à Leds et le système stéréo est au maximum de 2 m. La figure II.8 ci-dessous montre le champ vertical nécessaire lorsque les deux véhicules sont proches. L'hypothèse est que la distance minimale entre véhicules est 2m.

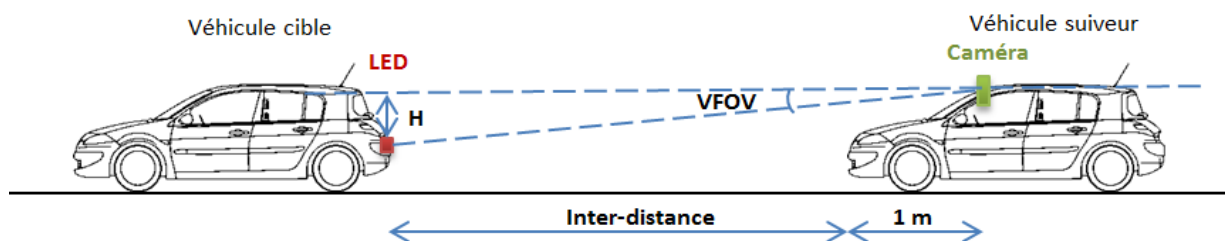


Figure II.8 Le champ vertical nécessaire sur route horizontale

Il ressort que le champ vertical nécessaire vers le bas doit être de l'ordre de :

$$FOV_{Bas} = \arctan\left(\frac{2}{3}\right) \approx 33^\circ \quad (2.7)$$

Sur une route en déclivité, comme le montre la figure II.9, le champ de vision vertical de la caméra nécessaire pour détecter le feu vers le haut doit être supérieur à la pente de la route, qui est de 7% soit 4° (tableau II-1) au maximum. Comme dans la configuration envisagée, le système est plus haut que les Leds, nous gardons la valeur de 7°, comme angle limite du champ vertical vers le haut.

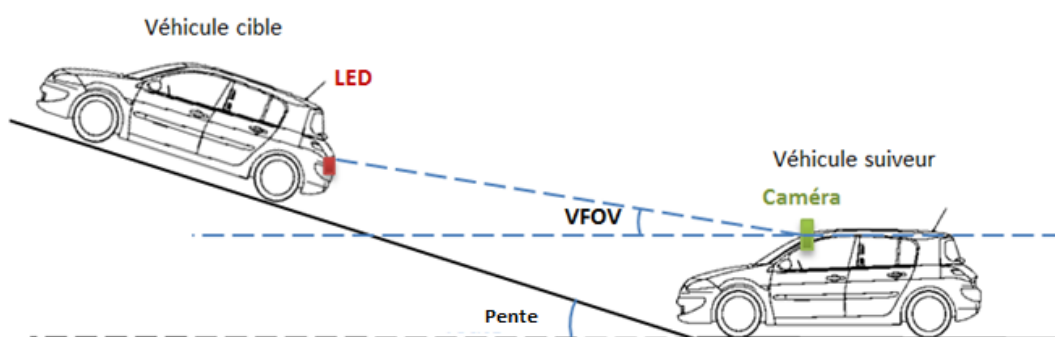


Figure II.9 Le champ vertical nécessaire à courtes distances en déclivité

En conclusion, le champ total de notre système anticollision est de l'ordre de 160°×40° (voir tableau II-4), orienté vers l'avant du véhicule porteur du système.

Tableau II-4 Champ de vision du système

	HFOV	VFOV	Rapport H : V
Portée (3m - 250m)	160°	40° (-33°, +7°)	≈ 4 : 1

Comme le système doit être installé sur un véhicule automobile il est nécessairement bas coût, ce qui nous oriente vers des optiques de type fisheye standard ($f-\theta$) associées à des matrices de détecteurs standard. Parmi ces matrices, nous avons choisi une matrice CMOS de format 1/2", c'est-à-dire de dimension 8 mm par 6 mm.

Pour couvrir le champ de $\pm 80^\circ$ adopté ci-dessus, il nous faut des optiques de focale donnée par la formule suivante :

$$f_{\text{fisheye}} = \frac{\frac{1}{2} \times \text{longueur}}{\frac{1}{2} \text{HFOV}} \approx 3\text{mm} \quad (2.8)$$

Par ailleurs, la zone à couvrir par le système est de 250m le long de l'axe. En largeur, nous considérons que $\pm 60\text{m}$ à 250m est suffisant pour pouvoir détecter la présence d'un véhicule sur autoroute en courbe avec cette portée. Il en résulte que la zone couverte par le système a la géométrie décrite sur la figure II.10 :

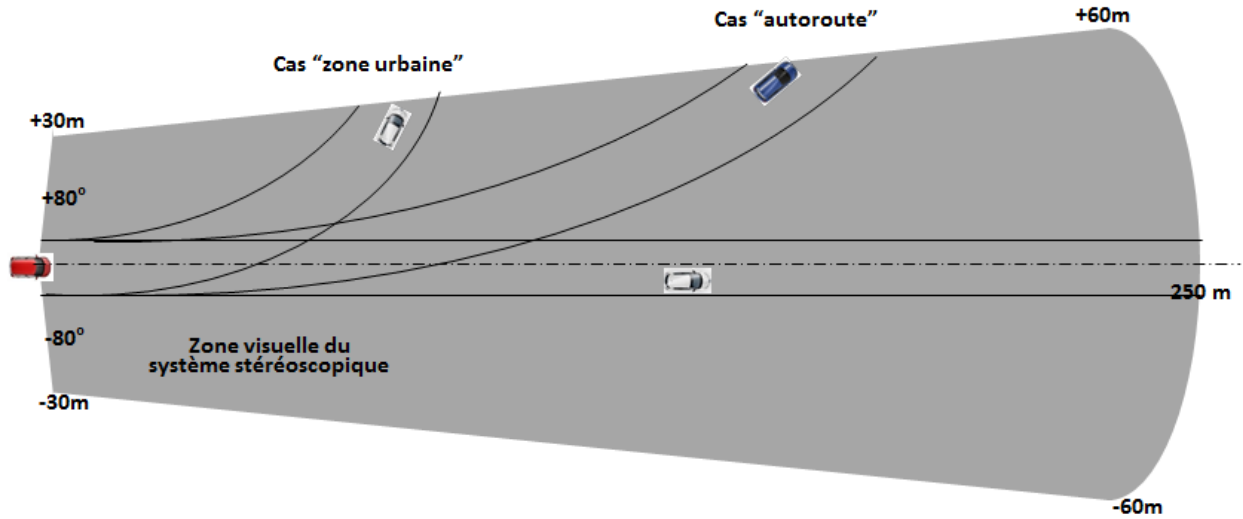


Figure II.10 Zone de détection du système stéréoscopique

II.3 Précision de mesure sur la position instantanée d'un feu à Leds

Comme le présent paragraphe va le montrer, notre système détermine la position et la trajectographie des feux à Leds, par des mesures angulaires de direction à partir de ses deux capteurs. Il en résulte que la dimension angulaire de ces derniers est un paramètre de base du système défini par la géométrie (dimension) de ces feux et leurs distances. Le problème revient donc à mesurer la direction de sources plus ou moins ponctuelles à grandes distances et de sources surfaciques, de faibles dimensions, à courtes distances.

II.3.1 Précision théorique de mesure de position par caméra stéréo

Pour spécifier le système stéréo, nous présentons dans ce paragraphe le calcul de la zone d'incertitude de mesure de position par la caméra stéréo standard, mesuré de 2 capteurs à optiques traditionnelles connues où la dimension de l'image $y = f \cdot \tan(\theta)$ [64].

Comme le montre la figure II.11, la source à Led est considérée en première approximation comme une source ponctuelle P de coordonnées (R, θ) se situe dans le champ de la caméra stéréo. Ses deux images P_L et P_R sont localisées respectivement sur les matrices des 2 capteurs O_L et O_R , chacun présente une incertitude sur la mesure d'angle [65].

Cette incertitude vient de l'incertitude en mesure de position du centre de gravité de l'image du feu : à cause de la résolution de ces caméras, de la géométrie intérieure et de la non-uniformité des pixels, des défauts liés aux optiques, ou des vibrations des véhicules, le centre de gravité mesuré ne correspond pas au vrai centre de l'image. Cette valeur est souvent proportionnelle au dimensionnement du pixel, typiquement de 30% voire plus [66].

On appelle k_{pixel} l'incertitude de mesure de centre de gravité soit sur la localisation de l'image du point source. Si les pixels sont carrés et de largeur a . L'incertitude L_g sur le positionnement de cette image est donnée par l'équation suivante, qui correspond aux $P_L'P_L''$ et $P_R'P_R''$ sur les matrices des deux caméras :

$$L_g = k_{pixel} * a \quad (2.9)$$

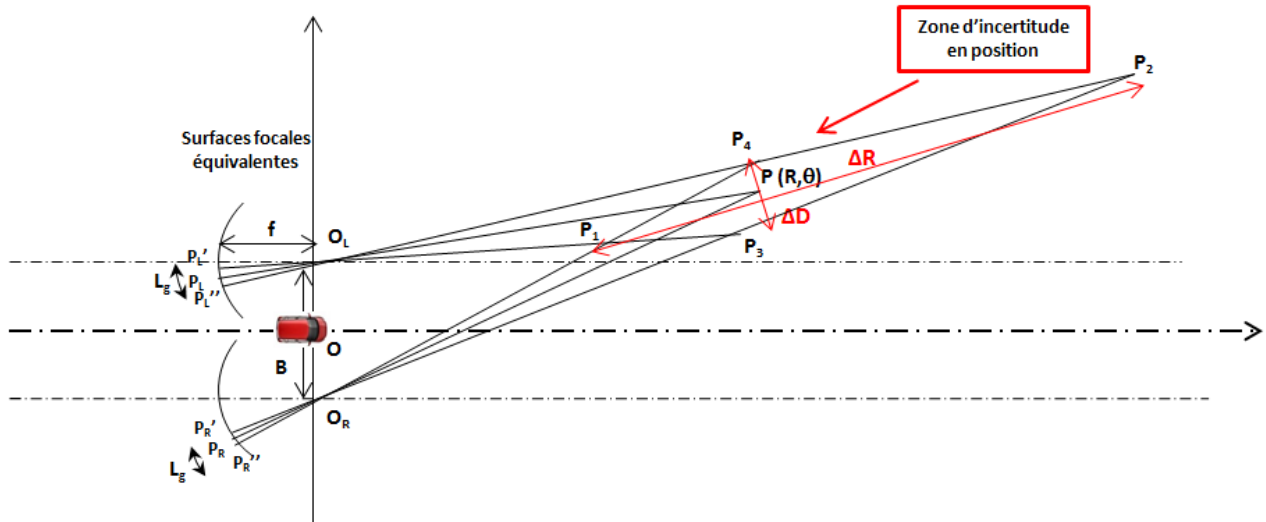


Figure II.11 Zone d'incertitude (vue de dessus)

Cas d'un feu à grandes distances (source quasi ponctuelle)

Nous avons étudié d'abord le cas où le feu est à grande distance, soit le cas où il se comporte comme une source ponctuelle et quasi stationnaire pour le système [67].

Comme on le voit sur la partie droite de figure II.11, la direction de P vue par le capteur O_L est comprise dans la projection du cône $O_L P_L' P_L''$. De même, la direction de P vue par le capteur O_R est comprise dans la projection du cône $O_R P_R' P_R''$. Soient B la base de la caméra stéréo et f la distance focale des optiques, le système positionne la source P à l'intérieur du polygone $P_1 P_2 P_3 P_4$, zone commune aux 2 cônes précédents, dites « zone d'incertitude » sur la position de P mesurée instantanément par le système.

Cette zone d'incertitude est caractérisée par une incertitude longitudinale $\Delta R(R, \theta)$ suivant la ligne OP et une incertitude transversale $\Delta D(R, \theta)$:

$$\begin{cases} \Delta R(R, \theta) = \frac{2L_g R^2}{fB \cos \theta} \\ \Delta D(R, \theta) = \frac{L_g R}{f} \end{cases} \quad (2.10)$$

Il résulte de ces équations simplifiées que :

$$\Delta R(R, \theta) = \frac{2R}{B \cos \theta} \Delta D(R, \theta) \quad (2.11)$$

On peut constater que pour un feu à Leds donné, l'incertitude longitudinale varie proportionnellement au carré de la distance R et de inversement proportionnellement au cosinus de l'angle de champ θ . L'incertitude transversale, ΔD , quant à elle, est indépendante de l'angle de champ θ , et elle ne dépend que de la distance R et de la résolution du capteur. Par ailleurs, l'incertitude longitudinale est beaucoup plus importante que l'incertitude transversale, et ce d'autant plus que le feu est éloigné et en bord de champ.

Pour les configurations près de l'axe, les équations (2.10) conduisent aux simplifications suivantes:

$$\begin{cases} \Delta R(R, \theta \approx 0) = \frac{2L_g R^2}{fB} \\ \Delta D(R, \theta \approx 0) = \frac{L_g R}{f} \end{cases} \quad (2.12)$$

Au vu des équations (2.11) et (2.12) ci-dessus, on constate qu'on minimise l'incertitude transversale de notre système par le choix de capteurs d'image haute résolution, qui permettent d'obtenir de faibles valeurs du paramètre L_g par la dimension minimale du pixel. Ce raisonnement nous pousse à choisir deux matrices de détecteurs de type SXGA de 1280 par 1000 points soit avec une dimension de pixel $a=6\mu\text{m}$.

Une fois cet ensemble de valeurs choisies, pour la focale f et la dimension a du pixel, on constate qu'on minimise l'incertitude longitudinale de notre système en prenant la dimension de base B la plus grande possible. Pour des raisons de dimensions typiques de véhicules et de rigidité mécanique du montage (qualité d'alignement entre les deux capteurs), nous choisissons comme dimension de base B la valeur de 0,5m.

Cas d'un feu à courtes distances (source de dimension finie)

Le raisonnement précédent ne s'applique qu'à grandes distances, pour lesquelles un feu à Leds se comporte comme une source quasi ponctuelle pour le système. À courtes distances l'incertitude angulaire sur la direction du feu dépend alors de la dimension du feu et de son homogénéité en

luminance. Dans ce cas, nous considérons que l'incertitude sur la position du feu est une fraction, k_{feu} , de sa dimension (par exemple, de son diamètre Φ_{feu}), ce qui entraîne que les incertitudes longitudinale et transversale du système sur la position du feu, supposé immobile, sont données par les expressions suivantes :

$$\Delta R(R, \theta) = \frac{k_{feu} \Phi_{feu} R}{B \cos \theta} \quad (2.13)$$

$$\Delta D(R, \theta) = \frac{k_{feu} \Phi_{feu}}{2} \quad (2.14)$$

Incertitudes longitudinale et transversale sur la position d'un feu près de l'axe du système

On a vu ci-dessus que les incertitudes, longitudinale et transversale, sur la mesure de position d'un feu proviennent essentiellement soit de son inhomogénéité en luminance à courtes distances soit de la précision de mesure angulaire du capteur à grandes distances. Pour tenir compte de ces deux sources d'incertitude, on considère que l'incertitude globale est la somme quadratique des deux, ce qui donne comme résultats près de l'axe :

$$\Delta R(R, \theta \approx 0) = \frac{R}{B} \sqrt{(k_{feu} \Phi_{feu})^2 + \left(\frac{2RL_g}{f}\right)^2} \quad (2.15)$$

$$\Delta D(R, \theta \approx 0) = \sqrt{\left(\frac{k_{feu} \Phi_{feu}}{2}\right)^2 + \left(\frac{RL_g}{f}\right)^2} \quad (2.16)$$

En prenant comme hypothèses de départ : $k_{pixel} = k_{feu} = 30\%$; $\Phi_{feu} = 10 \text{ cm}$; $f = 3 \text{ mm}$; $B = 0,5 \text{ m}$; et $a = 6 \mu\text{m}$, les incertitudes longitudinale et transversale sur la mesure de position d'un feu à Leds situé près de l'axe sont montrées sur la figure II.12 en fonction de sa distance au système, où la courbe rouge montre ΔR sur l'échelle linéaire, et la courbe bleue pour ΔD sur l'échelle logarithmique.

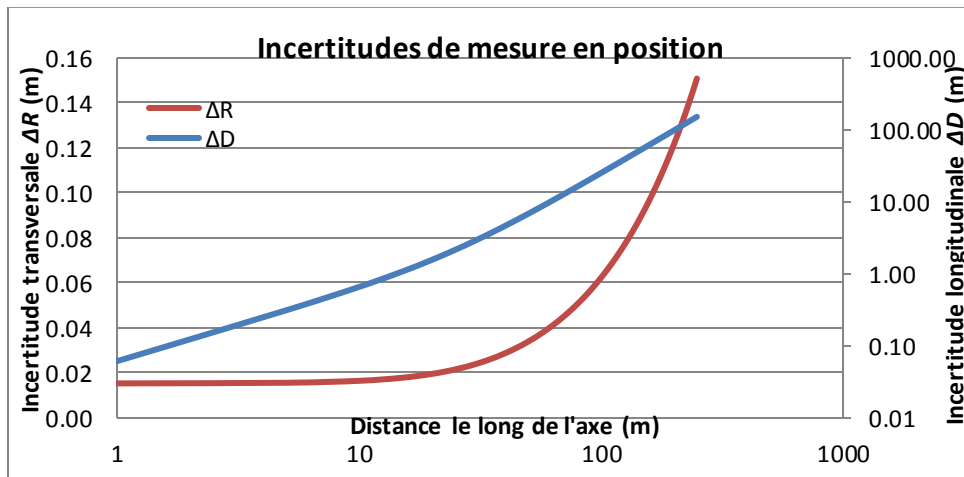


Figure II.12 Incertitude transversale sur les mesures de position des feux à Leds

Il résulte de ces deux courbes que les possibilités du système en trajectographie s'affinent en précision au fur et à mesure que la dangerosité de la situation augmente, lorsque les deux véhicules s'approchent l'un de l'autre, l'incertitude transversale étant très faible, et indépendante de l'angle de champ, pour une distance de feu donnée. À toutes distances, l'incertitude longitudinale est beaucoup plus importante que la transversale. Par exemple, elle est 40 fois plus grande à 10m, et 400 fois plus à 100m. En conséquence, les zones d'incertitudes se présentent sous forme de « traits », dirigés vers la caméra, comme le montre la figure II.13 ci-dessous jusqu'à une distance de 100 m (avec les paramètres de calculs tels que : $L_p = 30\%$; $B = 0,5$ m ; $f = 3,3$ mm ; $a = 5,6$ μ m).

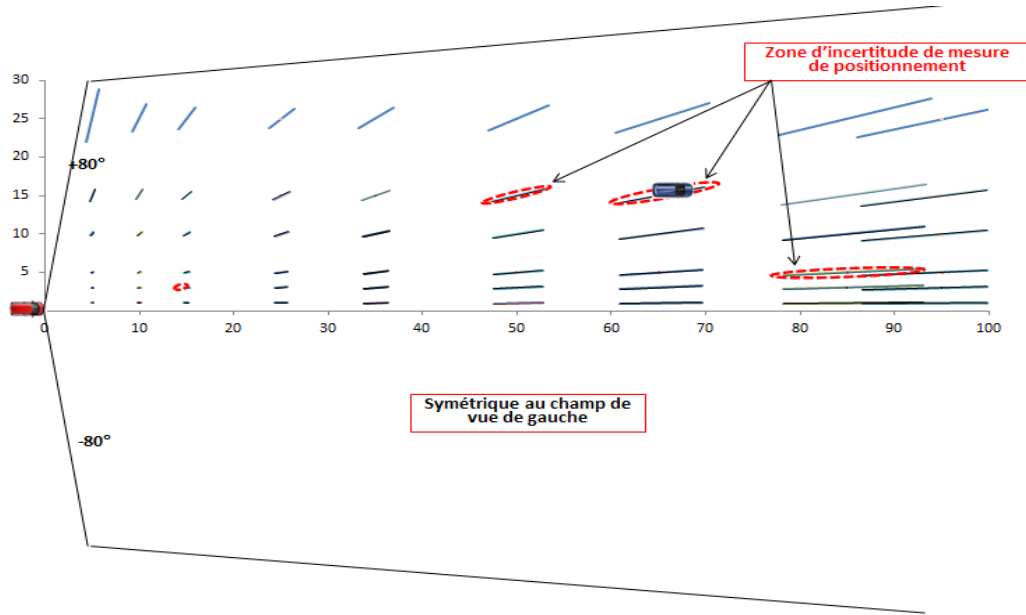


Figure II.13 Exemple de calcul de l'incertitude de mesure de position

II.3.2 Spécification de la précision du système

À partir des résultats précédents, nous pouvons définir un cahier des charges préliminaire concernant les incertitudes en mesure de position qui nous paraissent raisonnables pour assurer le bon fonctionnement de notre système anticollision :

- Incertitude longitudinale : $\sigma_R(R, \theta) = \frac{50m \times \left(\frac{R}{R_{\max}(0)} \right)^2}{\cos \theta}$ avec $R_{\max}(0) = 250$ m
- Incertitude transversale : $\sigma_D(R, \theta) = 0,1m \times \left(\frac{R}{R_{\max}(0)} \right)$ avec $R_{\max}(0) = 250$ m

II.4 Cadence des mesures

Sur la route, dans des conditions réelles, on doit tenir en compte des déplacements des véhicules, alors que pour les calculs de précision précédente, on a supposé que tous les véhicules (cibles et suiveur) sont statiques. Pour obtenir des résultats proches de ceux énoncés, il importe de figer la scène pendant la

prise d'information, au moyen d'une cadence suffisamment de mesure élevée. Si on exclut provisoirement tout traitement local rapide entre pixels voisins, cette cadence minimale, imposée par la vitesse de déplacement de l'image d'un feu dans le plan focal des capteurs, doit être telle que son temps de résidence sur un pixel donné soit supérieur à la durée de la mesure. Pour calculer ces vitesses de déplacement d'image de feu, il est indispensable de connaître les vitesses de défilement des véhicules cibles, dans les principaux scénarii envisagés.

II.4.1 Vitesse angulaire des cibles

La vitesse de déplacement (dy/dt) de l'image d'un feu dans le plan focal d'une optique f - θ dépend de la vitesse angulaire du véhicule observé ($d\theta/dt$), et de la focale f de l'optique par la relation suivante :

$$\frac{dy}{dt} = f \frac{d\theta}{dt} \quad (2.17)$$

Un examen rapide du déplacement d'image d'un feu à Leds montre que sa composante horizontale est bien supérieure à sa composante verticale à longue distance (due à la différence de hauteur éventuelle entre les feux et la caméra). Et même, à courte distance, après examen, il ressort que l'effet de translation verticale est toujours inférieur à 50% de la translation horizontale. Il en résulte que nous avons porté notre attention sur la seule composante horizontale.

Pour les scénarii routiers décrits au §II.2.2, nous appelons L la largeur d'une voie ($L = 3,5$ m), V_A , V_B , ... les vitesses associées à chaque véhicule présent. Les vitesses angulaires (composantes horizontales) correspondant à chaque scénario, sont données par les équations ci-dessous. Pour chacun de ces scénarii, on a calculé les valeurs maximales de ces vitesses angulaires, en prenant en compte les vitesses maximales autorisées.

Scénario 1 :

$$\text{Pour le véhicule B : } \frac{d\theta_{1,B}}{dt} = 0 \quad (2.18)$$

On voit que, comme le véhicule B reste sur la même voie en ligne droite que le véhicule A, et qu'on a négligé la différence de hauteur entre le feu et la caméra, son image est immobile sur la matrice de détecteurs et ne présente pas de vitesse angulaire horizontale.

$$\text{Pour le véhicule C : } \frac{d\theta_{1,C}}{dt} = \frac{V_A - V_B}{L} \sin^2 \theta_C \quad (2.19)$$

Le tableau II-5 ci-dessous montre les vitesses angulaires maximales du véhicule C, supposé à l'arrêt, pour un véhicule A à vitesse initiale de 150 km/h.

Tableau II-5 Vitesses angulaires maximales du véhicule C dans le scénario 1 (en rad/s)

Distance axiale (m)	250	200	150	100	50	30	20	10	5	2
$R_{1,C}$ (m)	250,0	200,0	150,0	100,1	50,1	30,2	20,3	10,6	6,1	4,0

$\theta_{1,C}$ (°)	0,8	1,0	1,3	2,0	4,0	6,7	9,9	10,3	35,0	60,3
$d\theta_{1,C}/dt$ (rad/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,3	3,9	9,0

Pour le véhicule D :
$$\frac{d\theta_{1,D}}{dt} = \frac{V_A - V_B}{2L} \sin^2 \theta_D \quad (2.20)$$

Le tableau II-6 ci-dessous montre les vitesses angulaires maximales du véhicule D, supposé à l'arrêt, pour un véhicule A à vitesse initiale de 150 km/h.

Tableau II-6 Vitesses angulaires maximales du véhicule D dans le scénario 1 (en rad/s)

Distance axiale (m)	250	200	150	100	50	30	20	10	5	2
$R_{1,D}$ (m)	250,1	200,1	150,2	100,2	50,5	30,8	21,2	12,2	8,6	7,3
$\theta_{1,D}$ (°)	1,6	2,0	2,7	4,0	8,0	13,1	19,3	35,0	54,5	74,1
$d\theta_{1,D}/dt$ (rad/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,7	2,0	3,9	5,5

Pour le véhicule E :
$$\frac{d\theta_{1,E}}{dt} = \frac{V_A - V_B}{3L} \sin^2 \theta_E \quad (2.21)$$

Le tableau II-7 ci-dessous donne leurs vitesses de déplacement angulaires maximales du véhicule E dans le champ de vision de la caméra, en fonction de leurs distances au véhicule A, et de leur vitesse relative par rapport à ce dernier, qui a été calculée avec une vitesse relative initiale maximale de 150 km/h.

Tableau II-7 Vitesses angulaires maximales du véhicule E dans le scénario 1 (en rad/s)

Distance axiale (m)	250	200	150	100	50	30	20	10	5	2
$R_{1,E}$ (m)	250,2	200,3	150,4	100,5	51,1	31,8	22,6	14,5	11,6	10,7
$\theta_{1,E}$ (°)	2,4	3,0	4,0	6,0	11,9	19,3	27,7	46,4	64,5	79,2
$d\theta_{1,E}/dt$ (rad/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,9	2,1	3,2	3,8

Scénario 2 :

La vitesse angulaire de l'image du véhicule B pendant la phase 2 de dépassement de ce scénario est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{d\theta_{2,B}}{dt} = \frac{(V_B \sin \alpha - V_A \sin \theta_B) \cos \theta_B}{L + D_1 \frac{L}{D_2}} \left(\tan \theta_B + \frac{L}{D_2} \right) \quad (2.22)$$

Avec $\alpha = \theta_B + \arctan\left(\frac{L}{D_2}\right)$.

Pour calculer la vitesse angulaire maximale de B dans le champ de A, nous avons pris comme vitesses respectives du véhicule A, $V_A = 130$ km/h, soit 36,1 m/s, et du véhicule B, $V_B = 150$ km/h, soit 41,7 m/s, $D_1 = 3,5$ m, $D_2 = 50$ m. Cette vitesse angulaire maximale est présentée sur le tableau II-8.

Tableau II-8 Vitesses angulaires maximales dans le scénario 2 (en rad/s)

Distance axiale (m)	53	50	40	35	30	25	20	15	10	3,5
$R_{2,B}$ (m)	53,0	50,0	40,0	35,0	30,0	25,1	20,1	15,2	10,5	4,9
$\theta_{2,B}$ (°)	0,0	0,3	1,4	2,1	3,1	4,6	6,7	10,2	16,9	45,0
$d\theta_{2,B}/dt$ (rad/s)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	1,2

Scénario 3 :

Dans ce scénario, la vitesse angulaire du véhicule B, donnée par l'équation suivante, est constante :

$$\frac{d\theta_{3,B}}{dt} = \frac{V_A - V_B}{2(R_c + 2L)} \approx \frac{V_A - V_B}{2R_c} \quad (2.23)$$

Une synthèse des vitesses angulaires maximales du véhicule B, supposé à l'arrêt, pour un véhicule A à vitesse initiale de 150 km/h, et pour un rayon de courbure de 665 m est présentée sur le tableau II-9 ci-dessous.

Tableau II-9 Vitesses angulaires maximales dans le scénario 3 (en rad/s)

Distance le long la courbe (m)	250	200	150	100	50	30	20	10	5	2
$R_{3,B}$ (m)	248,5	199,2	149,7	99,9	50,0	30,0	20,0	10,0	5,0	2,0
$\theta_{3,B}$ (°)	10,8	8,6	6,5	4,3	2,2	1,3	0,9	0,4	0,2	0,1
$d\theta_{3,B}/dt$ (rad/s)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Scénario 4 :

La vitesse angulaire du véhicule B de ce scénario est donnée par l'équation :

$$\frac{d\theta_{4,B}}{dt} = \frac{V_A + V_B}{L} \sin^2 \theta_B \quad (2.24)$$

Une synthèse des vitesses angulaires maximales du véhicule B du scénario 4 est présentée sur le tableau II-10 ci-dessous, avec deux véhicules A et B roulant en sens inverse à 90 km/h chacun.

Tableau II-10 Vitesses angulaires maximales dans le scénario 4 (en rad/s)

Distance axiale (m)	250	200	150	100	50	30	20	10	5	2
$R_{4,B}$ (m)	250,0	200,0	150,0	100,1	50,1	30,2	20,3	10,6	6,1	4,0
$\theta_{4,B}$ (°)	0,8	1,0	1,3	2,0	4,0	6,7	9,9	19,3	35,0	60,3
$d\theta_{4,B}/dt$ (rad/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,6	4,7	10,8

Ces tableaux font ressortir la grande diversité des vitesses angulaires des véhicules observés, et en particulier les valeurs énormes (9,0 rad/s et 10,8 rad/s) de ces vitesses angulaires maximales pour les scénarii 1 (véhicule C en fronto-arrière en ligne droite sur voie adjacente) et 5 (fronto-frontal en croisement sur ligne droite).

Cependant, il faut noter que les valeurs les plus importantes de vitesses angulaires qui apparaissent dans les tableaux ci-dessus sous des angles de champ élevés (>30°) correspondent à des véhicules suffisamment proches ($d < 20\text{m}$), pour que l'image de leur feu à Leds couvre plusieurs pixels, ce qui augmente, par rapport à une source ponctuelle, le temps de résidence de cette image sur le pixel défini comme étant la durée pendant laquelle l'image d'un feu à Leds reste sur le même pixel.

II.4.2 Cadence des mesures brutes

Pour évaluer la cadence de mesure de notre caméra, nous avons calculé le temps de résidence maximal de l'image d'un feu sur un pixel, dans les différents scénarii précédents. Ce temps de résidence, τ , est fonction de la vitesse de défilement et de la dimension de l'image du feu suivant la relation (2.25) :

$$\tau = \begin{cases} \frac{\Phi_{\text{feu}}}{R * \frac{d\theta}{dt}} & \text{à courtes distances} \\ \frac{a}{f * \frac{d\theta}{dt}} & \text{à longues distances} \end{cases} \quad (2.25)$$

Avec R l'inter-distance entre le feu à Leds et la caméra, f la focale de l'optique, $d\theta/dt$ la vitesse angulaire maximale du feu à cette distance, Φ_{feu} le diamètre du feu, a le côté du pixel.

Les tableaux II-11 ci-dessous résument les valeurs minimales des temps de résidence du signal utile (en ms) sur un pixel pour chaque scénario.

Tableau II-11 Temps de résidence minimaux pour vitesses extrêmes dans les scénarii typiques (ms)

Distance axiale (m)	250	200	150	100	50	30	20	10	5	2
$\tau_{1,C}$ (ms)	856,6	548,3	308,5	137,2	34,4	20,7	13,9	7,3	4,2	2,8
$\tau_{1,D}$ (ms)	428,6	274,4	154,5	68,9	17,5	10,6	7,3	4,2	2,9	2,5
$\tau_{1,E}$ (ms)	286,0	183,2	103,3	46,2	11,9	7,3	5,2	3,3	2,7	2,4
$\tau_{2,B}$ (ms)	/	/	/	/	34,0	31,2	28,3	22,8	16,8	20,8
$\tau_{3,B}$ (ms)	66,7	66,7	66,7	66,7	66,5	111,0	166,6	333,3	666,6	1666,7
$\tau_{4,B}$ (ms)	714,4	457,3	257,3	114,4	28,6	17,3	11,6	6,1	3,5	2,3

L'examen de ce tableau de temps de résidence de l'image d'un feu sur un pixel de la caméra nous a conduit à choisir comme durée de la mesure :

$$T_{\text{mesure}} = 10\text{ms}$$

Ceci nous permet d'assurer que le système est bien adapté pour la trajectographie de véhicules à vitesses extrêmes au-delà d'une trentaine de mètres, et moins performant à courtes distances, pour lesquelles la trajectographie elle-même est moins efficace pour éviter la collision.

II.5 Calcul du signal utile (feux à Leds)

II.5.1 Caractéristiques des feux à Leds

Nous proposons d'utiliser soit les feux à Leds qui sont déjà embarqués sur les véhicules, soit des feux à Leds spécifiques (diagramme angulaire, niveau d'éclairage, etc.) à la fonction anticollision.

Voici quelques caractéristiques que nous imposons sur les feux à Leds recherchés, autres que les réglementations géométriques et radiométriques dans l'automobile :

- La puissance émise doit respecter les réglementations de la sécurité oculaire des humains
- L'énergie consommée par les feux à Leds ne doit pas dépasser le seuil dépendant de la batterie
- Les feux à Leds doivent fonctionner dans n'importe quelle condition météorologique
- Il faut prendre en compte les possibilités de feux cassés, de salissures ou d'opacité des verres protecteurs,...
- Bas coût

Pour faciliter les expérimentations réalisées au cours de cette thèse, nous avons choisi d'utiliser les feux à Leds déjà installés sur les véhicules. Les deux types de feux que nous avons utilisés pour les expériences sont :

- DRL (Day Running Light) ou feux de circulation diurne
- Lanterne de signalisation (feux de position arrière rouges)

1) DRL

Les feux de circulation diurne, ou DRL, sont des feux d'édairage blancs, installés à l'avant du véhicule, qui s'allument automatiquement lorsque le véhicule se déplace vers l'avant afin d'accroître la visibilité du véhicule dans des conditions de lumière du jour. Ci-dessous, on donne quelques caractéristiques de DRL, issues des réglementations automobiles ECE R48 et ECE R87 :

- Couleur du feu : blanc
- Installation : 2 DRLs, installés à l'avant du véhicule, un à gauche et un à droite, à moins de 400 mm du bord extrême du véhicule
- Intensité : 400cd – 1200cd
- Écartement intérieur : > 600 mm
- Hauteur : 250mm – 1500mm
- Surface émissive : $\approx 100\text{cm}^2$
- Déclenchement et extinction automatiques lorsque le moteur se met en route ou s'arrête

La distribution spectrale relative du DRL, entre 380nm et 780 nm, est donnée par la figure II.14 ci-dessous.

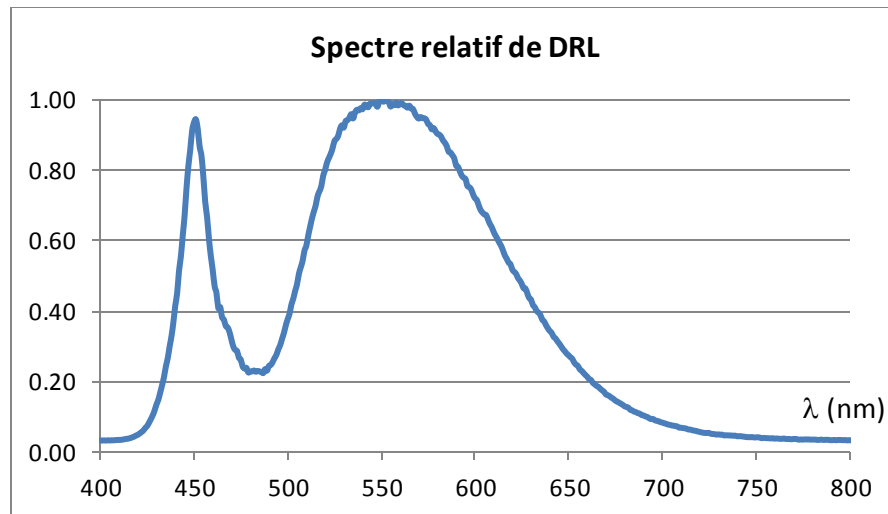


Figure II.14 Spectre de DRL blanc

Le diagramme angulaire d'un feu de jour (DRL) de côté droit est montré sur la figure II.15 ci-dessous, à l'intérieur à un champ de $\pm 25^\circ$ en horizontal et $\pm 20^\circ$ en vertical. Les courbes d'égale intensité sont graduées en candelas.

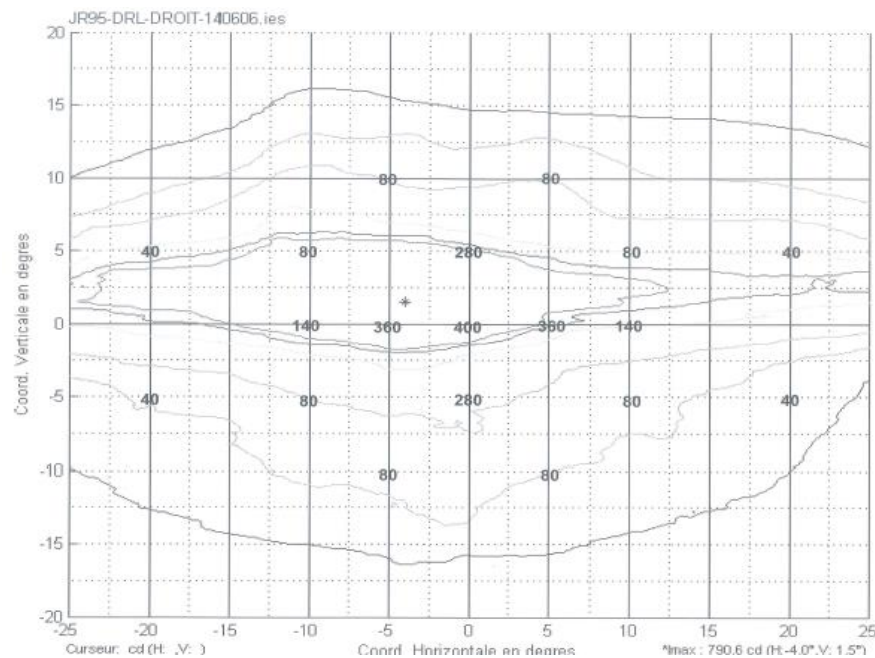


Figure II.15 Diagramme angulaire d'une DRL

2) Feux de position arrière (lanterne de signalisation) à Leds

Les feux de position à Leds sont des dispositifs d'éclairage, permettant de signaler la présence d'un véhicule aux autres usagers, la nuit et par mauvaises conditions de visibilité. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

- Hauteur : 350mm – 1500mm
- Écartement intérieur : > 600 mm (jusqu'à 400mm pour certains véhicules)
- Angle de visibilité :
 - Vertical : $\pm 15^\circ$
 - Horizontal : 45° à intérieur, 80° à extérieur
- Intensité : 4cd – 42cd

Lors de nos essais sur route, nous avons utilisé des feux de position rouges, dont le spectre est centré sur 640 nm, comme le montre la figure 16 ci-dessous.

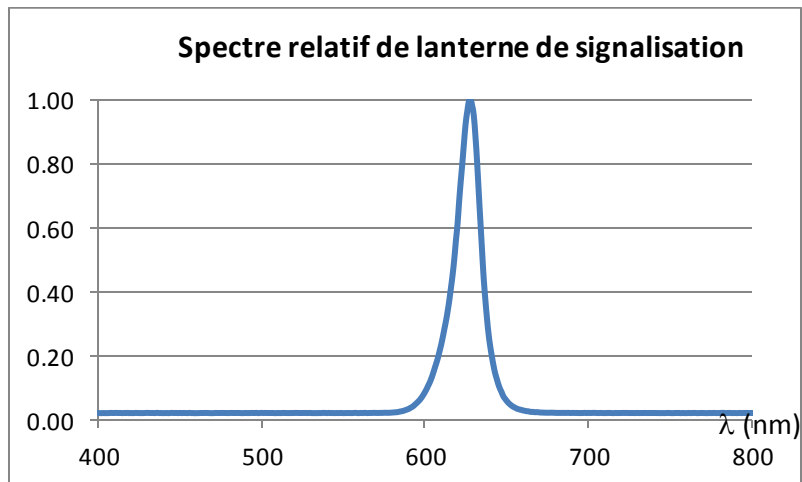


Figure II.16 Spectre relatif de lanterne de signalisation

Le diagramme angulaire de l'intensité (en cd) d'un feu de position (lanterne de signalisation) est présenté sur la figure 17.

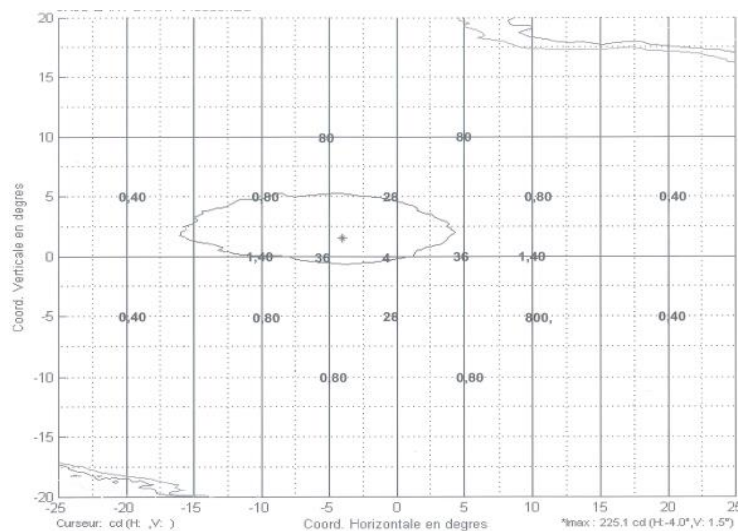


Figure II.17 Diagramme angulaire de la lanterne de signalisation

II.5.2 Radiométrie d'un capteur de caméra vidéo

La figure II.18 présente la configuration élémentaire du système de détection vidéo coopératif composé d'un feu à Leds et d'une caméra stéréo.

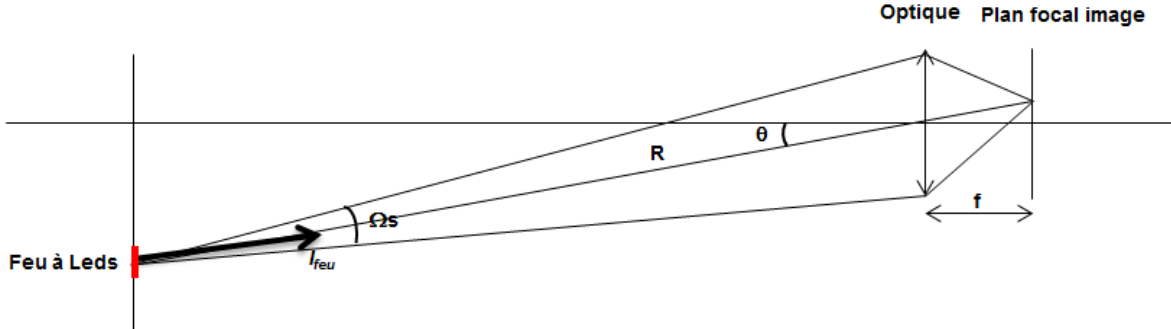


Figure II.18 La configuration élémentaire du système vidéo coopératif stéréo

Soit Φ_{feu} le diamètre du feu à Leds (supposé rond) et $(\Phi'_{feu})_{geo}$ le diamètre de son image géométrique sur la matrice de détecteurs, donné par l'équation suivante pour un modèle de caméra en $f-\theta$:

$$(\Phi'_{feu})_{geo} = \Phi_{feu} \frac{f}{R} \quad (2.26)$$

Où R est la distance axiale entre le feu à Leds et l'optique du capteur d'image ; f est la distance focale de l'optique fisheye (« grand champ »).

Le diamètre de l'image du feu à Leds, Φ'_{feu} , est la racine de la somme de la taille de l'image géométrique et celle de la diffraction :

$$\Phi'_{feu} = \sqrt{(\Phi'_{feu})_{geo}^2 + (\Phi'_{feu})_{diff}^2} \quad (2.27)$$

Avec:

$$(\Phi'_{feu})_{diff} = 1,22 \times \frac{f}{\Phi_{op}} \times \lambda_{moy} \quad (2.28)$$

Où Φ_{op} est le diamètre de l'optique et λ_{moy} la longueur d'onde moyenne du spectral du feu à Leds.

Le résultat de calcul du diamètre du feu à Leds est montré sur le tableau II-12 (calculé pour $\Phi_{feu} = 10$ cm, $f = 3$ mm, $\Phi_{op} = 1$ mm et $\lambda_{moy} = 600$ μ m).

Tableau II-12 Diamètre de l'image d'un feu de position à Leds pour différentes distances

d (m)	3	5	10	20	30	50	100	150	200	250
Φ'_{feu} (μ m)	100,0	60,0	30,1	15,2	10,2	6,4	3,7	3,0	2,7	2,5
	surfacique					1 pixel	ponctuelle			

Comme nous avons choisi une caméra avec des pixels supposés carrés de $6 \mu\text{m}$ de côté, deux cas sont à considérer :

- 1) À grandes distances ($R \geq 50 \text{ m}$), le feu à Leds se comporte comme une source ponctuelle pour la caméra.
- 2) À plus proches distances ($R < 50 \text{ m}$), le feu à Leds est résolu par la caméra et son image couvre plusieurs pixels.

Dans le 1^o cas, où le feu à Leds est vu comme un point source, le paramètre à prendre en compte est son intensité spectrique, $dI_{\text{feu}}/d\lambda$, dans la direction de la caméra, et le flux spectrique reçu par le pixel correspondant est donné par l'équation ci-dessous [68] :

$$\frac{dF_{1,\text{feu}}(R)}{d\lambda} = \frac{dI_{\text{feu}}}{d\lambda} \Omega_s T_{op} T_{atm}(\lambda) = \frac{dI_{\text{feu}}}{d\lambda} \frac{S_{op}}{R^2} T_{op} T_{atm}(\lambda) \quad (2.29)$$

Avec $S_{op} = \pi \left(\frac{\Phi_{op}}{2} \right)^2$

Où :

- Ω_s est l'angle solide sur lequel est vu l'optique depuis le feu
- S_{op} la surface de l'optique
- R la distance entre le feu à Leds et la caméra
- T_{op} le facteur de transmission optique, supposé constante sur la bande spectrale de la caméra
- T_{atm} le facteur de transmission de l'atmosphère, supposé neutre sur le parcours

Dans le 2^o cas, où le feu est résolu par les capteurs, c'est la luminance du feu, L_{feu} , qui est à prendre en compte pour le calcul du flux reçu par un pixel du capteur situé dans l'image du feu, et son expression est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dF_{2,\text{feu}}(R)}{d\lambda} = \frac{dL_{\text{feu}}}{d\lambda} \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2 T_{op} T_{atm}(\lambda)}{4 f^2} \quad (2.30)$$

Où :

- $dL_{\text{feu}}/d\lambda$ est la luminance spectrique du feu à Leds dans la direction de la caméra, qui peut

s'écrire : $\frac{dL_{\text{feu}}}{d\lambda} = \frac{dI_{\text{feu}}/d\lambda}{S_{\text{feu}}}$

- a le côté d'un pixel supposé carré du capteur

Donc :

$$\frac{dF_{2,\text{feu}}(R)}{d\lambda} = \frac{dI_{\text{feu}}}{d\lambda} \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2 T_{op} T_{atm}(\lambda)}{4 f^2 S_{\text{feu}}} \quad (2.31)$$

Pour calculer l'intensité spectrique d'un feu à Leds, on écrit :

$$683 \int_0^\infty V(\lambda) \left(\frac{dI}{d\lambda} \right) d\lambda = I_{visuelle} \quad (2.32)$$

Où $V(\lambda)$ est la courbe normalisée de la visibilité photopique de l'œil.

D'après la spécification en intensité d'un feu à Leds, rappelée plus haut, qui doit être comprise entre 400 et 1200 candelas, on a choisi une valeur de 1000 candelas pour calculer l'intensité spectrique typique d'un feu à Leds. A partir de la connaissance de l'intensité spectrique d'un feu à Leds, nous avons calculé le courant de sortie d'un pixel de la caméra.

Si $\mathcal{R}(\lambda)$ est la sensibilité spectrale de la caméra (détecteur silicium) munie d'un filtre dans le visible, le courant de signal provenant d'un feu à Leds à la distance R est donné par :

$$i_{feu}(R) = \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dF_{feu}(R)}{d\lambda} \mathcal{R}(\lambda) d\lambda \quad (2.33)$$

Qui se traduit à courtes et grandes distances par les expressions suivantes :

$$i_{feu}(R) = \begin{cases} \frac{\pi \Phi_{op}^2 T_{op}}{4R^2} \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dI_{feu}}{d\lambda} T_{atm}(\lambda) \mathcal{R}(\lambda) d\lambda & \text{à longues distances} \\ \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2 T_{op}}{4f^2 S_{feu}} \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dI_{feu}}{d\lambda} T_{atm}(\lambda) \mathcal{R}(\lambda) d\lambda & \text{à courtes distances} \end{cases} \quad (2.34)$$

Et le graphe II.20 ci-dessous exprime la variation de i_{feu} en fonction de la distance R . Les paramètres utilisés pour le calcul sont tels que : $I_{feu} = 2.6 \text{ W/sr}$, $\Phi_{feu} = 10 \text{ cm}$, $\Phi_{op} = 1 \text{ mm}$, $f = 3 \text{ mm}$, $a = 6 \mu m$, $T_{op} = 0,8$, $T_{atm}(\lambda) = 1$, et la sensibilité spectrale $\mathcal{R}(\lambda)$ est représentée sur la courbe de la figure II.19.

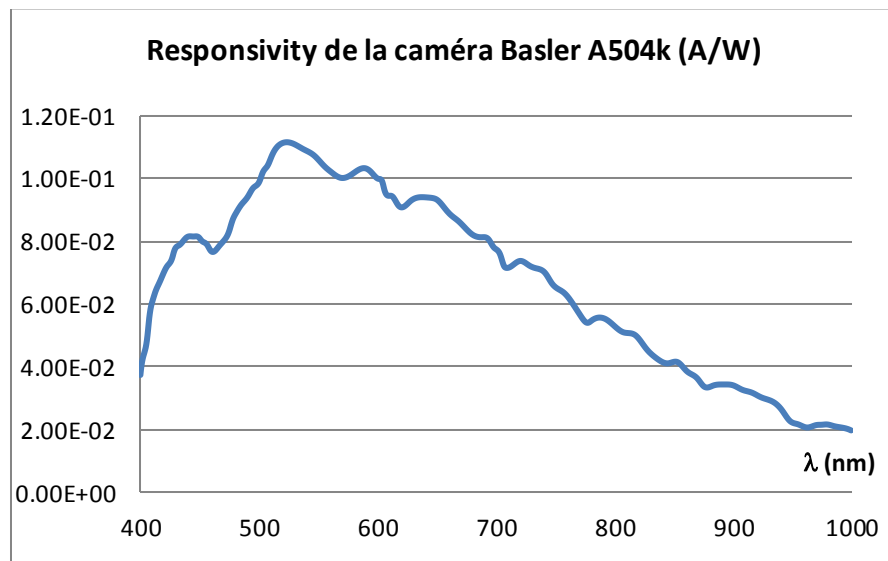


Figure II.19 Sensibilité spectrale du capteur Basler A504k

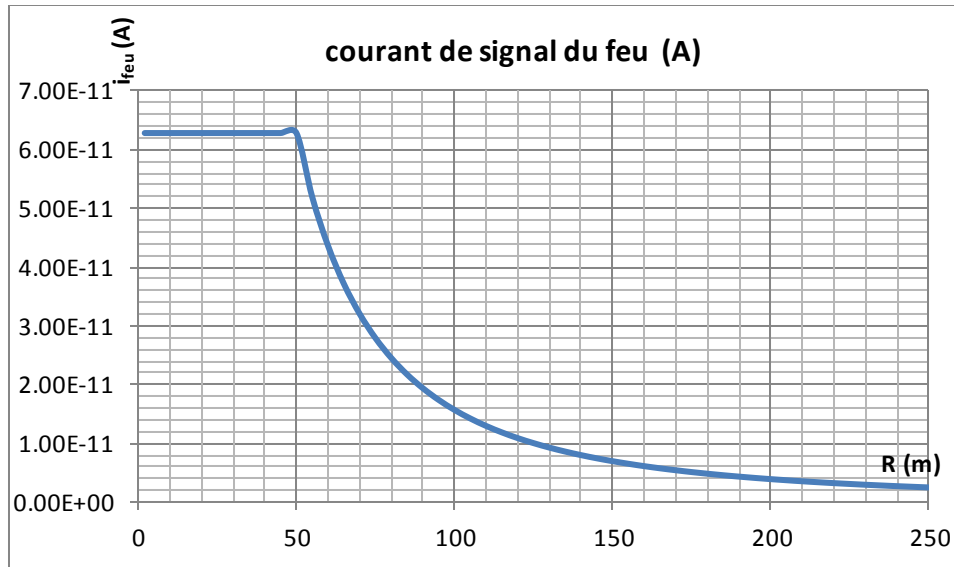


Figure IL20 Courant de sortie d'un pixel de signal provenant d'un feu à Leds

On constate que l'ordre de grandeur du courant de signal d'un feu à Leds en sortie d'un pixel est de l'ordre de 10^{-11} A à une centaines de mètres.

II.6 Calcul du signal de fond

Le fond de l'image de la caméra stéréo correspond à la scène routière où les véhicules « cibles » à détecter sont présentés, comprenant l'éclairage naturel de jour et de nuit, d'autres sources d'éclairages comme les lampadaires, les phares d'autres voitures, et les revêtements routiers. Nous allons présenter dans ce paragraphe les caractéristiques de l'éclairage naturel de jour, qui sont les conditions évidemment les plus sévères pour le bon fonctionnement du système, en présence du soleil (de façon générale en dehors du champ, mais encore plus dans le champ). Dans l'autre sens, les mauvaises conditions météorologiques, comme le brouillard et la pluie (le spray) réduisent l'intensité et ainsi la distance de détection des sources (portée du système). Pour cela, nous rappelons quelques données sur les caractéristiques radiométriques des sources naturelles diurnes.

L'éclairage naturel de jour d'une scène routière provient, sous forme directe ou diffuse, de l'éclairement du soleil et de la luminance du ciel. Pour évaluer les niveaux d'éclairage de ces deux composantes, nous avons utilisé le modèle de transfert du code MODTRAN 4.0 (**MOD**erate spectral resolution atmospheric **TRAN**smittance code), un logiciel représentant la suite des modèles LOWTRAN, qui ont été développés par l'AFGL "Air Force Geophysics Laboratory" pour modéliser la propagation de rayonnements électromagnétiques à travers l'atmosphère en fonction des conditions météorologiques. Le logiciel PcModWin développé par la société ONTAR fournit un environnement graphique permettant un paramétrage simple du code atmosphérique MODTRAN. Le calcul du rayonnement direct se fait en précisant les paramètres météorologiques locaux (tels que la distance de visibilité horizontale, le type d'aérosols qui prévaut sur la zone d'observation, la couverture nuageuse, ...), l'angle zénithal du soleil (0° : soleil au zénith, 90° : soleil à l'horizon) et le jour de l'année [69].

La figure II.21 montre un exemple de calcul d'éclairement spectrique direct au niveau du sol, pour une atmosphère US standard, un ciel clair (visibilité= 23 km) avec un modèle d'aérosols rural et un soleil au zénith. On voit que l'éclairement est environ 1200 W/m²/μm autour de 550nm.

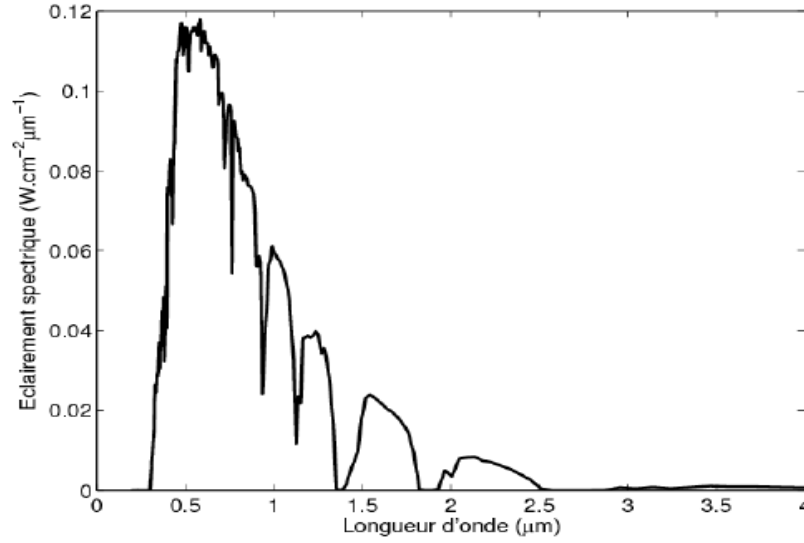


Figure II.21 Exemple d'éclairement spectrique solaire direct au sol calculé par MODTRAN

Le flux de fond incident sur un pixel et provenant de l'éclairage de la scène par le soleil est :

$$\frac{dF_{fond}}{d\lambda} = \frac{dL_{fond}}{d\lambda} \times G \times T_{op} \times T_{atm}(\lambda) \quad (2.35)$$

Où $dL_{fond}/d\lambda$ est la luminance du fond et G l'étendue géométrique de la caméra:

$$\frac{dL_{fond}}{d\lambda} = \frac{\rho(\lambda) \times \left(\frac{dE}{d\lambda}\right)}{\pi} \quad (2.36)$$

$$G = \pi \frac{S_d}{4N^2} = \frac{\pi a^2}{4\left(\frac{f}{\Phi_{op}}\right)^2} = \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2}{4f^2} \quad (2.37)$$

- $\rho(\lambda)$ est l'albédo de la scène (supposée lambertienne), moyenné sur le domaine spectral de la caméra
- $(dE/d\lambda)$ l'éclairement spectrique (en W/m²/μm) de la scène
- a le côté d'un pixel (carré)

Ainsi le flux spectrique de fond incident sur un pixel et issu d'une zone d'albédo spectral $\rho(\lambda)$, sur la bande spectrale de la caméra est :

$$\frac{dF_{fond}}{d\lambda} = \frac{\rho(\lambda) a^2 \Phi_{op}^2 T_{op} T_{atm}(\lambda)}{4f^2} \times \left(\frac{dE}{d\lambda}\right) \quad (2.38)$$

Le courant de sortie d'un pixel généré par le fond est donné par l'équation suivante :

$$i_{fond} = \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dF_{fond}}{d\lambda} \Re(\lambda) d\lambda \quad (2.39)$$

Comme l'illustre la figure 21, nous prenons comme éclairement naturel maximal de la scène entre 400 et 700 nm :

$$\left(\frac{dE}{d\lambda}\right)_{\max} = cste \approx 1200 W / m^2 / \mu m \quad (2.40)$$

Ce qui donne un courant de sortie maximal provenant de l'environnement au sol approximativement égal à :

$$(i_{fond})_{\max} = \frac{a^2 \Phi_{op}^2 T_{op}}{4 f^2} \left(\frac{dE}{d\lambda}\right)_{\max} \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \rho_{\max} \Re(\lambda) d\lambda \quad (2.41)$$

Où $\rho_{\max}$ est l'albédo maximal présent dans une scène et la transmission atmosphérique considérée comme parfaite. Il en résulte que $(i_{fond})_{\max}$ est de l'ordre de $2,6 \cdot 10^{-11}$ A, avec les paramètres de calculs : $dE/d\lambda = 1200 W/m^2/\mu m$, constant dans la bande passante de $0,4 \mu m - 0,7 \mu m$, $\Phi_{op} = 1 mm$, $f = 3 mm$, $a = 6 \mu m$, $T_{op} = 0,8$, $T_{atm} = 1$, $\rho_{\max} = 1$.

Autre source naturelle de fond, le ciel, est modélisé comme étant la source d'un rayonnement hémisphérique dont la distribution en luminance est définie en fonction de l'angle zénithal θ de 0° à 90° et de l'angle azimutal φ de 0° à 360° de la direction d'observation. La luminance spectrique diffusée dans une direction est calculée de la même façon que pour le soleil, les conditions météorologiques locales, les angles zénithal et azimutal de la direction d'observation, l'angle zénithal du soleil et le jour de l'année.

La figure II.22 montre un exemple de calcul de luminance spectrique du ciel, au sol, par diffusion, pour une atmosphère US standard, un ciel clair (visibilité = 23 km) avec un modèle d'aérosols rural, un soleil au zénith ($\theta_s = 0^\circ$, $\varphi_s = 0^\circ$), et une direction d'observation définie à 45° de la verticale locale ($\theta = 45^\circ$, $\varphi = 0^\circ$).

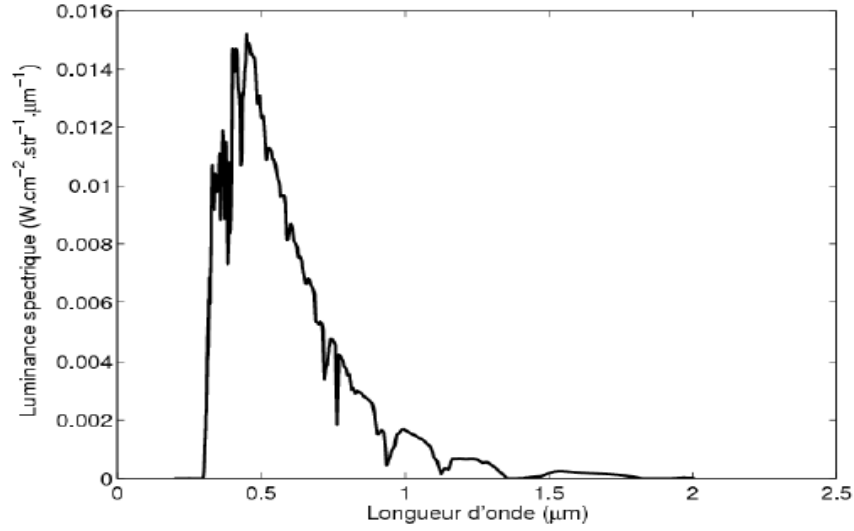


Figure II.22 Luminance spectrique de ciel calculée par MODTRAN

Le courant de sortie d'un pixel sur le fond de ciel clair est donné par une formule similaire à partir de la luminance spectrique du ciel (figure 22) :

$$i_{ciel} = \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2 T_{op}}{4 f^2} \int_{0.4 \mu m}^{0.7 \mu m} \frac{dL_{ciel}}{d\lambda} \Re(\lambda) d\lambda \quad (2.42)$$

Ceci nous donne un courant i_{ciel} de l'ordre de grandeur de $1,01.10^{-11}$. Avec les paramètres de calculs : $dL/d\lambda = 150 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$, constante entre la bande passante de $0,4 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$, $\Phi_{op} = 1 \text{ mm}$, $f = 3 \text{ mm}$, $a = 6 \mu\text{m}$, $T_{op} = 0,8$, $T_{atm} = 1$.

II.7 Rapport entre signal d'un feu à Leds stationnaire et bruit de fond

II.7.1 En absence de filtrage

Dans ce paragraphe, nous présentons le calcul du rapport signal feu à Leds /signal fond par les capteurs d'une caméra stéréo non filtrée dans les deux cas suivant :

- Feu à Leds sur fond uniforme
- Feu à Leds sur fond fluctuant

Dans le 1^{er} cas, d'une scène à fond uniforme, le bruit de la caméra provient essentiellement du bruit Shot, donc la variance en courant est donnée par :

$$\sigma_{ifond}^2 = 2ei_{fond}\Delta f \quad (2.43)$$

Où Δf est la bande passante équivalente de bruit de la caméra, telle que :

$$\Delta f = \frac{F_{cam}}{2} = 50 \text{ Hz} \quad (2.44)$$

Avec F_{cam} la cadence image de la caméra non filtrée (durée d'intégration d'une trame).

Supposons que le feu est stationnaire par rapport à la caméra, le RSB est donc donné par l'équation suivante :

$$RSB_{feusta_fonduni} = \frac{i_{feu}(R)}{\sigma_{ifond}} = \begin{cases} \frac{\pi\Phi_{op}^2 T_{op}}{4R^2} \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dI_{feu}}{d\lambda} T_{atm}(\lambda) \Re(\lambda) d\lambda & \text{à longues distances} \\ \sqrt{2e\Delta f \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dF_{fond}}{d\lambda} \Re(\lambda) d\lambda} & \\ \frac{\pi\alpha^2\Phi_{op}^2 T_{op}}{4f^2 S_{feu}} \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dI_{feu}}{d\lambda} T_{atm}(\lambda) \Re(\lambda) d\lambda & \text{à courtes distances} \\ \sqrt{2e\Delta f \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dF_{fond}}{d\lambda} \Re(\lambda) d\lambda} & \end{cases} \quad (2.45)$$

La figure II.23 ci-dessous montre le rapport d'un feu à Leds stationnaire sur fond uniforme. Les paramètres de calculs sont ceux utilisés dans le paragraphe précédent pour le feu à Leds et pour le fond à l'éclairement naturel maximal de 1200 W/m²/μm.

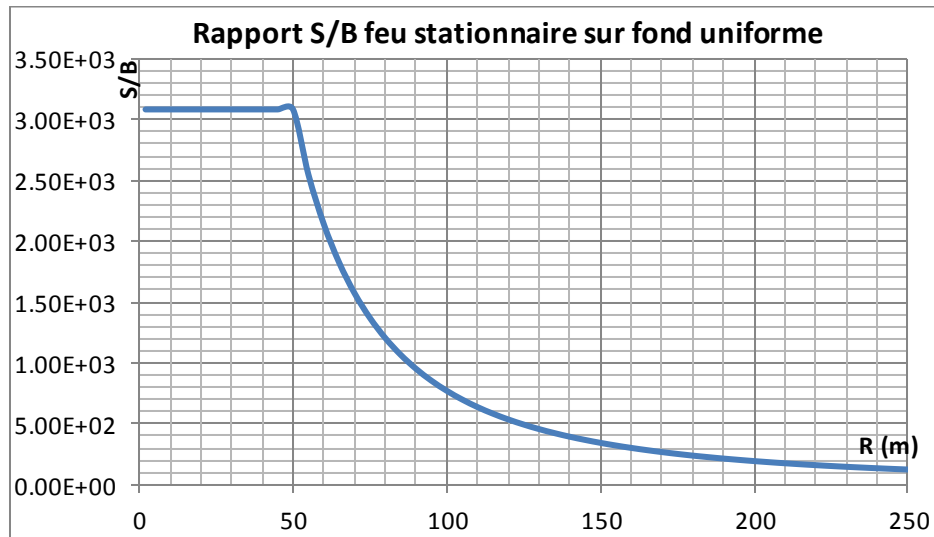


Figure II.23 Rapport signal d'un feu stationnaire sur fond uniforme

Dans le 2° cas, d'une scène de réflectance non uniforme (fond fluctuant), le bruit de fond provient des variations de réflexion des objets. Si on se fixe des fluctuations en albédo de scène, σ_ρ , de l'ordre de 10%, le rapport entre le signal du feu à Leds et les fluctuations de signal du fond est donné par :

$$\frac{S_{feu}}{S_{bruit_fond}} = \frac{i_{feu}(R)}{\sigma'_{ifond}} \quad (2.46)$$

Où σ'_{ifond} est la valeur efficace de la variation du courant de fond entre objets de la scène :

$$\sigma'_{ifond} = \frac{\sigma_\rho}{\rho_{moy}} i_{fond} \approx i_{fond} \times 0.1 \quad (2.47)$$

Ceci nous permet de tracer le rapport entre le signal du feu à Leds et les fluctuations du fond (figure II.24) :

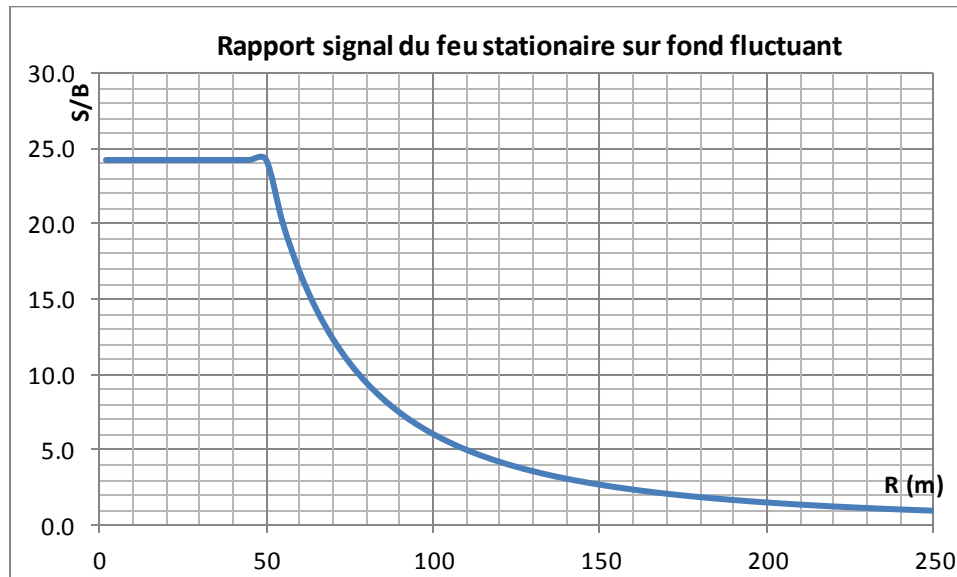


Figure II.24 Rapport signal d'un feu stationnaire sur fond fluctuant

II.7.2 Avec filtrage adapté à la fréquence de modulation des feux à Leds

Dans le cadre de la détection coopérative que nous proposons, comme nous l'avons présenté dans le chapitre I, les feux à Leds sont modulés à une fréquence aussi éloignée que possible du spectre de fréquences habituellement rencontré dans une scène automobile. Notre caméra est chargée de sélectionner les signaux à cette fréquence de modulation en rejetant les autres signaux du fond qui sont peu modulés ou modulés à des fréquences différentes. Pour caractériser ces signaux, nous avons effectué des enregistrements à haute fréquence de signaux issus de divers points du champ à différentes vitesses de véhicule. L'image II.25 ci-dessous montre la scène enregistrée par une caméra rapide à 4000 Hz, qui est montée sur un véhicule roulant à 30 Km/h sur une voie droite. Les 5 cercles rouges correspondent aux points que nous avons échantillonnés, qui représentent chacun un angle d'observation différent dans le champ de vision. Nous avons enregistré au total 800 images, soit pendant une durée de 0,2 s, qui nous ont donné les évolutions de ces points pendant cette période d'échantillonnage.

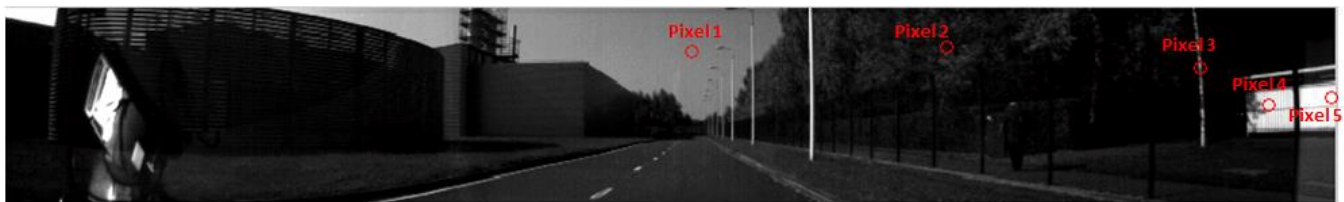


Figure II.25 Image brute de la scène (enregistrée à 30 Km/h)

Les signaux bruts et le résultat de l'analyse spectrale de ces points choisis sont respectivement montrés sur les figures II.26 et II.27 ci-dessous.

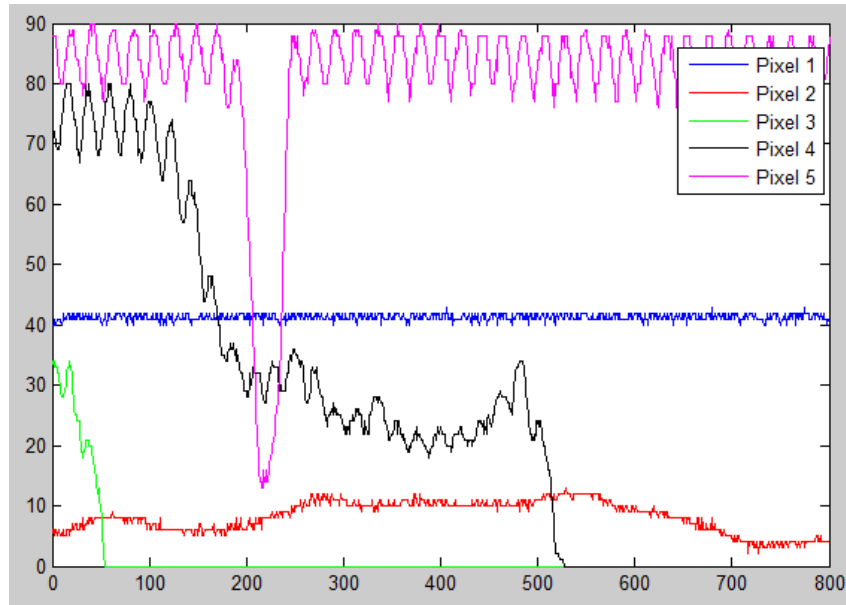


Figure II.26 Signaux typiques d'une scène naturelle roulage à 30 km/h

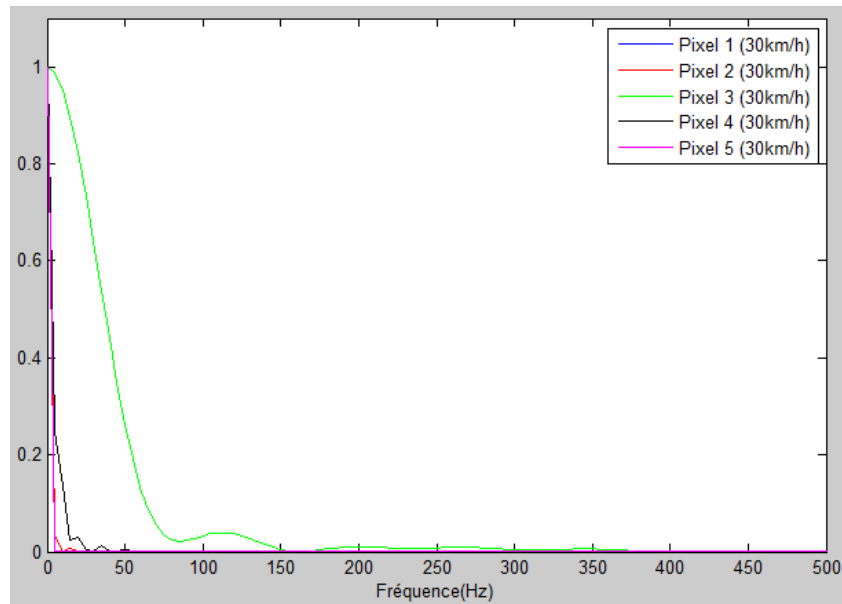


Figure II.27 Spectres correspondant aux signaux de la figure 26

De la même façon, nous avons effectué l'analyse spectrale, de la même scène, pour roulages à 50 km/h et ensuite à 70 km/h. Les figures II.28 et II.29 représentent respectivement les spectres des signaux analysés dans ces deux conditions.

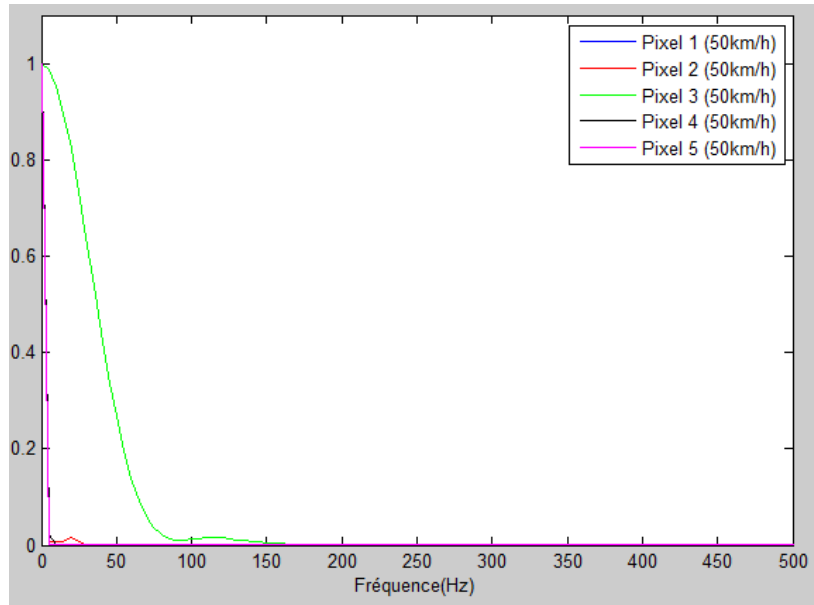


Figure II.28 Spectres des signaux échantillonnés de scène naturelle avec roulage à 50 km/h

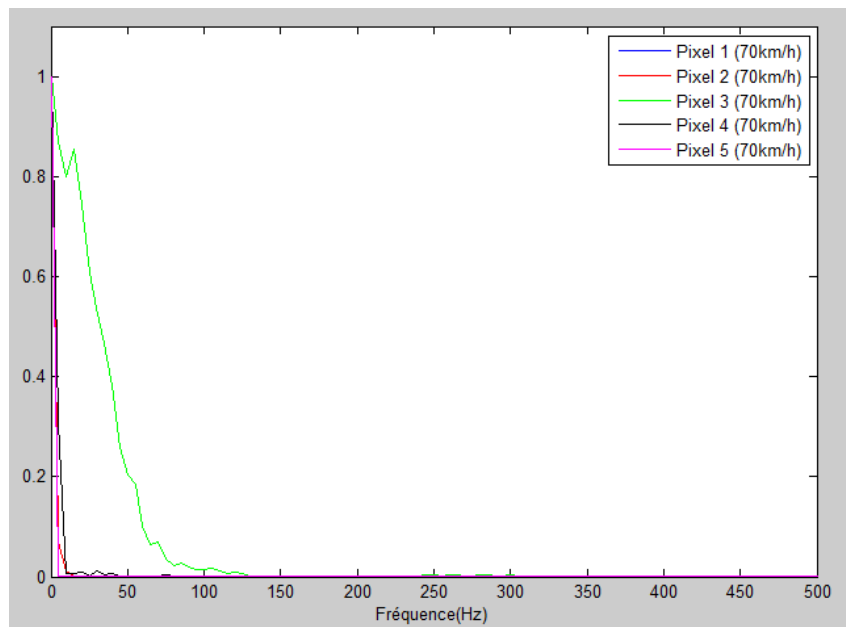


Figure II.29 Spectres des signaux échantillonnés de scène naturelle avec roulage à 70 km/h

L'analyse des spectres de fond ci-dessus montre que les fréquences de coupure sont inférieures à 400Hz, ce qui nous conduit à choisir, pour les feux à Leds, une fréquence de modulation supérieure à ou égale à 500 Hz, pour différencier suffisamment le spectre de modulation des Leds d'un spectre typique de fond.

Dans notre cas, les deux bruits principaux lors de l'enregistrement de la caméra sont le bruit de Schottky et le bruit de numérisation. Tous ces bruits vont dégrader le signal utile : une plus haute fréquence de modulation des feux à Leds signifie que le signal utile plus bruité. Pour garder un bon rapport de signal au bruit, on se limite la fréquence de modulation à 500 Hz.

Si notre filtrage du signal de la caméra est dénotée $G(f)$, les densités spectrales de signal $S'_{feu}(f)$ et $S'_{fond}(f)$ en sortie de chaque pixel sont données par les expressions suivantes :

$$S'_{feu}(f) = S_{feu}(f)G(f) \quad (2.48)$$

$$S'_{fond}(f) = S_{fond}(f)G(f) \quad (2.49)$$

Où $S_{feu}(f)$ et $S_{fond}(f)$ sont les densités spectrales des signaux que délivre la caméra non filtrée.

Les signaux en sortie de caméra après filtrage sont respectivement :

$$S'_{feu} = \int_0^{\infty} S_{feu}(f)G(f)df \quad (2.50)$$

$$S'_{fond} = \int_0^{\infty} S_{fond}(f)G(f)df \quad (2.51)$$

La loi du filtrage doit donc assurer les conditions suivantes :

$$S'_{feu} \approx S_{feu} \quad (2.52)$$

$$S'_{fond} \ll S_{fond} \quad (2.53)$$

Pour tous pixels où la courbe de densité spectrale est complètement en dehors du la loi di filtrage, le filtrage conduit à un fond quasiment noir ($S'_{fond} \approx 0$).

II.7.3 Cas du passage rapide d'un signal ($\tau < T_{mesure}$)

Si l'image d'un feu en mouvement rapide réside sur le même pixel pendant une durée, τ , inférieure à la durée d'analyse, T_{mesure} , le signal de sortie de ce pixel est inférieur au signal correspondant au même feu, mais stationnaire, dans le rapport de ces durées, aussi bien dans le cas d'une caméra filtrée que non filtrée :

$$S_{feu_rapide} \approx \frac{\tau}{T_{mesure}} \times S_{feu_stationnaire} \quad (2.54)$$

$$S'_{feu_rapide} \approx \frac{\tau}{T_{mesure}} \times S'_{feu_stationnaire} \quad (2.55)$$

II.8 Origines des fausses alarmes dans notre système

Les objets à l'origine de fausses alarmes dans notre système sont essentiellement :

- 1° cas : des objets éclairés sur la route à la « bonne fréquence » par les feux à Leds du véhicule porteur de la caméra, tels que les peintures de lignes blanches, de passage piéton, etc.
- 2° cas : des petits objets de type catadioptré intégrés dans les phares des véhicules cibles ou aux bords des routes, qui pourraient être assez réfléchissants pour certains angles d'incidence et fourniraient également un signal à la « bonne fréquence ».
- 3° cas : des petits objets, ou bords d'objets du fond, éclairés par le soleil défilant rapidement dans le champ, tels que poteaux, bords de nuages, bords de peintures, feuilles ou branches des

arbres, etc. L'expérience seule pourra montrer si la composante à la « bonne fréquence » est significative.

Dans le 1° et le 2° cas, l'objet est éclairé par les feux à Leds et observé par la caméra du véhicule porteur, en configuration de quasi rétro-réflexion, qui peut accidentellement présenter une composante à la fréquence de modulation.

Pour ce qui concerne le 1° cas, le paramètre important pour calculer le signal de la caméra est la BRDF de l'objet pour cette configuration, f_r , ou « Bi-directional Reflectance Distribution Function » [70], qui exprime la propriété en réflexion d'un objet liées à sa texture et à son mouillage, par le rapport entre la luminance en réflexion de la surface de cet objet dans chaque direction $\vec{\Omega}_r$ et son éclaïrement en provenance de la direction $\vec{\Omega}_i$:

$$f_r(\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}_r, \lambda) = \frac{L_r(\vec{\Omega}_r, \lambda)}{E_i(\vec{\Omega}_i, \lambda)} \quad (sr^{-1}) \quad (2.56)$$

En plus de l'état de polarisation de la lumière incidente, la BRDF dépend de 5 paramètres : quatre angles et la longueur d'onde.

Les directions $\vec{\Omega}_r$ et $\vec{\Omega}_i$ sont repérées par leurs coordonnées sphériques dans le repère local à la surface dA :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i} \quad (2.57)$$

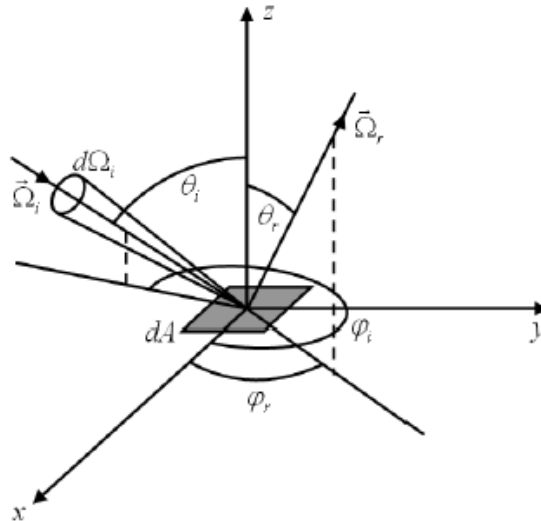


Figure II.30 Géométrie utilisée pour la définition de la BRDF d'une surface

Dans notre cas, une configuration typique est donnée sur le schéma ci-dessous (figure II.31), qui montre la lumière issue d'un feu à Leds du véhicule porteur et rétro-réfléchi par un marquage routier, qui a été observé par la caméra :

Véhicule porteur du système stéréo

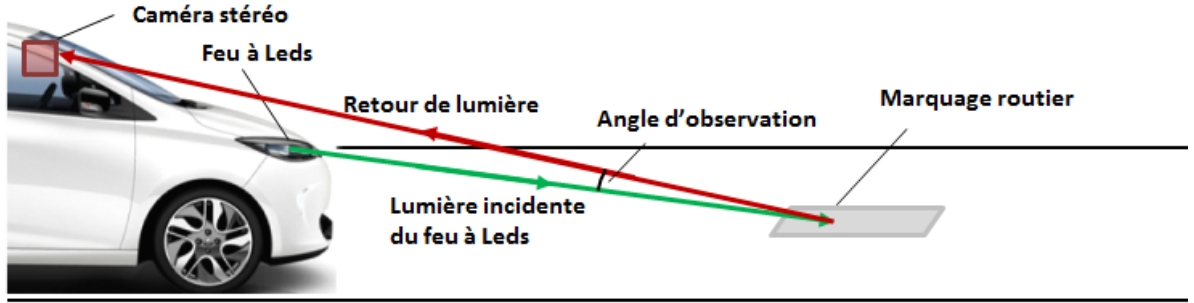


Figure II.31 Rétro-réflexion de la lumière d'un feu à Leds vers la caméra

Comme la différence de hauteur entre le feu à Leds et la caméra est relativement faible par rapport à la distance horizontale entre le véhicule et le marquage routier, l'angle d'observation, qui est l'angle entre la lumière issue du feu et le retour de la lumière est très faible, de l'ordre de quelques degré [71]. Dans ce cas, on considère que :

$$\theta_i \approx \theta_r \quad (2.58)$$

$$\varphi_i \approx \varphi_r \quad (2.59)$$

L'équation 2.60 donne le flux de signal rétro-réfléchi par une peinture horizontale sur la route (hypothèse : courtes distances) :

$$\frac{dF_{peinture}(R)}{d\lambda} = \frac{dI_{feu}}{d\lambda} \times \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2 T_{op} T_{atm}(\lambda)}{4R^2 f^2} \times f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \quad (2.60)$$

Suivant les normes des peintures routières, la BRDF f_r pour incidence et observation rasantes doit être supérieure à 0,15 cd/m²/lux ou sr⁻¹. Le courant de sortie d'un pixel observant une peinture routière à courtes distances est donné par :

$$i_{peinture}(R) = \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dF_{peinture}(R)}{d\lambda} \Re(\lambda) d\lambda \approx \frac{10^{-14}}{R^2} A \quad (2.61)$$

On constate qu'à une dizaine de mètres de distance, ce courant dû à l'édairage de peintures routières par le système est de l'ordre de 10⁻¹⁶ A, soit 10⁵ fois plus faible que le signal issu d'un feu en direct à 100 mètres, ce qui est donc négligeable (et a été vérifié expérimentalement).

Pour ce qui concerne le 2° cas, de petits objets rétro-réfléchissants, le paramètre important pour calculer le signal de la caméra est le CIL, Coefficient d'Intensité Lumineuse (unité : millicandelas par lux), qui est le quotient entre l'intensité lumineuse réfléchie dans la direction considérée et l'éclairement du dispositif catadioptrique, pour la configuration d'éclairage et d'observation donnée.

Donc, le flux de signal rétro-réfléchi par un petit objet catadioptrique sur un véhicule cible est donnée par :

$$\frac{dF_{catadioptr}(R)}{d\lambda} = \frac{dI_{feu}}{d\lambda} \times \frac{\pi a^2 \Phi_{op}^2 T_{op} T_{atm}(\lambda)}{4R^2 f^2 S_{feu}} \times CIL(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \quad (2.62)$$

Suivant les réglementations des dispositifs catadioptriques pour véhicules, le coefficient d'intensité lumineuse peut atteindre 1500 mcd/lux voire plus dans certaines configurations (angle de divergence faible, incidence proche de la normale). Le courant de sortie d'un pixel observant la réflexion par un petit objet catadioptrique est donné par :

$$i_{catadioptr}(R) = \int_{0.4\mu m}^{0.7\mu m} \frac{dF_{catadioptr}(R)}{d\lambda} \Re(\lambda) d\lambda \approx \frac{10^{-11}}{R^2} A \quad (2.63)$$

On constate que, là aussi, le courant de sortie d'un pixel sur la rétro-réflexion d'un feu à Leds sur un catadioptr à une centaine de mètres de distance est de l'ordre de 10^{-15} A, soit négligeable par rapport au signal d'un feu à Leds en direct à la même distance.

Par ailleurs, la valeur des CIL décroît rapidement, lorsque la direction d'observation s'éloigne de la direction d'éclairage, ce qui se produit à courtes distances, ce qui entraîne que ce signal est très faible quelle que soit la distance du rétro-réflecteur.

Le 3^e cas (petits objets ou bords d'objets éclairés par le soleil) a été évalué théoriquement au paragraphe II.6, qui a montré que lors d'un passage d'un pixel d'une zone sombre (albédo nul) à une zone claire (albédo de 100%), le signal est de l'ordre de 10^{-11} A, donc similaire au signal issu d'un feu à Leds à une centaine de mètres.

En conclusion, les deux premières sources de signaux parasites, qui sont rétro-réfléchis par des catadioptriques et les marquages routiers, sont de même spectre que le signal utile, mais de niveaux beaucoup plus faibles ; la 3^e source de signaux parasites due aux fortes et brusques variations d'albédo dans la scène, sont de même amplitude que les signaux utiles, mais de spectre totalement différent.

II.9 Conclusion

Il en résulte après les études que, le système anticollision que nous avons envisagé doit couvrir un champ d'au moins de 160°, et une portée de 250m. Pour les scénarii routiers typiques, nous avons choisi la durée de traitement de 10ms, pour que le filtrage détecte les signaux utiles parmi tous les signaux de la scène. Nous avons aussi fait des calculs des réponses des pixels sur différents objets qui pourraient poser problème pour le filtrage.

L'analyse des signaux des objets de la scène autres que les cibles recherchées nous a conduit à choisir 500 Hz comme fréquence de modulation des feux à Leds, car les fréquences de ces signaux parasites n'atteignent que très exceptionnellement cette valeur. De plus, même si par extraordinaire ils atteignent cette fréquence, cela ne dure qu'une fraction de seconde, généralement très inférieure à la durée d'analyse de notre traitement. À l'issue de l'étude bibliographique du chapitre 1, il nous apparaît

que notre approche est originale, parce que ces signaux parasites du fond peuvent être facilement éliminés par nos algorithmes de bas niveau, tels que la convolution sur pixels, qui sera présentée dans le chapitre 3. Notre solution donc ne nécessite pas de traitements de haut niveau, tels que ceux qui sont développés couramment dans la communauté des aides à la conduite, et qui sont très gourmandes en calcul. Malgré sa simplicité, elle permet d'obtenir des résultats expérimentaux très performants, comme le montre le chapitre 4.

Chapitre III Filtrage numérique par traitement d'image

Comme nous l'avons indiqué dans les chapitres 1 et 2, nous avons choisi de filtrer les signaux des feux à Leds modulés à la fréquence connue (500 Hz), par un traitement numérique des images de bas niveau, qui rejette les autres signaux de la scène non modulés.

Dans ce chapitre, nous présentons les trois différents types de filtres numériques que nous avons testés. Nous analysons leurs performances théoriques en lien avec les spécifications du système qui ont été présentées dans le chapitre 2 (durée de la mesure, fréquence de modulation des feux à Leds, champ de vision), ainsi que deux algorithmes d'optimisation (normalisation et seuillage sur l'amplitude de modulation). Nous présentons également le principe du calcul des probabilités de détection et de fausses alarmes en sortie de la caméra et au niveau global du système anticollision.

III.1 Critères de performance du système anticollision

III.1.1 Caractérisation du système

La fonction principale d'un système anticollision dans l'automobile, tel que celui qu'on étudie dans cette thèse, est d'alerter le conducteur d'une collision probable avec un autre véhicule (simple avertissement ou action de freinage), et sa performance repose sur deux indicateurs importants, à savoir la probabilité de bon fonctionnement (probabilité de détection des véhicules sujets à collision) et sa probabilité de dysfonctionnements, qui regroupe la probabilité de fausses alarmes, c'est-à-dire la probabilité de déclenchement erroné du système face à des objets qui ne justifient pas un freinage brutal du véhicule, et la probabilité de non détection, comme le montre la figure III.1.

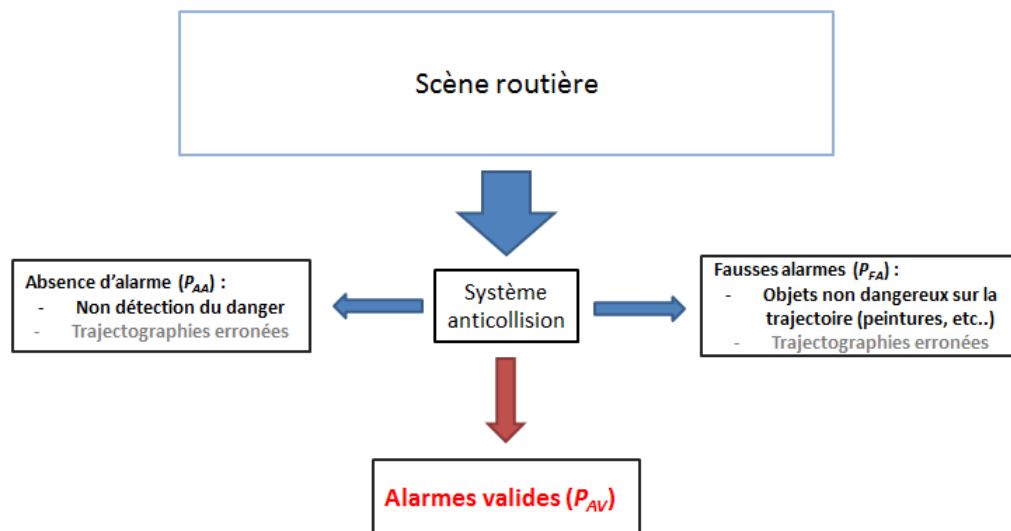


Figure III.1 Fonction principale et dysfonctionnements d'un système anticollision

Dans le cadre de cette étude, nous supposons que la précision du système à courte distance est suffisante pour nous permettre de négliger les probabilités de dysfonctionnements dus aux erreurs de trajectographie, ce qui permet d'écrire que probabilités d'alarmes valides, P_{AV} , et d'absence d'alarme, P_{AA} , sont complémentaires l'une de l'autre, d'où :

$$P_{AA} = 1 - P_{AV} \quad (3.1)$$

Ces probabilités résultent d'un traitement du signal détecté en chaque pixel des caméras et c'est ce traitement qui fait l'objet du présent chapitre. Dans cette première section, nous développons, indépendamment du choix du traitement, la minimisation des probabilités de situations indésirables, qui comme nous le montrons ci-dessous résulte d'une optimisation.

La conception industrielle d'un tel système doit prendre en compte les conséquences financières de ses dysfonctionnements, par exemple, les coûts respectifs de collisions non évitées et de freinages abusifs, pour les minimiser. Ainsi, on peut prendre comme l'un des critères, la minimisation du coût total de ces dysfonctionnements, sous la forme suivante :

$$Coût_{dysfonctionnement} = C_{collision} \times P_{AA} + C_{freinageabusif} \times P_{FA} \quad (3.2)$$

Où $C_{collision}$ et $C_{freinageabusif}$ sont respectivement les coûts moyens correspondant aux conséquences d'une collision et d'un freinage abusif, et les valeurs de P_{AA} et de P_{FA} doivent être obtenues à l'issue de nombreux essais sur route. On pourra soit envisager des P_{AA} et P_{FA} dans des conditions de circulation données (distance de la cible, nuit, brouillard, soleil de face ou de dos, autoroute, milieu urbain, etc.) soit faire la moyenne sur un ensemble réputé représentatif de situations ; de toute façon, l'acquisition des données devra d'abord se faire dans une série de situations bien définies.

Pour limiter le cadre de cette thèse, nous nous concentrons sur les paramètres qui permettent de minimiser ces probabilités de dysfonctionnements, en sortie de filtrage numérique des images. Sans traitement, les histogrammes du fond et de la cible se recouvrent et ne peuvent être dissociés. Le paragraphe suivant expose l'objectif des traitements numériques, destinés à effectuer cette dissociation.

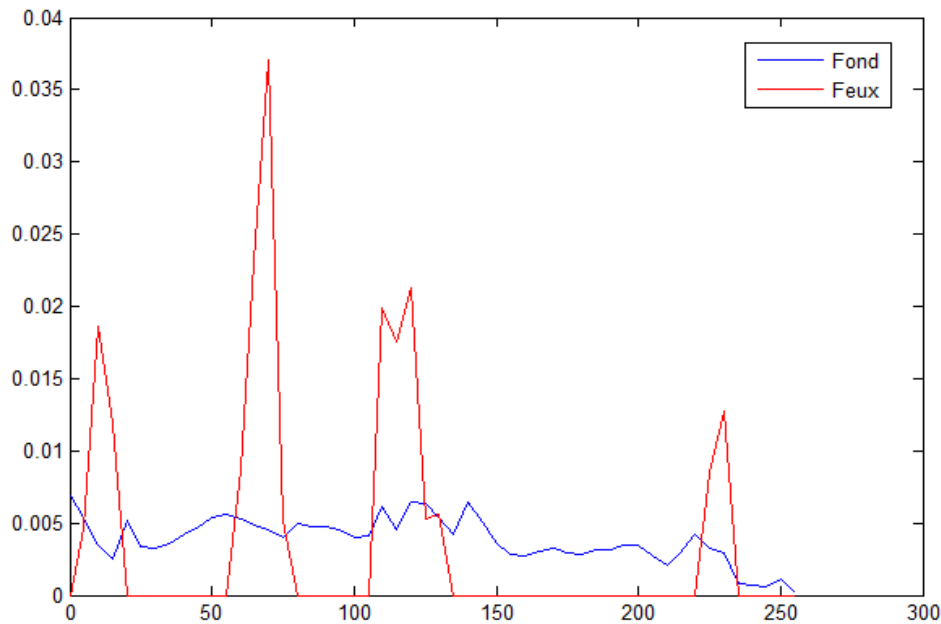


Figure III.2 Lois de densité de probabilités d'images brutes non traitées

III.1.2 Probabilités de détection et de fausses alarmes d'un capteur

Comme les deux capteurs de gauche et de droite de la caméra stéréo sont apriori identiques, on supposera que leurs performances en détection sont similaires, et il suffit donc de définir ci-dessous les propriétés de l'un ou l'autre d'entre eux.

Pour cela, nous envisageons une configuration routière donnée, dans laquelle le capteur enregistre une séquence d'images contenant un feu à Leds présent dans la scène, à une cadence rapide, bien supérieure à la fréquence de modulation du feu.

En appliquant aux signaux issus de chaque pixel de ces images, les différents types de filtrage numérique exposés ci-après, nous obtenons, pour les images ainsi traitées, des nouvelles lois de densité de probabilité, des signaux du fond, DDP_{fond} , et les signaux des feux, DDP_{feux} . La figure III.3 montre un exemple illustratif de ces lois pour une scène donnée (en particulier pour une distance donnée du feu), la noire pour la densité de probabilité des signaux du fond, S'_{fond} , et la rouge pour celle des signaux des feux à Leds modulés, S'_{feu} . Artificiellement, la dynamique de ces deux courbes est limitée entre 0 et une valeur maximale arbitraire. Comme on l'a noté précédemment, on demande aux traitements de limiter la courbe des signaux de fond au plus près du 0, et la courbe des signaux des feux à Leds modulés au plus près de la valeur maximale, v_{max} . On rappelle que l'intégrale sous chaque courbe de loi de densité de probabilité est égale à 1 :

$$\int_0^{v_{max}} DDP_{feux}(v)dv = 1 \text{ et } \int_0^{v_{max}} DDP_{fond}(v)dv = 1 \quad (3.3)$$

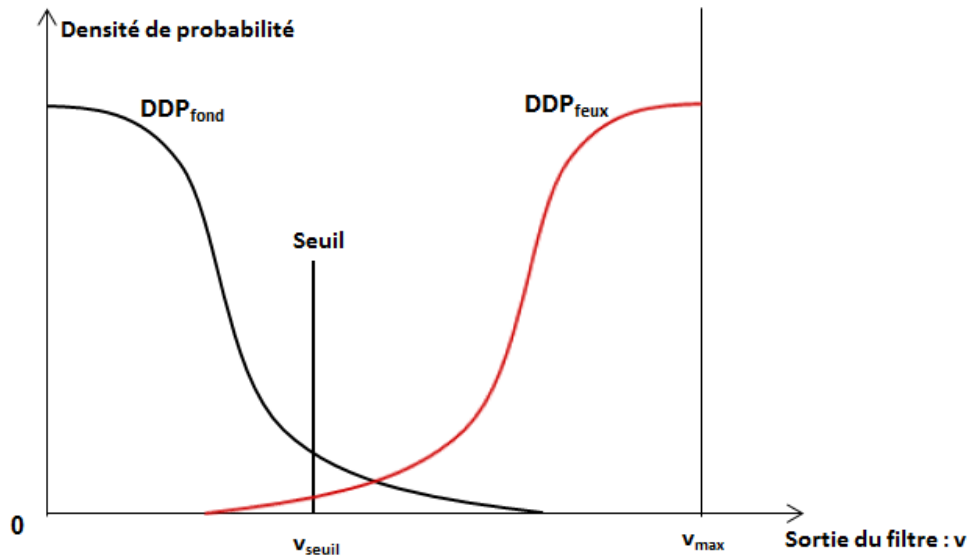


Figure III.3 Lois de densité de probabilités d'une image après traitement

Nous appliquons à cette image traitée un seuillage, destiné à trier les signaux issus des feux à Leds par rapport aux signaux issus du fond, en imposant la logique suivant laquelle tout signal supérieur au seuil est considéré comme un signal utile correspondant à un feu à Leds et tout signal inférieur au seuil est considéré comme du fond. Ceci nous conduit à définir d'une part la probabilité de détection, P_d , du

signal utile, qui est la probabilité pour qu'un signal issu d'un feu à Leds soit supérieur à la valeur de ce seuil, donc égale à :

$$P_d = \int_{v_{seuil}}^{v_{max}} DDP_{feux}(v) dv \quad (3.4)$$

Et d'autre part, la probabilité de fausses alarmes, P_{fa} , qui est la probabilité pour qu'un signal issu du fond soit supérieur à ce seuil :

$$P_{fa} = \int_{v_{seuil}}^{v_{max}} DDP_{fond}(v) dv \quad (3.5)$$

On rappelle que les courbes de la figure III.2 ci-dessus correspondent à une configuration donnée, et donc vont être variables au cours d'un scénario. En conséquence, le seuil doit être choisi pour optimiser la performance du système anticollision tout au long du scénario, et plus particulièrement pour les zones de dangerosité maximale, c'est-à-dire pour les distances inter-véhicule proches. Le minimum de coût des dysfonctionnements du système, estimé par l'équation (3.2) et obtenu lorsque la dérivée de la fonction de coût par rapport au seuil, ci-dessous :

$$Coût(v_{seuil}) = C_{collision} \times P_{AA}(v_{seuil}) + C_{freinage_abusif} \times P_{FA}(v_{seuil}) \quad (3.6)$$

est égale à 0, soit :

$$\frac{dCoût(v_{seuil})}{dv_{seuil}} = 0 \quad (3.7)$$

Donc, nous avons :

$$\frac{dCoût(v_{seuil})}{dv_{seuil}} = C_{collision} \times \frac{dP_{AA}(v_{seuil})}{dv_{seuil}} + C_{freinage_abusif} \times \frac{dP_{FA}(v_{seuil})}{dv_{seuil}} \quad (3.8)$$

Soit :

$$\frac{\frac{dP_{AA}(v_{seuil})}{dv_{seuil}}}{\frac{dP_{FA}(v_{seuil})}{dv_{seuil}}} = - \frac{C_{freinage_abusif}}{C_{collision}} \quad (3.9)$$

Développons ici un exemple simple. Considérons que le coût d'un freinage abusif est équivalent à celui d'une collision. Pour le modèle de signal, les lois statistiques du bruit ne sont pas connues. Cependant, si on considère que l'opération de filtrage consiste à combiner plusieurs valeurs temporelles échantillonnées sur le même signal et affectées par des échantillons de bruit de même loi et indépendants, il est plausible d'adopter pour le signal filtré un modèle gaussien. Considérons donc que

si les lois de probabilité de fausses alarmes et d'absence d'alarme sont des gaussiennes, à variable v , telles que :

$$DDP_{fond} = e^{-\alpha_{fond}v^2} = -\frac{dP_{FA}}{dv} \quad (3.10)$$

Et que :

$$DDP_{feux} = e^{-\alpha_{feux}(v-v_0)^2} = -\frac{dP_{AA}}{dv} \quad (3.11)$$

Il en ressort que le minimum de coût des dysfonctionnements est obtenu pour :

$$\frac{dP_{AA}(v_{seuil})}{dv_{seuil}} = -\frac{dP_{FA}(v_{seuil})}{dv_{seuil}} \quad (3.12)$$

Soit :

$$e^{-\alpha_{fond}v_{seuil}^2} = e^{-\alpha_{feux}(v_{seuil}-v_0)^2} \quad (3.13)$$

Ainsi :

$$v_{seuil} = \frac{v_0}{1 - \sqrt{\frac{\alpha_{fond}}{\alpha_{feux}}}} \quad (3.14)$$

Dans les cas où les deux coûts ne sont pas équivalents, on trouvera que le seuil se décale vers des valeurs plus basses si le coût d'une collision est plus important, et vers les valeurs plus élevées si le coût d'un freinage abusif est plus important.

III.1.3 Probabilités de détection et de fausses alarmes de la caméra stéréo

Pour un objet donné, sa probabilité de détection par le système de caméra stéréo, P_D , est la probabilité qu'il ait été détecté au même moment par les différentes caméras. Dans le cas de deux caméras par exemple, on trouve simplement l'équation suivante :

$$P_D = (P_d)_{gauche} \times (P_d)_{droite} \quad (3.15)$$

Le calcul de probabilités de détection et de fausses alarmes du système anticollision, est basé sur les probabilités calculées ci-dessus, en prenant compte d'autres raisonnements de vraisemblance. Par exemple, un objet doit être présent sur des images calculées consécutives, et sa trajectographie mesurée doit être raisonnable pour être considérée comme un feu du véhicule. En plus, les objets détectés dans les zones qui ont moins de dangerosité ne demanderont pas que le système réagisse donc n'engendrent pas de fausse alarme.

III.2 Choix de la forme de la modulation du signal issu des feux à Leds

Nous nous intéressons maintenant à la façon dont le signal lumineux détecté par les pixels des caméras sera traité pour fournir l'information de décision : faut-il, ou non, déclencher une alarme ? Cette décision n'est pas effectuée sur chaque mesure de chaque pixel de chaque caméra, mais résulte d'une combinaison entre plusieurs mesures. En particulier, nous nous intéressons ici au traitement principal à effectuer avant toute opération de « haut niveau » sur l'interprétation des images et la trajectographie : il s'agit, pour chaque pixel, de repérer avec une bonne efficacité l'existence de la modulation du signal lumineux fourni par une LED d'un véhicule cible. Nous nous intéresserons donc, de façon à comparer plusieurs situations possibles, à différents formats de modulation, mais surtout, pour une modulation donnée, à la combinaison dans le temps des signaux successifs mesurés par un pixel donné, qui est le traitement massif, de « bas niveau », à effectuer systématiquement sur tous les pixels de toutes les caméras pour identifier l'existence de la modulation recherchée.

Lorsque la caméra rapide observe la scène, le photocourant sur chaque pixel est intégré pendant la durée d'une trame, et le résultat est converti en niveaux de gris (en anglais : Digital Numbers) dans l'image obtenue.

Actuellement, les feux à LED sont le plus souvent alimentés en continu. On trouve toutefois sur certains modèles une alimentation en créneau. Pour notre expérimentation, il était facile d'utiliser un générateur basse fréquence pour produire une modulation sinusoïdale. Nous avons donc étudié la modulation sinusoïdale et la modulation en créneau. Pour cela, nous avons d'abord étudié le cas où le signal d'un feu à Leds est modulé en sinusoïdal, auquel cas le filtre adapté est une sinusoïde, et ensuite le cas où il est modulé en créneau, où le filtre adapté est un créneau. Le traitement que nous effectuerons dérive dans son principe de la méthode du « filtre adapté » : on sait qu'en présence d'un bruit additif, blanc, indépendant du signal, la meilleure façon (au sens des moindres carrés) de faire ressortir une forme donnée – dans notre cas, une sinusoïde ou un créneau de période et de durée données – consiste à corrélérer le signal bruité avec la forme recherchée. Le filtre adapté pour une sinusoïde est donc une sinusoïde, et pour un créneau, c'est un créneau. Bien entendu, pour obtenir un résultat dans un délai acceptable, on recherchera uniquement les formes de signal pendant un délai limité à quelques périodes. Nous appellerons K_0 le nombre de période retenu.

Le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon nous oblige à échantillonner la scène avec une fréquence au minimum double de celle du signal à analyser. Dans le cas d'échantillonnage par une caméra qui intègre le signal pendant toute la durée qui s'écoule entre deux acquisitions, cette intégration atténue les hautes fréquences : la fréquence de Nyquist n'est pas suffisante, et il nous est apparu nécessaire, vu des expérimentations, d'échantillonner le signal à une fréquence au moins égale à 2 fois cette fréquence de Nyquist. Théoriquement, plus la fréquence d'échantillonnage de la caméra est rapide, plus les échantillons obtenus seront précis en ce qui concerne l'analyse fréquentielle. Cependant, cette fréquence est limitée par le fait que le signal issu d'une source de puissance donnée devient de plus en plus faible lorsque la fréquence d'image augmente, et cela impose des limites à la portée du système sur un feu à Leds dont l'intensité est imposée par les réglementations automobiles. Ainsi, on s'est limité dans les essais à une fréquence d'image de 5000 Hz, soit 10 fois la fréquence de modulation des feux à Leds, et nous présentons les études sur les cadences d'images à 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz, et 5 kHz,

soit 4, 6, 8, 10 fois cette fréquence de modulation. Nous verrons par la suite que nous avons finalement opté pour la fréquence d'image de 4000 Hz.

III.2.1 Échantillonnage des feux à Leds modulés en sinusoïdal et en créneau

- En ce qui concerne un signal modulé en sinusoïdal

Soit f_0 (la période $T = 1/f_0$) la fréquence de modulation et φ sa phase, quelconque. Le signal électrique pour un pixel comporte une composante modulée proportionnelle à :

$$i(t) = \cos(2\pi \frac{t}{T} + \varphi) \quad (3.16)$$

Les échantillons x_n sont les intégrales de $i(t)$ sur la durée ΔT de chaque trame successive :

$$x_n = \int_{n\Delta T}^{(n+1)\Delta T} i(t)dt = \int_{n\Delta T}^{(n+1)\Delta T} \cos(2\pi \frac{t}{T} + \varphi)dt \quad (3.17)$$

Si N_0 est le nombre d'échantillons par période du signal recherché et ΔT la durée d'une trame de la caméra, en négligeant les temps morts entre trames, on a :

$$N_0 \Delta T = T \quad (3.18)$$

D'où :

$$x_n = \frac{T}{\pi} \sin(\frac{\pi}{N_0}) \cos(\pi \frac{2n+1}{N_0} + \varphi) \quad (3.19)$$

Nous nous intéressons à la partie variable de x_n , donc Vx_n est donné par l'équation suivante :

$$Vx_n = \sin(\frac{\pi}{N_0}) \cos(\pi \frac{2n+1}{N_0} + \varphi) \quad (3.20)$$

La figure III.4 ci-dessous montre la modulation de quantités intégrées Vx_n sur deux périodes du signal pour différentes valeurs de N_0 et de φ (axe x : t/T ; axe y : Vx_n) (valeurs illustratives) :

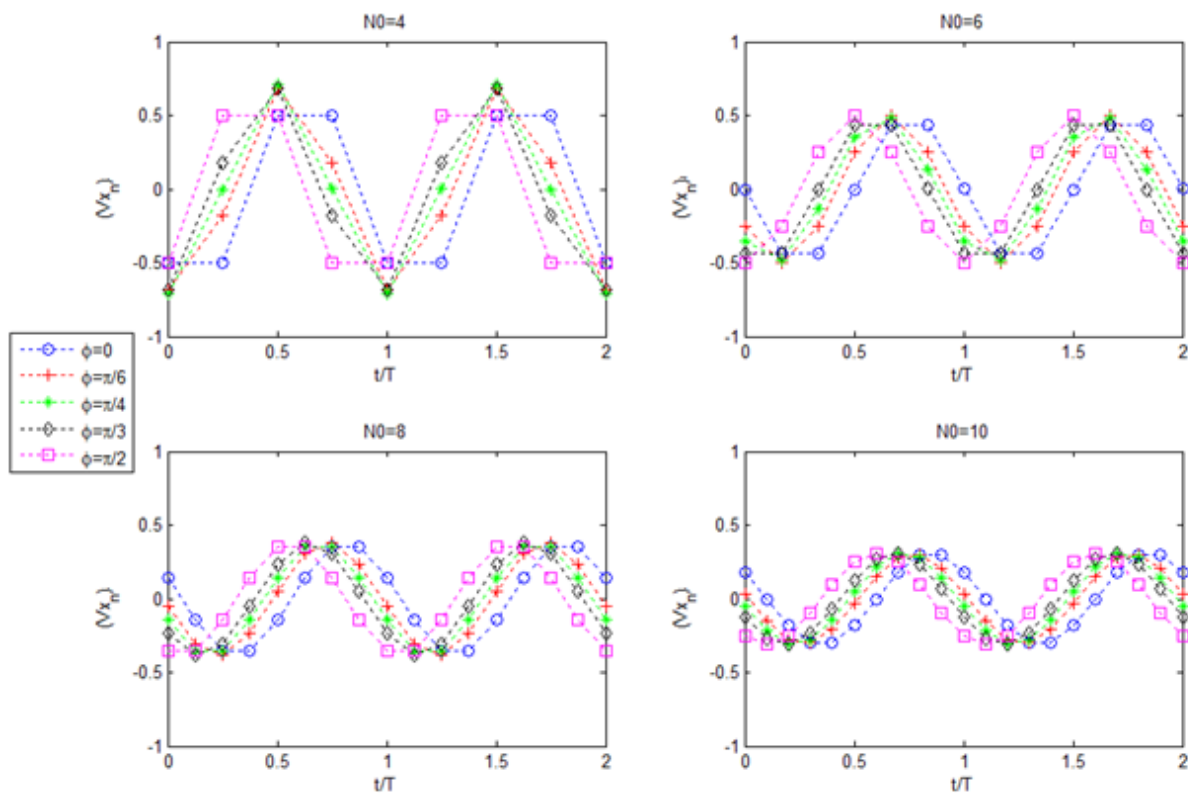


Figure III.4 Échantillonnage par une caméra du signal d'un feu à Leds modulé en sinusoïdal à la fréquence recherchée ($N_0 = 4, 6, 8, 10$)

- En ce qui concerne un signal modulé en créneau

Dans notre étude du chapitre 3, nous supposons que le rapport cyclique de la modulation des sources est 50%. Sauf exception, tous les signaux analysés dans le chapitre sont issus de feux à Leds modulés en créneau 50% ON et 50% OFF.

La figure III.5 ci-dessous montre la modulation de quantités intégrées par la caméra Vx_n sur une source modulée en créneau sur deux périodes, avec cadence d'échantillonnage de 4, 6, 8 et 10 fois la fréquence de modulation, pour des différentes valeurs de φ (axe x : t/T ; axe y : Vx_n) :

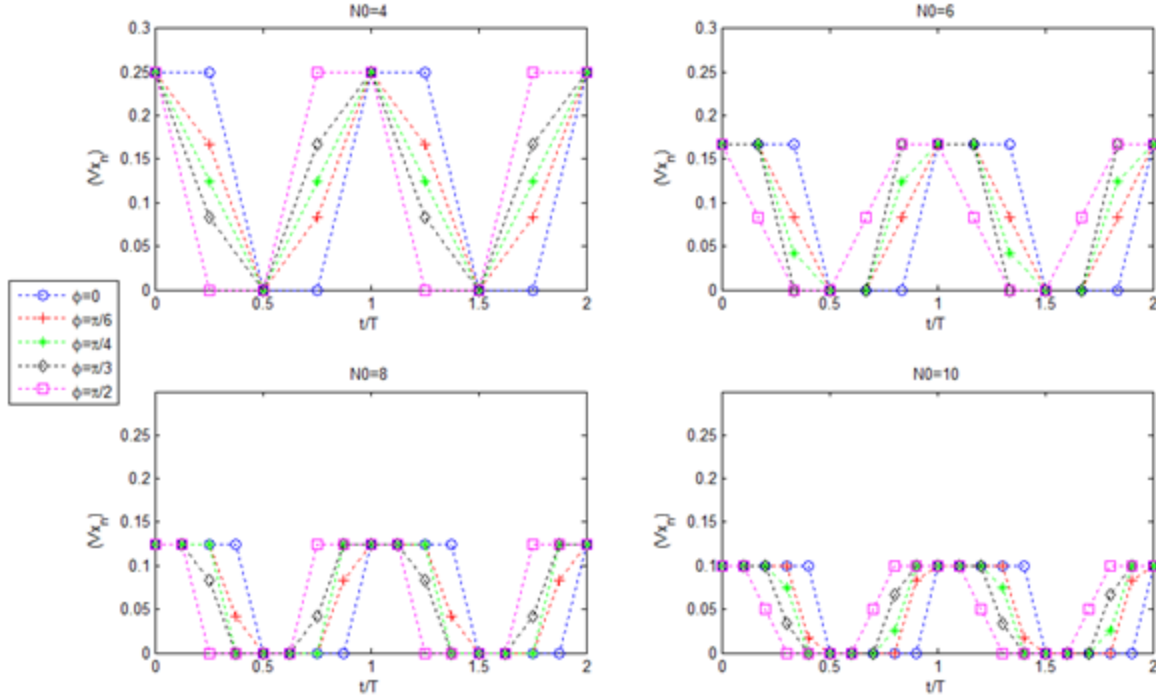


Figure III.5 Échantillonnage par caméra rapide du signal d'un feu à Leds modulé en créneau à la fréquence recherchée ($N_0 = 4, 6, 8, 10$)

Il résulte des figures III.4 et III.5 que, pour une source modulée à une fréquence donnée, soit en sinusoïdal, soit en créneau, l'augmentation en nombre d'échantillons par période permet de donner des courbes plus proches du signal initial, mais comme le temps d'intégration devient plus court, cela réduit aussi l'amplitude du signal échantillonné.

III.2.2 Signal en sortie du filtre numérique des signaux recherchés modulés en sinusoïdal et en créneau

a. Signaux recherchés modulés en sinusoïdal

Le filtre adapté en sinusoïdal, comme cela a été décrit dans le paragraphe I.3.2 du chapitre 1, est constitué de deux phases, décalées de $\pi/2$ l'une de l'autre, soit la partie réelle et la partie imaginaire.

Pour un signal modulé en sinusoïdal, si on reprend son expression numérique dans le paragraphe ci-dessous, on obtient son produit de convolution complexe $X[K_0, N_0]_{f_0_Sinus}$, donnée à la fréquence de modulation de la source, par l'équation suivante, où K_0 est le nombre entier de périodes du signal de feu à Leds qui sont prises en compte dans le traitement :

$$X[K_0, N_0]_{f_0_Sinus} = \frac{T}{N_0 K_0 \pi} \left[\sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} x_n' \cos\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) - j \sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} x_n' \sin\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) \right] \quad (3.21)$$

Ainsi :

$$X[K_0, N_0]_{f_0_Sinus} = \frac{T}{N_0\pi} \sin\left(\frac{\pi}{N_0}\right) \left[\sum_{n=0}^{N_0-1} \cos\left(\pi \frac{2n+1}{N_0} + \varphi\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) - j \sum_{n=0}^{N_0-1} \cos\left(\pi \frac{2n+1}{N_0} + \varphi\right) \sin\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) \right] \quad (3.22)$$

Le critère cherché pour le signal issu d'un feu à Leds modulé, soit le module de $X[K_0, N_0]_{f_0_Sinus}$, est donc donné par l'expression :

$$|X[K_0, N_0]_{f_0_Sinus}| = |X[N_0]_{f_0}| = \frac{T}{N_0\pi} \sin\left(\frac{\pi}{N_0}\right) \left| \sum_{n=0}^{N_0-1} \cos\left(\pi \frac{2n+1}{N_0} + \varphi\right) e^{-j\frac{2\pi}{N_0} n} \right| \quad (3.23)$$

On voit que cette valeur est indépendante de K_0 , nombre de périodes échantillonnées du signal du feu à Leds. Ça veut dire que pour un signal d'entrée et une cadence d'images donnés, le signal de sortie est 100% à la valeur maximale.

b. Signaux recherchés modulés en créneau

Le filtre adapté en créneau suit la forme de la modulation du signal du feu à Leds, constituant des 1 et des -1, qui correspondent respectivement aux niveaux haut et bas du signal modulé recherché. Comme le filtre en sinusoïdal, la réponse impulsionnelle du filtre en créneau comporte deux parties réelle et imaginaire, décalées de $\pi/2$ l'une de l'autre. Pour bien détecter la phase, nous avons choisi de tester les deux cas où la fréquence image soit 4 ou 8 fois la fréquence de modulation du signal. Par exemple, les réponses impulsionnelles réelle et imaginaire du filtre pendant une période du signal d'un feu à Leds, pour les fréquences d'image à 2 kHz et 4 kHz ($N_0 = 4, 8$), sont respectivement données par les expressions suivantes :

$$\text{Pour une cadence image de 2 kHz} \quad \left\{ \begin{array}{l} (F_CLA_{Réelle})_{2kHz} = 1 \ 1 \ -1 \ -1 \\ (F_CLA_{Imaginaire})_{2kHz} = 1 \ -1 \ -1 \ 1 \end{array} \right. \quad (3.24)$$

$$(3.25)$$

$$\text{Pour une cadence image de 4 kHz} \quad \left\{ \begin{array}{l} (F_CLA_{Réelle})_{4kHz} = 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \\ (F_CLA_{Imaginaire})_{4kHz} = 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \end{array} \right. \quad (3.26)$$

$$(3.27)$$

En ce qui concerne la modulation en créneau, un point important est qu'il est possible de faire varier ce rapport cyclique du signal modulé, et du filtrage adapté, ce qui pourrait permettre de détecter une cible et de déduire en même temps son type, par exemple reconnaître une voiture, un poids lourd, un piéton, un 2-roues, etc.

Soient $[x_1 \ x_2 \ x_3 \dots]$ les échantillons bruts théoriques obtenus par la caméra sur un signal modulé en créneau. Les deux produits de convolution du signal recherché avec les parties réelle et imaginaire du filtre pendant K_0 périodes (nous supposons que les échantillons sont obtenus dans des conditions idéales et qu'ils se répètent pendant ces K_0 périodes), $P_CLA_{Réelle}$ et $P_CLA_{Imaginaire}$, sont donnés respectivement par les expressions ci-dessous, pour $N_0=4$:

$$(P_CLA_{Réelle})_{N_0=4, f_0} = x_1 * 1 + x_2 * 1 + x_3 * (-1) + x_4 * (-1) + \dots \quad (3.28)$$

$$(P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=4, f_0} = x_1 * 1 + x_2 * (-1) + x_3 * (-1) + x_4 * 1 + \dots \quad (3.29)$$

Et de même, pour $N_0=8$:

$$(P_CLA_{Réelle})_{N_0=8, f_0} = x_1 * 1 + x_2 * 1 + x_3 * 1 + x_4 * 1 + x_5 * (-1) + x_6 * (-1) + x_7 * (-1) + x_8 * (-1) + \dots \quad (3.30)$$

$$(P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=8, f_0} = x_1 * 1 + x_2 * 1 + x_3 * (-1) + x_4 * (-1) + x_5 * (-1) + x_6 * (-1) + x_7 * 1 + x_8 * 1 + \dots \quad (3.31)$$

Le module du signal en sortie du filtre $|X[K_0, N_0]_{f_0_Créneau}|$, est la racine carrée de la somme des carrés des parties réelle et imaginaire, conformément à l'équation suivante :

$$|X[K_0, N_0]_{f_0_Créneau}| = \frac{\sqrt{P_TFD_{Réelle}^2 + P_TFD_{Imaginaire}^2}}{N_0 K_0} \quad (3.32)$$

Beaucoup plus que dans le cas de la modulation et du filtrage en sinusoïdal, la valeur de $|X[K_0, N_0]_{f_0_Créneau}|$ dépend du déphasage entre le signal et la caméra.

III.2.3 Fonctions de transfert théoriques des filtres numériques en sinusoïdal et en créneau

Pour évaluer les effets des filtres adaptés (en sinus ou en créneau), sur les signaux modulés à d'autres fréquences que la fréquence recherchée, considérons un signal d'entrée (par exemple courant de sortie d'un pixel) modulé à une fréquence f autre que f_0 , c'est-à-dire proportionnel à :

$$i_f(t) = \cos(2\pi f t + \varphi_f) \quad (3.33)$$

Les échantillons obtenus après intégration par la caméra sont, à chaque image :

$$(x_n)_f = \int_{n\Delta T}^{(n+1)\Delta T} \cos(2\pi f t + \varphi_f) dt = \frac{T}{\pi} \frac{f_0}{f} \sin\left(\frac{\pi}{N_0} \frac{f}{f_0}\right) \cos\left(\frac{f}{f_0} \frac{\pi(2n+1)}{N_0} + \varphi_f\right) \quad (3.34)$$

a. Filtre adapté en sinusoïdal

Si le filtre adapté en sinusoïdal est appliqué sur ces échantillons, la convolution du signal à la fréquence f avec le filtre est donnée par l'équation :

$$X[K_0, N_0]_{f_Sinus} = \frac{T}{N_0 K_0 \pi} \frac{f_0}{f} \sin\left(\frac{\pi}{N_0} \frac{f}{f_0}\right) \sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} \cos\left(\frac{f}{f_0} \frac{\pi(2n+1)}{N_0} + \varphi_f\right) e^{-j \frac{2\pi}{N_0} n} \quad (3.35)$$

Son module est donc donné par l'équation suivante :

$$|X[K_0, N_0]_{f_Sinus}| = \frac{T}{N_0 K_0 \pi} \frac{f_0}{f} \sin\left(\frac{\pi}{N_0} \frac{f}{f_0}\right) \left| \sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} \cos\left(\frac{f}{f_0} \frac{\pi(2n+1)}{N_0} + \varphi_f\right) e^{-j \frac{2\pi}{N_0} n} \right|$$

(3.36)

Soit r le ratio de la fréquence f considérée à la fréquence recherchée f_0 :

$$r = \frac{f}{f_0} \quad (3.37)$$

Donc :

$$|X[K_0, N_0]_{f_Sinus}| = \frac{T}{N_0 K_0 \pi} \sin\left(\frac{\pi r}{N_0}\right) \left| \sum_{n=0}^{N_0 K_0 - 1} \cos\left(\frac{\pi r(2n+1)}{N_0} + \varphi_f\right) e^{-j\frac{2\pi}{N_0} n} \right| \quad (3.38)$$

On remarque que la valeur $|X[K_0]_{f_Sinus}|$ est fonction de 4 variables :

$$|X[K_0, N_0]_{f_Sinus}| = f(r, N_0, K_0, \varphi_f) \quad (3.39)$$

En appliquant l'expression de convolution (équation 3.38), $X[K_0, N_0]_{f_Sinus}$, à des signaux à différentes fréquences, nous avons tracé les courbes de fonction de transfert du filtrage dans la bande spectrale étudiée pour différentes valeurs de K_0 . Sur ces graphes, on explore le domaine de fréquences comprises entre celle du signal continu ($f=0$) et celle du signal recherché, sachant que dans la pratique les fréquences des signaux du fond à rejeter sont plus faibles que la fréquence de modulation des feux à Leds et que les fréquences les plus vraisemblables, dans un environnement urbain, sont 50 Hz et 100 Hz (en Europe) : dans le cas d'une fréquence de signal utile $f_0=500$ Hz, il importe donc que la fréquence $0,1f_0$ et la fréquence $0,2f_0$ soient bien rejetées. Pour cela nous ne montrons ci-dessous que la partie inférieure du filtre ($f < f_0$). Il faut noter que cette loi de fonction de transfert du filtrage passe-bande est à peu près symétrique par rapport à $f=f_0$ entre $f=0$ et $f=2f_0$.

Soit $(X[K_0, N_0]_{f_Sinus})_{f_0}$ la valeur de $X[K_0, N_0]_{f_Sinus}$ lorsque $f = f_0$. Pour obtenir les courbes de fonction de transfert normalisées, $X[K_0, N_0]_{f_Sinus} / (X[K_0, N_0]_{f_Sinus})_{f_0}$, pour différentes valeurs de K_0 et N_0 , nous avons calculé les moyennes après filtrage pour différentes phases comprises entre 0 et 2π , avec un pas de $0,02 \pi$ rad. Nous avons pris un pas de fréquence de $\Delta f = 0,01 * f_0$ soit 5 Hz, et nous supposons que tous les signaux sont idéaux portant la même amplitude de modulation.

Les figures III.6 et III.7 ci-dessous présentent les fonctions de transfert calculées en fonction de K_0 et N_0 dans la fenêtre spectrale 0 - f_0 pour un signal qui malencontreusement serait à une fréquence f différente de f_0 , soit les produits de convolution de signaux normalisés à chacune de ces fréquences avec le signal à la fréquence f_0 .

La cadence d'échantillonnage est telle qu'il y a 4 échantillons par période du signal à la fréquence connue ($N_0=4$), les fonctions de transfert pour différents nombres de périodes échantillonnées ($K_0=1, 2, 3, 4, 5$) sont montrées par la figure III.6 ci-dessous.

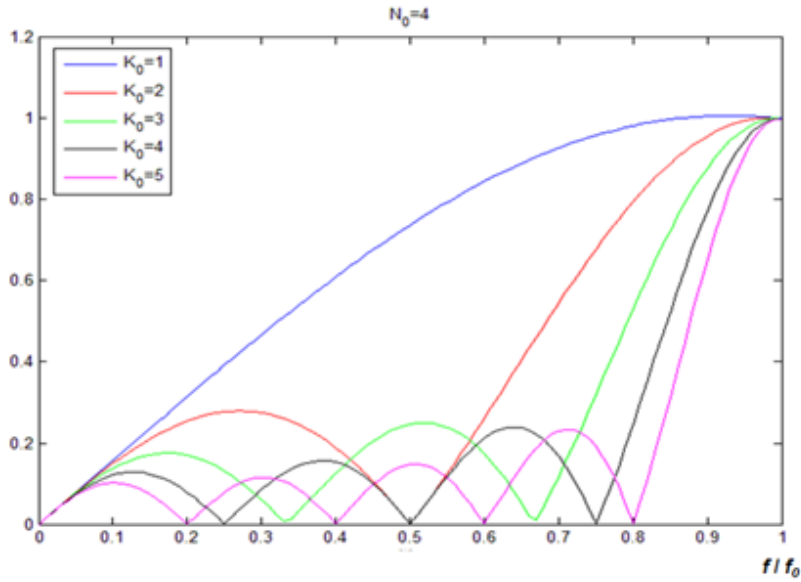


Figure III.6 Fonction de transfert du filtre adapté en sinus $N_0=4$ (moyennée sur différentes phases)

Les calculs ont aussi été faits avec 8 échantillons par période du signal à la fréquence connue ($N_0=8$), et les résultats obtenus sont donnés par la figure III.7 :

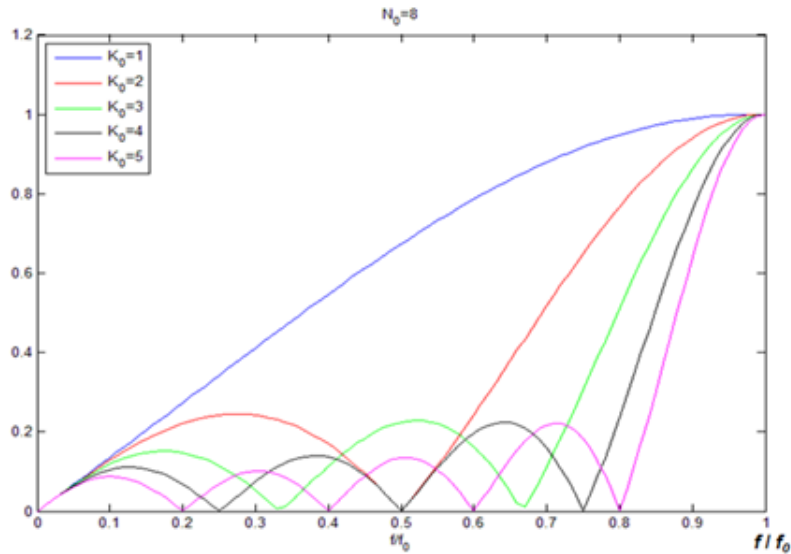


Figure III.7 Fonction de transfert du filtre adapté en sinus $N_0=8$ (moyennée sur différentes phases)

Les deux cadences d'acquisition, 4 échantillons/période et 8 échantillons/période donnent des courbes de fonction de transfert très similaires, les lobes secondaires s'annulant évidemment pour les mêmes fréquences puisqu'ils correspondent aux zéros de la TF du support du signal modulé, de durée $K_0 T$.

Les lois de fonction de transfert obtenues sur les signaux échantillonnés après intégration diffèrent de celles obtenues sur des signaux échantillonnés sur un signal sinusoïdal par le fait qu'elles présentent une remontée à basses fréquences ($f < f_0$). Ceci résulte de l'intégration du signal sinusoïdal initial à chaque

trame de la caméra, qui introduit des harmoniques dans le cas des fréquences faibles, peuvent se situer dans la bande passante de la réponse percussionnelle du filtre.

On note aussi que les différents lobes obtenus en fonction de la phase du signal sont de plus en plus proches les uns des autres au fur et à mesure où on augmente le nombre de périodes échantillonnées ($K_0 = 1, 2, 3, 4, 5$). Ça veut dire que le filtre devient plus sélectif lorsque K_0 augmente. En plus, les lobes secondaires décroissent lorsque la fréquence tend vers 0.

b. Filtre adapté en créneau

Lorsque le filtrage adapté en créneau est appliqué, nous avons noté $(P_CLA_{Réelle})_{N_0=4}$ et $(P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=4}$ respectivement les valeurs des parties réelle et imaginaire pour l'échantillonnage à 4 fois la fréquence de modulation ($N_0=4$) :

$$(P_CLA_{Réelle})_{N_0=4,f} = [(x_1)_f * 1 + (x_2)_f * 1 + (x_3)_f * (-1) + (x_4)_f * (-1)] * K_0 \quad (3.40)$$

$$(P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=4,f} = [(x_1)_f * 1 + (x_2)_f * (-1) + (x_3)_f * (-1) + (x_4)_f * 1] * K_0 \quad (3.41)$$

Et nous avons noté $(P_CLA_{Réelle})_{N_0=8}$ et $(P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=8}$ respectivement les valeurs des parties réelle et imaginaire pour l'échantillonnage à 8 fois la fréquence de modulation ($N_0=8$) :

$$(P_CLA_{Réelle})_{N_0=8,f} = [(x_1)_f * 1 + (x_2)_f * 1 + (x_3)_f * 1 + (x_4)_f * 1 + (x_5)_f * (-1) + (x_6)_f * (-1) + (x_7)_f * (-1) + (x_8)_f * (-1)] * K_0 \quad (3.42)$$

$$(P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=8,f} = [(x_1)_f * 1 + (x_2)_f * 1 + (x_3)_f * (-1) + (x_4)_f * (-1) + (x_5)_f * (-1) + (x_6)_f * (-1) + (x_7)_f * 1 + (x_8)_f * 1] * K_0 \quad (3.43)$$

Les modules des produits de convolution de ces échantillons, à la fréquence f , sont donnés respectivement par les équations ci-dessous :

$$|X[K_0, N_0 = 4]_{f_Créneau}| = \frac{\sqrt{(P_CLA_{Réelle})_{N_0=4,f}^2 + (P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=4,f}^2}}{N_0 K_0} \quad (3.44)$$

$$|X[K_0, N_0 = 8]_{f_Créneau}| = \frac{\sqrt{(P_CLA_{Réelle})_{N_0=8,f}^2 + (P_CLA_{Imaginaire})_{N_0=8,f}^2}}{N_0 K_0} \quad (3.45)$$

Pareillement, nous avons tracé les fonctions de transfert pour différentes valeurs de K_0 et N_0 , dans la fenêtre spectrale $0 - f_0$, comme les montrent les figures III.8 et III.9.

La cadence d'échantillonnage est telle qu'il y a 4 échantillons par période ($N_0=4$: la cadence d'image est 4 fois la fréquence de modulation des feux à Leds), supposons que les signaux sont idéaux et que les amplitudes de modulation de tous les signaux sont les mêmes, les résultats de convolution normalisés à chaque fréquence, $X[K_0, N_0]_{f_Créneau} / (X[K_0, N_0]_{f_Créneau})_{f_0}$, en fonction de nombres de périodes échantillonnées ($K_0=1, 2, 3, 4, 5$) sont montrés sur la figure III.8 ci-dessous :

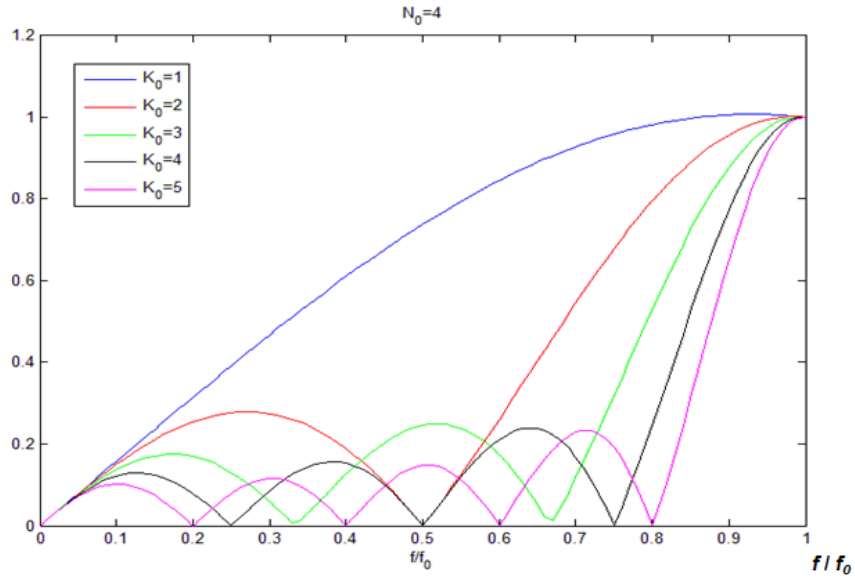


Figure III.8 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau $N_0=4$ (moyennée sur différentes phases)

Les calculs ont aussi été faits avec 8 échantillons par période du signal à la fréquence connue ($N_0=8$), et les résultats sont donnés par la figure III.9:

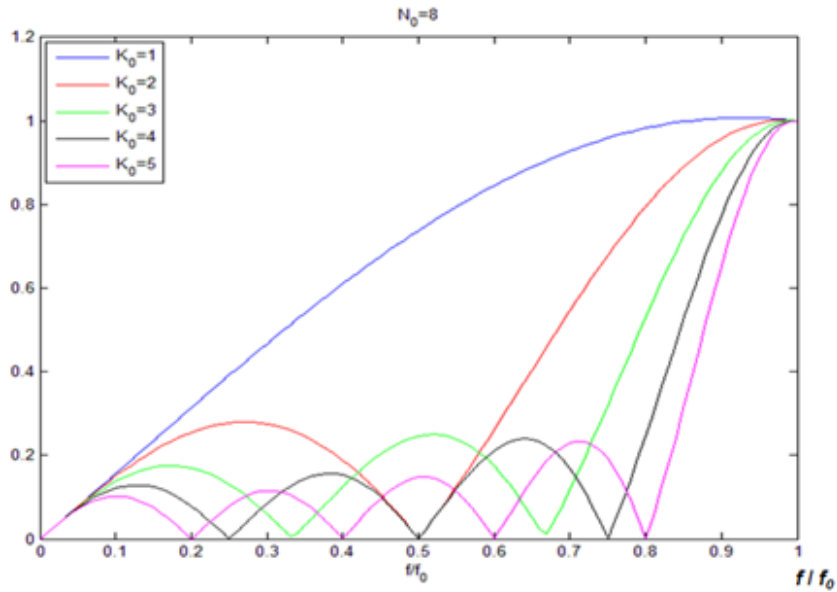


Figure III.9 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau $N_0=8$ (moyennée sur différentes phases)

On constate que ces fonctions de transfert des filtres adaptés en créneau sont très similaires pour les 2 cadences d'échantillonnage choisies ($N_0 = 4$ ou 8). Comme précédemment, pour chaque cadence d'image, l'atténuation par filtrage des signaux à des fréquences autres que celle du signal recherché, augmente lorsque la valeur de K_0 augmente. Et, pour la même raison que précédemment, les zéros des fonctions de transfert sont situés aux mêmes fréquences pour la même valeur de K_0 .

III.2.4 Choix des principaux paramètres du filtrage numérique

Parmi les paramètres d'influence sur la performance des filtres analysés, les plus importants sont les suivants : le nombre de périodes analysées du signal recherché, la forme du signal (sinusoïdal ou créneau), et le nombre d'échantillons par période. On liste ci-dessous les choix faits dans la thèse :

- Nombre de périodes analysées du signal recherché : K_0

Le temps de mesure de 10 ms et la fréquence de modulation de 500 Hz des feux à Leds imposent $K_0 = 5$ pour notre système. Les courbes de fonction de filtrage démontrent que la largeur de la bande passante du filtre est d'autant plus étroite que le nombre de périodes échantillonnées du signal d'un feu (K_0) est élevé. La courbe de fonction de transfert pour $K_0 = 5$ montre un coefficient d'atténuation de 10 pour des fréquences inférieures à 250 Hz.

- Forme de signal et du traitement : *créneau*

Dans le cadre de la thèse, nous nous sommes limités à une modulation en créneau des feux à Leds, qui est la méthode la plus envisagée dans l'avenir pour les communs de ces sources, et au filtrage correspondant, en créneau. L'étude précédente a montré qu'une modulation sinusoïdale n'apporterait pas d'avantage significatif au niveau du signal filtré.

En plus, la modulation en créneau permettra de changer le rapport cyclique, pour pouvoir reconnaître différents types d'objets, ce qui sera apprécié par l'ensemble des applications ADAS.

Un autre point est que, les équipements en productions automobiles seront équipés de processeurs FPGAs, ce qui conduit à favoriser le filtre en créneau, qui est facile à mettre en œuvre et donc plus rapide que celui du sinusoïdal, parce que il s'agit des calculs binaires.

- Nombre d'échantillons par période du signal recherché : N_0

D'autre part, nous avons choisi $N_0 = 8$, soit 8 échantillons par période des signaux issus des feux à Leds modulés, pour deux raisons principales :

- Les échantillons ressemblent plus au signal original, ce qui est un avantage surtout pour le cas où ces échantillons sont influencés par le bruit du fond et le bruit de la caméra pendant l'enregistrement. À l'issue des expérimentations, nous avons remarqué que 4 échantillons par période du signal recherché ne sont pas suffisants pour lutter par le traitement de signal contre les fluctuations aléatoires du bruit.
- Avec 8 phases différentes, on peut envisager la possibilité de 7 modulations à la même fréquence, avec des rapports cycliques différents, ce qui permet d'introduire dans le système une capacité de reconnaître 7 types de cibles différents (véhicules légers, camions, vélos, motos, piétons, ...).

III.3 Étude comparative de 3 filtres numériques

Y comprenant le filtre adapté en créneau présenté dans le paragraphe ci-dessus, appelons « classique », nous avons étudié 3 différents filtres numériques en créneau :

- Filtre adapté en créneau « classique »
- Filtre adapté en créneau « 4-phases »
- Filtre « multicanaux » sur la dérivée du signal brut

Pour chaque de ces filtres, nous avons calculé la fonction de transfert et la loi de densité de probabilité du signal utile (à la fréquence recherchée) en sortie de filtre, pour des signaux « parfaits ». Il faut noter que, pour obtenir les résultats par simulation, nous avons utilisé des signaux théoriques idéaux, sans bruits et sans erreurs de l'enregistrement, et que ces signaux possèdent la même amplitude.

III.3.1 Filtre 1 : filtre adapté en créneau « classique »

Le principe de ce 1^{er} filtre est celui qui a été décrit dans les paragraphes III.2.1 et III.2.2, plus précisément par les deux réponses impulsionnelles ci-dessous, dont chacune est disposée de 40 points :

$$F_CLA_{Réelle} = [1\ 1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ ...1\ 1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1] \quad (3.46)$$

$$F_CLA_{Imaginaire} = [1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ ...1\ 1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1] \quad (3.47)$$

Soient $[x_1\ x_2\ x_3\ ... x_{40}]$ les 40 échantillons bruts d'un signal obtenus par la caméra pendant la durée d'analyse. Les produits de convolution avec les parties réelle et imaginaire, $P_CLA_{Réelle}$ et $P_CLA_{Imaginaire}$, sont donnés respectivement par les expressions ci-dessous :

$$P_CLA_{Réelle} = x_1*1 + x_2*1 + x_3*1 + x_4*1 + x_5*(-1) + x_6*(-1) + x_7*(-1) + x_8*(-1) + ... + x_{40}*(-1) \quad (3.48)$$

$$P_CLA_{Imaginaire} = x_1*1 + x_2*1 + x_3*(-1) + x_4*(-1) + x_5*(-1) + x_6*(-1) + x_7*1 + x_8*1 + ... + x_{40}*1 \quad (3.49)$$

La sortie du filtrage est la racine carrée de la somme des carrés des parties réelle et imaginaire divisée par le nombre de points échantillonnés :

$$S_{CLA} = \frac{\sqrt{P_CLA_{Réelle}^2 + P_CLA_{Imaginaire}^2}}{40} \quad (3.50)$$

D'où la fonction de transfert est montrée sur la figure III.10 (conditions de signaux théoriques idéaux de la même amplitude).

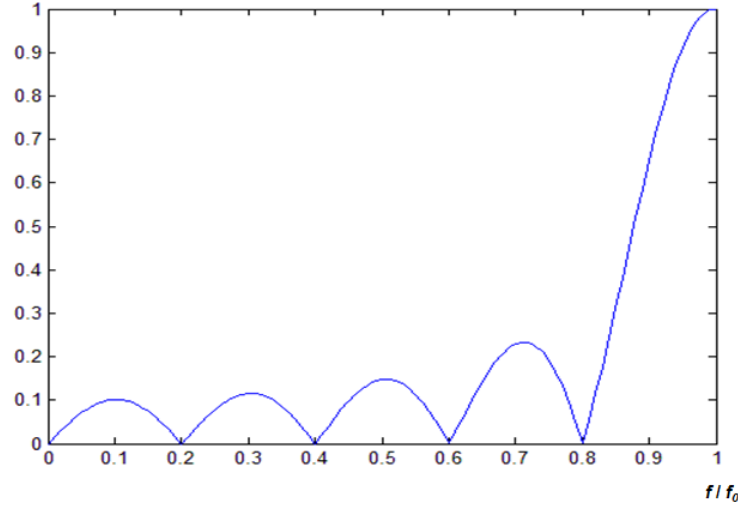


Figure III.10 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau « classique » pour $N_0 = 8$, $K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases)

III.3.2 Filtre 2 : filtre adapté en créneau « 4-phases »

Nous avons étudié une seconde possibilité de filtrage en créneau, qui comporte 4 phases différentes. Ces 4 phases sont composées de 40 points de pondération, soit de 1, soit de -1, déphasées de $\pi/4$ l'une de l'autre, comme le décrivent les relations ci-dessous :

$$F_{_4-PH_{Phase1}} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \dots 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1] \quad (3.51)$$

$$F_{_4-PH_{Phase2}} = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \dots 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1] \quad (3.52)$$

$$F_{_4-PH_{Phase3}} = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \dots 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1] \quad (3.53)$$

$$F_{_4-PH_{Phase4}} = [1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \dots 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (3.54)$$

Chaque phase du filtre s'applique sur les échantillons correspondants, avec la pondération correspondante. Pour les 40 échantillons bruts d'un signal, $[x_1 \ x_2 \ x_3 \dots x_{40}]$, obtenus du même pixel de la caméra pendant la durée d'analyse, les produits de convolution de chaque phase, $P_{_4-PH_{Phase1}}$, $P_{_4-PH_{Phase2}}$, $P_{_4-PH_{Phase3}}$, et $P_{_4-PH_{Phase4}}$, sont respectivement données par les équations suivantes :

$$P_{_4-PH_{Phase1}} = x_1 * 1 + x_2 * 1 + x_3 * 1 + x_4 * 1 + x_5 * (-1) + x_6 * (-1) + x_7 * (-1) + x_8 * (-1) + \dots + x_{40} * (-1) \quad (3.55)$$

$$P_{_4-PH_{Phase2}} = x_1 * 1 + x_2 * 1 + x_3 * 1 + x_4 * (-1) + x_5 * (-1) + x_6 * (-1) + x_7 * (-1) + x_8 * 1 + \dots + x_{40} * 1 \quad (3.56)$$

$$P_{_4-PH_{Phase3}} = x_1 * 1 + x_2 * 1 + x_3 * (-1) + x_4 * (-1) + x_5 * (-1) + x_6 * (-1) + x_7 * 1 + x_8 * 1 + \dots + x_{40} * 1 \quad (3.57)$$

$$P_{_4-PH_{Phase4}} = x_1 * 1 + x_2 * (-1) + x_3 * (-1) + x_4 * (-1) + x_5 * (-1) + x_6 * 1 + x_7 * 1 + x_8 * 1 + \dots + x_{40} * 1 \quad (3.58)$$

Nous prenons comme sortie du filtrage la racine carrée de la somme des 4 convolutions divisée par le nombre total d'échantillonnages :

$$S_{4-PH} = \frac{\sqrt{P_{-4PH_{Phase1}}^2 + P_{-4PH_{Phase2}}^2 + P_{-4PH_{Phase3}}^2 + P_{-4PH_{Phase4}}^2}}{40} \quad (3.59)$$

La fonction de transfert du filtrage adapté en créneau « 4-phases », sur signaux sinusoïdaux intégrés par la caméra (voir expression éq. 3.33) théorique, idéaux, et de même amplitude, est montrée sur la figure III.11 ci-dessous.

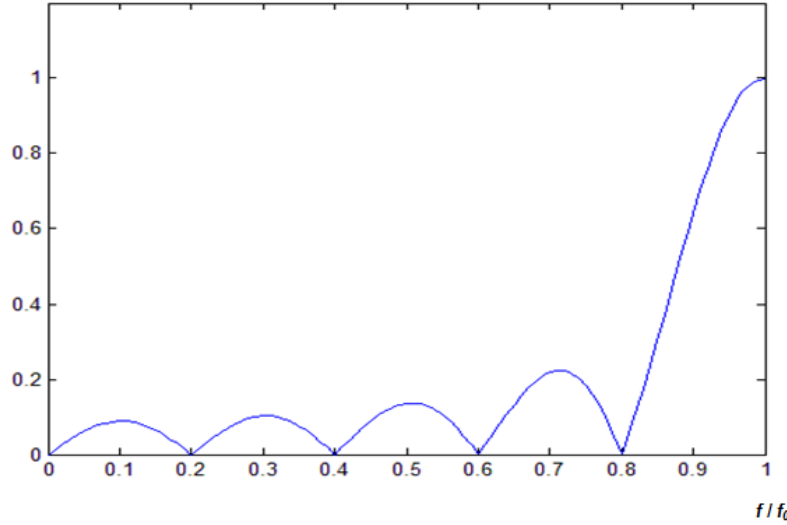


Figure III.11 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau « 4-phases » pour $N_0 = 8, K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases)

III.3.3 Filtre 3 : filtre « multicanaux » sur la dérivée du signal brut

Nous avons aussi simulé les propriétés d'un 3^{ème} filtre numérique destiné lui aussi à filtrer des signaux modulés en créneau à la fréquence de 500 Hz, portant sur la dérivée du signal. En effet, si un signal est modulé à la fréquence recherchée, pendant la durée d'analyse, soit 5 périodes de ce signal recherché, il doit présenter 5 fronts montants et 5 fronts descendants, apparaissant périodiquement.

Comme la caméra échantillonne le signal recherché 8 fois par période, il est possible de décaler la loi de filtrage, pour l'adapter au mieux à la phase, inconnue, du signal recherché. La réponse impulsionnelle de chacune des 8 phases de ce filtre est composée de 40 échantillons à la recherche de ces fronts de montée et de descente, c'est-à-dire de pondération +1 et -1 séparées de 3 zéros, données par les 8 expressions ci-dessous :

$$F_MultiCanaux_{Phase1} = [1000-1000...1000-1000] \quad (3.60)$$

$$F_MultiCanaux_{Phase2} = [01000-100...01000-100] \quad (3.61)$$

$$F_MultiCanaux_{Phase3} = [001000-10...001000-10] \quad (3.62)$$

$$F_MultiCanaux_{Phase4} = [0001000-1...0001000-1] \quad (3.63)$$

$$F_MultiCanaux_{Phase5} = [-10001000...-10001000] \quad (3.64)$$

$$F_MultiCanaux_{phase6} = [0-1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ \dots\ 0-1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0] \quad (3.65)$$

$$F_MultiCanaux_{phase7} = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0-1\ 0\ \dots\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0-1\ 0] \quad (3.66)$$

$$F_MultiCanaux_{phase8} = [0\ 0\ 0-1\ 0\ 0\ 0\ 1\ \dots\ 0\ 0\ 0-1\ 0\ 0\ 0\ 1] \quad (3.67)$$

Pour être en mesure de prendre en compte les 5 fronts montants et les 5 fronts descendants du signal en créneau recherché, il est nécessaire de prélever 42 échantillons bruts du signal d'un même pixel de la caméra, $[x_1\ x_2\ x_3\ \dots\ x_{40}\ x_{41}\ x_{42}]$. Nous prenons comme définition des fronts de montée et de descente de cette séquence d'échantillons, $[x'_1\ x'_2\ x'_3\ \dots\ x'_{40}]$, comme le montre la figure III.12 :

$$x'_n = x_{n+2} - x_n \quad n = 1, 2, \dots, 40 \quad (3.68)$$

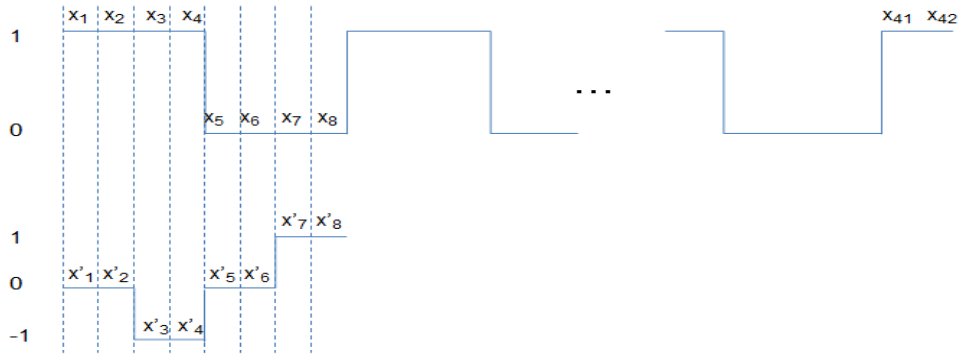


Figure III.12 Calcul des dérivées

La séparation de 2 points entre 2 échantillons bruts de la séquence est destinée à sécuriser la détection des fronts, vu le rapport entre la fréquence de modulation et la fréquence d'échantillonnage.

Cela donne 8 séquences de convolutions des dérivées, correspondant aux 8 phases :

$$P_MultiCanaux_{phase1} = x'_1 * 1 + x'_2 * 0 + x'_3 * 0 + x'_4 * 0 + x'_5 * (-1) + x'_6 * 0 + x'_7 * 0 + x'_8 * 0 + \dots + x'_{40} * 0 \quad (3.69)$$

$$P_MultiCanaux_{phase2} = x'_1 * 0 + x'_2 * 1 + x'_3 * 0 + x'_4 * 0 + x'_5 * 0 + x'_6 * (-1) + x'_7 * 0 + x'_8 * 0 + \dots + x'_{40} * 0 \quad (3.70)$$

$$P_MultiCanaux_{phase3} = x'_1 * 0 + x'_2 * 0 + x'_3 * 1 + x'_4 * 0 + x'_5 * 0 + x'_6 * 0 + x'_7 * (-1) + x'_8 * 0 + \dots + x'_{40} * 0 \quad (3.71)$$

$$P_MultiCanaux_{phase4} = x'_1 * 0 + x'_2 * 0 + x'_3 * 0 + x'_4 * 1 + x'_5 * 0 + x'_6 * 0 + x'_7 * 0 + x'_8 * (-1) + \dots + x'_{40} * (-1) \quad (3.72)$$

$$P_MultiCanaux_{phase5} = x'_1 * (-1) + x'_2 * 0 + x'_3 * 0 + x'_4 * 0 + x'_5 * 1 + x'_6 * 0 + x'_7 * 0 + x'_8 * 0 + \dots + x'_{40} * 0 \quad (3.73)$$

$$P_MultiCanaux_{phase6} = x'_1 * 0 + x'_2 * (-1) + x'_3 * 0 + x'_4 * 0 + x'_5 * 0 + x'_6 * 1 + x'_7 * 0 + x'_8 * 0 + \dots + x'_{40} * 0 \quad (3.74)$$

$$P_MultiCanaux_{phase7} = x'_1 * 0 + x'_2 * 0 + x'_3 * (-1) + x'_4 * 0 + x'_5 * 0 + x'_6 * 0 + x'_7 * 1 + x'_8 * 0 + \dots + x'_{40} * 0 \quad (3.75)$$

$$P_MultiCanaux_{phase8} = x'_1 * 0 + x'_2 * 0 + x'_3 * 0 + x'_4 * (-1) + x'_5 * 0 + x'_6 * 0 + x'_7 * 0 + x'_8 * 1 + \dots + x'_{40} * 1 \quad (3.76)$$

La pente moyenne des fronts (valeur absolue) est donnée, pour chaque phase par la sortie ci-dessous :

$$(S_{MultiCanal})_{Phase1} = P_MultiCanalx_{Phase1} / 10 \quad (3.77)$$

$$(S_{MultiCanal})_{Phase2} = P_MultiCanalx_{Phase2} / 10 \quad (3.78)$$

...

$$(S_{MultiCanal})_{Phase3} = P_MultiCanalx_{Phase3} / 10 \quad (3.79)$$

La sortie utile du filtre est la valeur maximale de toutes ces 8 produits :

$$S_{MultiCanal} = \max[(S_{MultiCanal})_{Phase1}, (S_{MultiCanal})_{Phase2}, (S_{MultiCanal})_{Phase3}, \dots, (S_{MultiCanal})_{Phase8}] \quad (3.80)$$

La fonction de transfert du filtrage « multicanal », sur signaux sinusoïdaux intégrés par la caméra théoriques et idéaux de même amplitude, est montrée sur la figure III.13 ci-dessous (supposons que les amplitudes de modulation sont les mêmes pour tous les signaux).

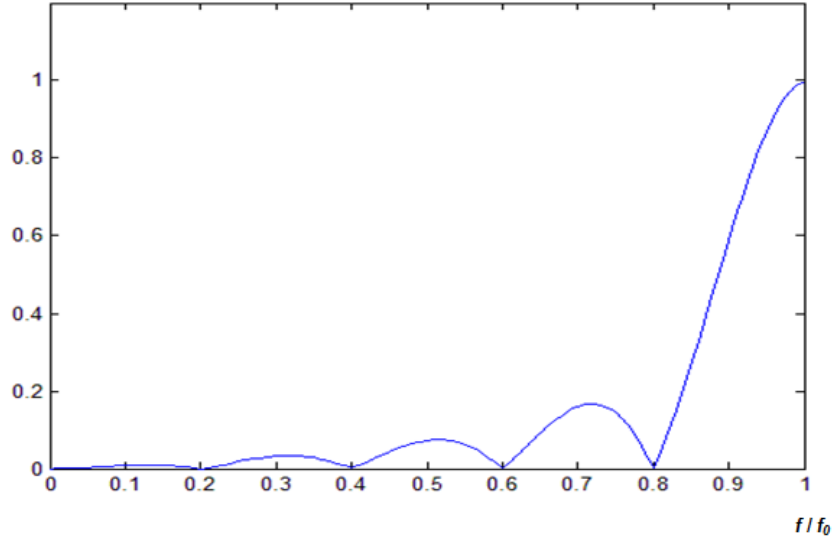


Figure III.13 Fonction de transfert du filtre « multicanal » sur la dérivée du signal brut pour $N_0 = 8$, $K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases)

On voit que les lobes secondaires à basses fréquences sont plus réduits que ceux des deux autres filtres. Ceci est un effet favorable de la dérivation du signal, qui réduit les basses fréquences où sont attendus les parasites les plus ennuyeux.

III.3.4 Signal de sortie des filtres sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0

Le signal de sortie des filtres, ou le produit de convolution, est proportionnel à l'amplitude du signal d'entrée. Pour caractériser ses valeurs, nous avons calculé l'amplitude du signal d'entrée et puis les densités de probabilité du signal de sortie pour chaque filtre, qui dépend du déphasage entre le signal et la réponse impulsionnelle du filtre.

- Amplitude du signal d'entrée utile

Comme le montre la figure III.14, l'amplitude moyenne de modulation du signal d'un feu à Leds modulé en sortie d'un pixel de la caméra décroît en fonction de distance. Cette courbe a été calculée à partir de la figure 20 du chapitre 2, avec des paramètres suivants : l'intensité du feu = 1000 cd, sensibilité de la caméra = 400 DN/lux/s @ 500 nm. Ceci nous donne une modulation d'environ 12 DN à 50 mètres et de 4 DN à 100 mètres. En dessous de 40 m environ, le signal n'augmente plus parce que la lumière issue de la source se répartit sur plusieurs pixels.

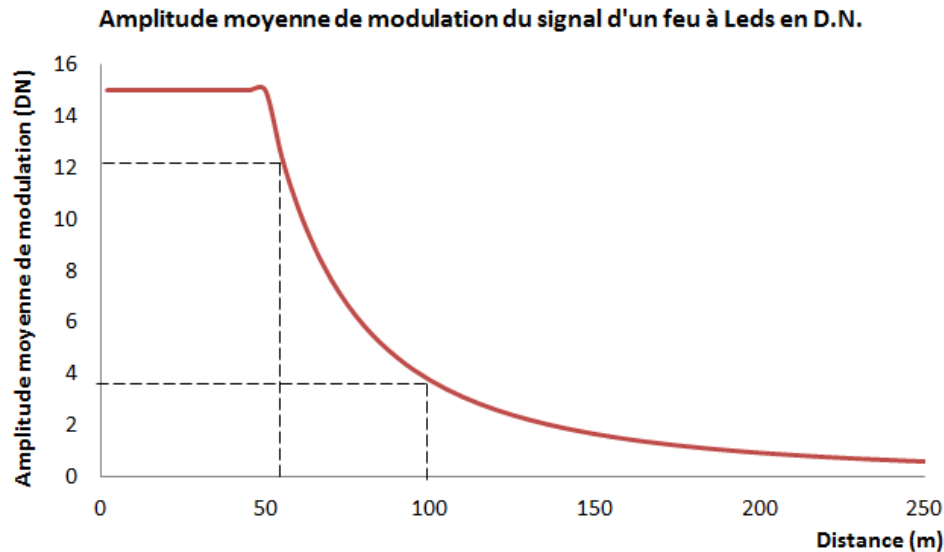


Figure III.14 Amplitude moyenne de modulation du signal d'un feu à Leds modulé (unité : D.N.)

Pour un signal d'entrée utile avec une amplitude donnée, la valeur maximale du signal de sortie ou la convolution du filtre se produit lorsque le signal est en phase de la caméra.

Un simple calcul montre que :

- Pour les filtres « classique » et « multicanaux », la valeur maximale est égale à l'amplitude de modulation du signal d'entrée utile.
- Cette valeur est 1,22 fois son amplitude de modulation pour le filtre « 4-phases ».

Pour calculer les valeurs minimales, il est indispensable de calculer les densités de probabilité du signal de sortie, en prenant en compte différents déphasages.

- Densité de probabilité du signal de sortie du filtre (le produit de convolution) sur signal d'entrée utile à la fréquence f_0

Comme la valeur du signal de sortie dépend du déphasage entre le signal d'entrée modulé en créneau à la fréquence f_0 idéal et la caméra. Ainsi, pour calculer les densités de probabilité du signal de sortie, nous avons effectué des simulations pour chaque filtre sur signal d'entrée utile, avec une loi uniforme en déphasage, entre 0 et 2π , avec un pas de 10^{-4} rad.

Les résultats de calcul sont montrés sur les figures III.15, et III.16, respectivement pour les filtres « classique » et « 4-phases ». Le signal de sortie calculé est normalisé par rapport à la valeur maximale du produit de convolution, ce qui correspond à une fenêtre 0-1 sur les courbes, où nous avons comptabilisé les signaux de sortie par intervalles de 0,01. Les courbes de densité de probabilité sont normalisées pour que l'intégrale des lois de densité de probabilité soit égale à 1.

En ce qui concerne le filtre « classique », on peut constater que les différents déphasages produisent des valeurs intermédiaires entre 0,7 et 1, comme on le voit le sur la figure III.15. L'efficacité du filtre sur le signal recherché est dégradée lorsque signal d'entrée et filtrage ne sont pas en phase.

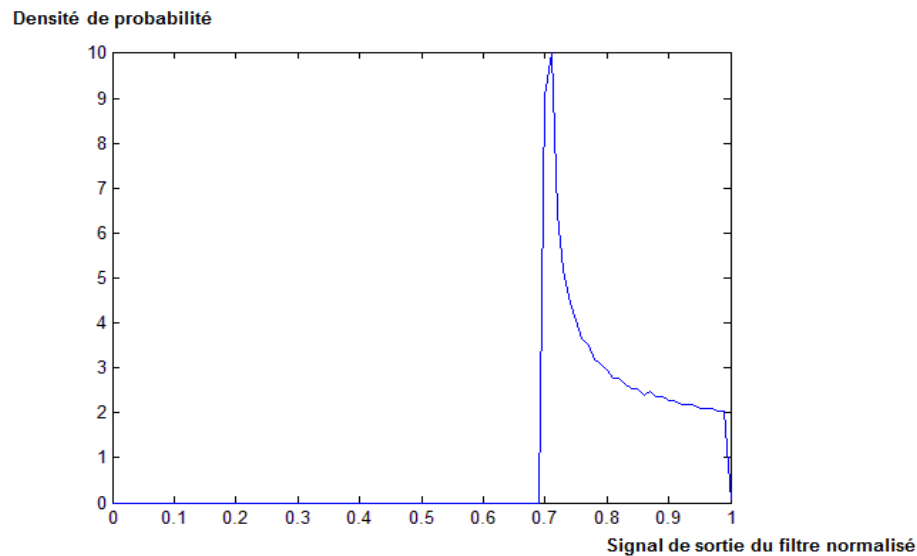


Figure III.15 Densité de probabilité du signal de sortie du filtre adapté en créneau « classique » (normalisée entre 0 et 1) sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0

Le filtre « 4-phases » a réduit cette influence refasse du déphasage, en apportant une amélioration non négligeable par rapport au filtre « classique » puisque le signal de sortie est toujours supérieur à 0,91.

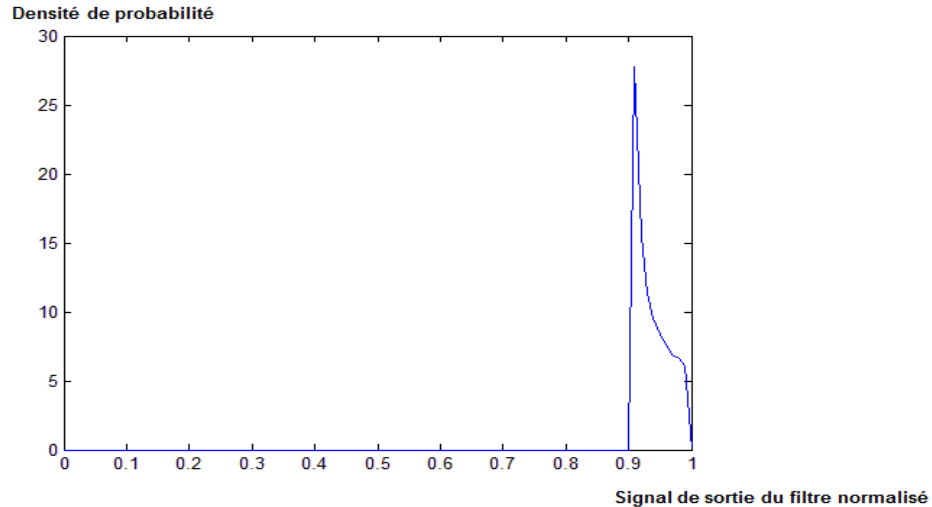


Figure III.16 Densité de probabilité du signal de sortie du filtre adapté en créneau « 4-phases » (normalisée entre 0 et 1) sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0

En ce qui concerne le filtre « multicanaux », un calcul simple montre que tous les signaux de sortie ont la même valeur, qui est égale à l'amplitude de la modulation du signal d'entrée. Pour ce filtre, un critère du seuillage pourrait être simplement : si un signal en sortie de filtre est inférieur à l'amplitude de modulation du signal d'entrée utile, on pourra le considérer comme un signal de fond. Par contre, ce filtre demande plus de capacité de calcul que les autres, car il comporte 8 phases différentes (réponse impulsionnelle) et les calculs correspondants pour trouver les maximaux des valeurs intermédiaires.

Cependant, la durée d'échantillonnage dépasse le temps de résidence minimal. Cela pourrait poser des problèmes dans des scénarii extrêmes où le temps de résidence est une contrainte majeure.

III.3.5 Signal de sortie des filtres sur signal d'entrée du fond

Selon les calculs que nous avons faits dans le paragraphe précédent, les équations (3.50), (3.59) et (3.80) montrent que, sans normalisation, le signal de sortie de chaque filtre, pour un signal d'entrée modulé issu d'un feu à Leds, est proportionnel à l'amplitude moyenne de la modulation. Ainsi, pour une faible modulation d'amplitude égale à 1 DN, ce qui est le minimum possible pour la caméra, le signal en sortie de filtre est respectivement 0,71, 0,91 et 1 pour chacun des trois filtres : « classique », « 4-phases » et « multicanaux ». Si le feu se rapproche, le signal en sortie de filtre s'accroît jusqu'à atteindre les valeurs maximales respectives de 255, 311,1 et 255 pour chacun des filtres.

En ce qui concerne le signal en sortie de filtre sur le fond, sa valeur minimale est 0, dans le cas où le fond est stable pendant le temps d'analyse (uniforme), et comme nous allons le montrer sur l'illustration qui suit, sa valeur maximale dépasse les maxima trouvés pour le signal utile dans le cas d'une très faible modulation, pour les scénarii où le fond varie avec une très forte amplitude, par exemple au passage d'un bord d'objet clair (peintures routières, nuages, etc.), ou soleil derrière les arbres. Nous avons pris en particulier le cas du passage d'un bord « sombre/clair », de très forte amplitude, conditions routières très contraignantes, comme le montre la figure III.17 ci-dessous, où les signaux sont compris entre 1 DN et 255 DN : le signal 1 représente le passage du noir au clair en continu pendant toute la durée

d'analyse ; le signal 2 représente le même passage, plus rapide, pendant une durée plus courte que le temps d'analyse.

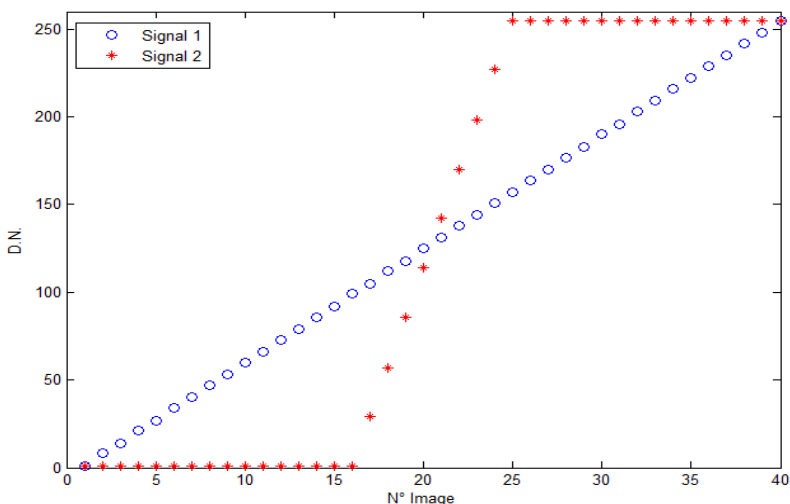


Figure III.17 Signaux bruts artificiels d'un passage sombre/clair « symétrique »

En sortie des trois filtres, « classique », « 4-phases » et « multicanaux », les signaux obtenus sont donnés dans le tableau III-1 ci-dessous.

Tableau III-1 Niveaux des signaux de sortie des filtres sur signaux d'entrée bruts de la figure 16

Signal d'entrée	Filtre « classique »	Filtre « 4-phases »	Filtre « multicanaux »
Signal 1	13	15,9	1,3
Signal 2	11,3	13,8	2,9

On voit dans ce tableau que, si le signal du pixel présente une variation rapide et importante sur le fond, le signal en sortie de filtre peut être supérieur au signal de sortie issu d'un feu à Leds éloigné. De plus, lorsque le signal d'entrée sombre/clair n'est pas symétrique par rapport au point central de l'échantillonnage, le signal de sortie du filtre pourra être encore plus important parce que cette asymétrie ne peut pas être éliminée par le filtrage des -1 et +1 périodiques qui est symétrique lui-même.

Ainsi, en l'absence de normalisation, les courbes de densité de probabilité de ce type de signal de fond et de signaux de feux à Leds se croisent l'une de l'autre. Dans ce cas, pour réduire le nombre de fausses alarmes, il est nécessaire d'augmenter la valeur du seuil, ce qui réduit la portée du système. Par exemple, comme nous l'avons expliqué, si on veut éliminer les fausses détections de très fortes variations du fond, on ne pourra pas détecter les feux à Leds au-delà de 50 mètres.

Cependant, il faut noter que les courbes de densité de probabilité sont différentes dans différentes conditions d'édairage de la route. En conséquence, un seuil efficace pour un scénario est probablement très mauvais pour d'autres scénarii. Ainsi, le choix du seuil est difficile sans normalisation des signaux d'entrée.

III.4 Optimisation de performance des filtres numériques

On a vu que ces trois filtres ne sont pas suffisamment performants pour détecter les signaux utiles, même dans des conditions favorables. Dans les conditions réelles de circulation, les conditions météorologiques (pluie, brume, brouillard...), et les déplacements des véhicules peuvent entraîner des fluctuations importantes de signal et des erreurs au niveau de la réception. Dans ce cas, la densité de probabilité des signaux en sortie du filtrage diffère de la loi théorique établie ci-dessus. Pour cela, nous proposons 2 points d'amélioration pour ces filtres, destinées à réduire les fausses alarmes sans :

- Normalisation des signaux bruts
- Examen de l'amplitude de modulation des signaux bruts

III.4.1 Principe de la normalisation des signaux bruts

Le fait que chaque pixel de la caméra intègre le signal pendant la durée de l'image déforme la modulation en créneau du signal du feu à Leds, comme on l'a montré dans le paragraphe III.2.1.

Pour prendre en compte cet effet et le réduire, notre première approche est de remettre en forme le signal brut, en le normalisant suivant trois niveaux : 1, 0, et -1. Ce processus de normalisation des signaux bruts comporte les étapes suivantes :

- Dans le cas des 2 premiers filtres (filtre en créneau « classique » et filtre en créneau « 4-phases ») :

1) Recherche des valeurs extrémales

Soit une séquence d'échantillons bruts $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_{40}]$ issus du même pixel, dont les valeurs maximale, x_{Max} , et minimale, x_{Min} , sont :

$$x_{Max} = \max(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{40}) \quad (3.81)$$

$$x_{Min} = \min(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{40}) \quad (3.82)$$

Si le signal est constant, $x_{Max} = x_{Min}$.

2) Calcul de la valeur moyenne

La valeur moyenne de ces deux extrêmes, x_{Moy} , est donc :

$$x_{Moy} = (x_{Max} + x_{Min}) / 2 \quad (3.83)$$

3) Transformation de la séquence

Nous transformons ces 40 échantillons $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_{40}]$ par comparaison avec x_{Moy} suivant la logique ci-dessous, en une séquence de 40 échantillons $[xx_1, xx_2, xx_3, \dots, xx_{40}]$:

- Si $x_n > x_{Moy} \rightarrow$ alors $xx_n = 1$
- Si $x_n = x_{Moy} \rightarrow$ alors $xx_n = 0$
- Si $x_n < x_{Moy} \rightarrow$ alors $xx_n = -1$

- Dans le cas du 3° filtre « multicanaux », les 3 étapes de normalisation ci-dessus s'appliquent sur la séquence des 40 dérivées $[x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_{40}]$:

1) Recherche des valeurs extrémales

$$x'_{Max} = \max(x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_{40}) \quad (3.84)$$

$$x'_{Min} = \min(x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_{40}) \quad (3.85)$$

2) Calcul de la valeur moyenne

$$x'_{Moy} = (x'_{Max} + x'_{Min}) / 2 \quad (3.86)$$

3) Transformation de la séquence

- Si $x'_n > x'_{Moy} \rightarrow$ alors $xx_n = 1$
- Si $x'_n = x'_{Moy} \rightarrow$ alors $xx_n = 0$
- Si $x'_n < x'_{Moy} \rightarrow$ alors $xx_n = -1$

Nous montrons ci-après l'apport de cette normalisation quant à la différenciation entre signaux de sortie issus d'un feu à Leds faible et d'un fond très lumineux à forte variation, grâce à la comparaison de leurs courbes de densité de probabilité en sortie de traitement.

III.4.2 Signal de sortie du filtre sur signal brut normalisé

La normalisation est destinée à simplifier le problème du seuillage, par le fait que tous les signaux sont théoriquement réduits à trois niveaux -1, 0 et 1, ce qui permet de déterminer les bornes des lois de densité de probabilité des signaux de sortie de filtre.

Concernant les signaux d'entrée, la normalisation du signal d'entrée rend le signal de sortie moins dépendant du déphasage (entre signal Leds et caméra) par rapport au cas où le signal n'est pas normalisé, pour les deux filtres « classique » et « 4-phases ». Les simulations sur signaux issus des feux à Leds modulés en créneau à f_0 normalisés, déphasés par pas de 10^{-4} rad entre 0 et 2π radian, montrent que les signaux de sortie du filtre en créneau « classique » et du filtre en créneau « 4-phases » ne peuvent prendre que quelques valeurs discrètes. La figure III.18 montre qu'au lieu des valeurs continues entre 0,7 et 1 (figure III.15), le signal en sortie du filtre en créneau « classique » peut prendre 3 valeurs : 1 avec une probabilité de 50,2%, 0,7 avec une probabilité de 49,7%, et 0,79 avec une probabilité de 0,1%. Au lieu des valeurs continues entre 0,9 et 1 (figure III.16), la figure III.19 montre que le signal de sortie normalisé du filtre en créneau « 4-phases » peut prendre 2 valeurs : 1 avec une probabilité de 99,9%, et 0,91 avec une probabilité de 0,1%.

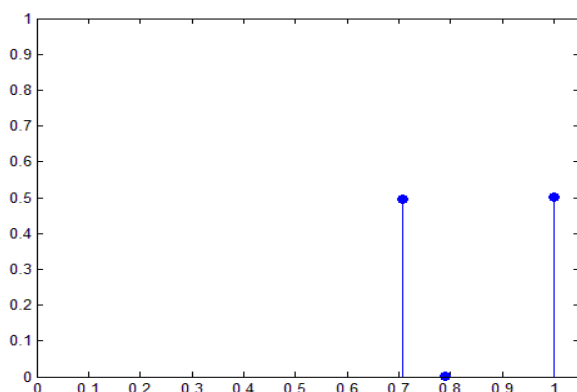


Figure III.18 Probabilité du signal de sortie du filtre par TFD en créneau « classique » sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0 normalisé

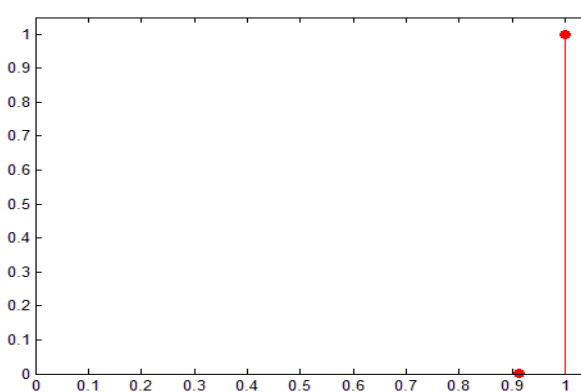


Figure III.19 Probabilité du signal de sortie du filtre par TFD en créneau « 4-phases » sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0 normalisé

Dans le cas du filtre « multicanaux », le signal de sortie ne peut prendre qu'une seule valeur : 2, quel que soit le déphasage.

En ce qui concerne le signal de fond, considérons le cas des deux signaux artificiels de la figure III-16. La normalisation à trois niveaux telle que décrite ci-dessus, c'est-à-dire en comparant avec chaque valeur du signal la moyenne conduit aux signaux normalisés présentés sur la figure III.20. On notera qu'après la normalisation, ces deux signaux deviennent identiques, chacun correspondant à un saut au milieu de l'échantillonnage, donc symétrique par rapport au centre.

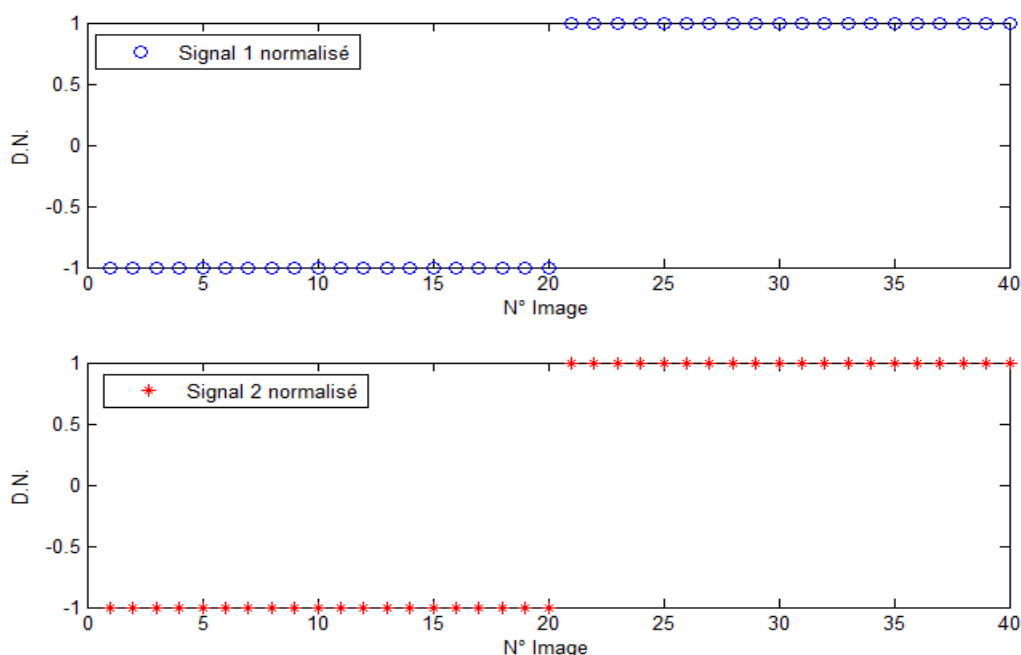


Figure III.20 Signaux normalisés des signaux bruts de la figure 16

Les réponses correspondantes des filtres sont montrées dans le tableau III-2.

Tableau III-2 Comparaison des réponses des filtres sur signaux d'entrée normalisés

Signal d'entrée	Filtre « classique »	Filtre « 4-phases »	Filtre « multicanaux »
Signal 1 normalisé	0,2	0,24	0,2
Signal 2 normalisé	0,2	0,24	0,2

Cela montre la forte atténuation de la réponse des filtres due à l'atténuation sur l'amplitude de modulation du signal. Un décalage du signal par rapport au centre de l'échantillonnage introduit un accroissement de la réponse, qui reste cependant beaucoup plus faible par rapport aux valeurs montrées dans le tableau III-2.

La normalisation permet de faire tendre la courbe de densité de probabilité du fond vers 0, donc de l'éloigner de la courbe de densité de probabilité de signal des feux à Leds recherchés. Ceci vient du fait qu'après normalisation, tous les signaux d'entrée utiles et fond ont la même amplitude, et donc la réponse au filtre ne dépend de cette amplitude, mais seulement de la fonction de transfert du filtre, montrée la figure III-21 ci-dessous (le résultat obtenu sur Matlab pour le filtre en créneau « classique » sur signaux normalisés, entre $f=0$ et $f=f_0$, avec les paramètres choisis $N_0 = 8$, $K_0 = 5$; cette simulation aboutit à des résultats quasiment identiques pour les 2 autres cas : TFD en créneau « 4-phases » et « multicanaux »).

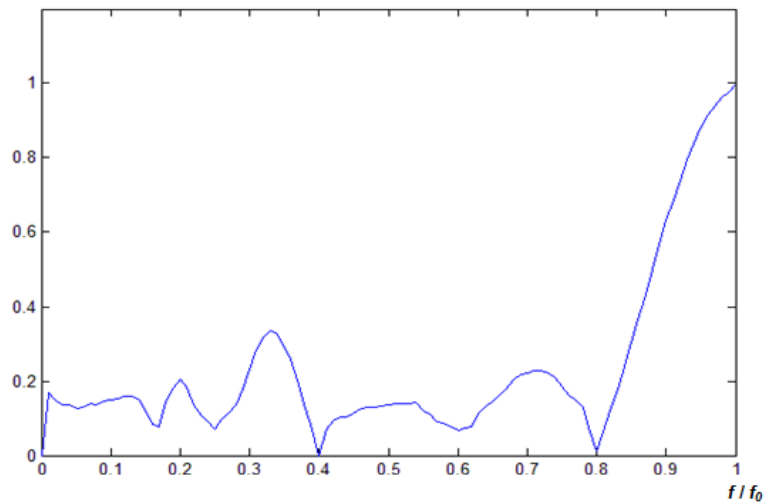


Figure III.21 Fonction de transfert du filtre en créneau « classique » pour $N_0 = 8$, $K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases)

On voit que la fonction de transfert est maximale pour la fréquence de modulation nominale f_0 et qu'elle se réduit lorsque la fréquence de modulation s'éloigne la fréquence recherchée (f_0 soit 500 Hz), et qu'elle devient 0 à $0,8f_0$, $0,4f_0$ et 0 (soit 400Hz, 200Hz, et 0Hz), avec une valeur moyenne de 0,15. On notera qu'il y a des remontées de transmission à $f_0/5$ et $f_0/3$ (100Hz et 166 Hz), à cause des harmoniques 3 et 5 produits par ces fréquences et situées dans la bande passante du filtre.

Par contre, dans le cas de la normalisation, des fluctuations aléatoires de fond peuvent devenir une source de fausse alarme, si par malchance ces fluctuations sont amplifiées et représentent une fréquence proche de la fréquence de modulation nominale (ce qui est peu probable) ou de ses sous-

harmoniques (ce qui est plus probable). Cependant, la réponse des filtres à ses signaux reste faible dans la plupart des scénarii possibles (voir la courbe de fonction de transfert). En plus, la normalisation ne prend pas en compte l'information liée à l'amplitude des signaux, ce qui est importante dans certains cas pour déduire le positionnement, et donc est un point d'inconvénient du système. Pour cela, nous proposons dans le paragraphe suivant un deuxième point de traitement, ce qui permet d'examiner l'amplitude de modulation des signaux bruts en parallèle du filtrage.

III.4.3 Examen de l'amplitude de modulation des signaux bruts

Pour réduire l'éventualité de tels signaux parasites de faibles amplitudes, nous proposons un traitement préliminaire basé sur vérification de l'amplitude de modulation des signaux d'entrée bruts, et élimination des faibles fluctuations par seuillage.

On définit l'amplitude de la modulation de chaque signal, S_{Mod} , comme la différence en DN entre les niveaux maximal et minimal des échantillons, comme le décrit l'équation suivante :

$$S_{Mod} = x_{Max} - x_{Min} \quad (3.87)$$

Sans normalisation, cette valeur peut varier entre 0 dans le cas du signal stable, et 255 pour une très forte modulation. Après la normalisation à trois niveaux, comme tous les signaux sont compris entre -1 et 1, leurs amplitudes de modulation sont de 2 DN, quel que soit le signal.

On a vu dans le paragraphe III.3 que, le signal de sortie des trois filtres proposés S_x (soit S_{CLA} , S_{4-PH} , et $S_{MultiCanaux}$ dans le cas de chacun des trois filtres) dépend de l'amplitude de modulation de ce signal brut sur signal d'entrée non normalisé. Nous rappelons que l'amplitude de modulation d'un signal brut, soit la différence entre les valeurs extrêmes, S_{Mod} , est la différence entre le niveau maximal et le niveau minimal du signal (voir l'équation 3.87), est indépendante du niveau moyen du signal. Dans le traitement de vérification proposé, nous comparons l'amplitude de la modulation, S_{Mod} , à la valeur du seuil de l'examen, S_{amp} , de sorte que, si S'_x est le signal de sortie après le seuillage sur l'amplitude, nous avons :

- Si $S_{amp} \geq S_{mod} \rightarrow$ alors $S'_x = 0$, soit le signal de sortie du traitement est égal à 0
- Si $S_{amp} < S_{mod} \rightarrow$ alors $S'_x = S_x$, soit le signal de sortie du traitement est maintenue et qu'il est le même que ce qui est donné par le filtre passe-bande

Ce seuillage sur l'amplitude de modulation peut être appliqué en même temps que le traitement de filtrage, que les signaux d'entrée bruts ou normalisés. Comme les sources principales de fausses détections ne sont pas les mêmes, les deux cas aboutissent à des valeurs de seuil différents. Dans les deux cas, le choix du seuil est dépendant des courbes de densité de probabilité des signaux de fond et des feux à Leds, comme nous l'avons présenté dans le paragraphe précédent.

En ce qui concerne le cas des signaux bruts normalisés, comme les signaux de fond à fortes variations ont été éliminés par le 1^{er} filtrage numérique, les fausses alarmes proviennent principalement des fonds fluctuants mais de faibles modulations. Dans ce cas, il faut définir le niveau de fluctuations maximal acceptable, et établir le seuil à cette valeur, qui aura aussi pour conséquence d'éliminer les signaux

utiles faibles provenant de feux à Leds lointains, donc de réduire la portée du système. Cependant, cette valeur de seuil, de quelques DN, est plus faible que l'amplitude de modulation des signaux issus des feux à Leds pour la portée recherchée.

En ce qui concerne le filtrage sur signaux bruts, le seuillage sur amplitude peut être intégré dans le filtrage lui-même, sachant que le signal de sortie de filtre est proportionnel à l'amplitude du signal d'entrée. Dans ce cas, pour rejeter les fausses alarmes générées par les signaux de fond, il faut choisir un seuil qui soit égal voire supérieur à la valeur maximale du signal de sortie du filtre sur signal d'entrée de fond. Le résultat de simulation montre que cette valeur maximale peut être d'une vingtaine de DN, ce qui signifie que pour qu'un feu à Leds soit détectable, l'amplitude de son signal correspondant doit être plus importante que la valeur du seuil. Il en résulte que la portée du système est de la même façon que précédemment, limitée par le seuillage le signal utile étant inversement proportionnel au carré de la distance. On notera que dans le cas de non normalisation, le seuillage sur amplitude est mieux adapté au filtre « multicanaux », parce que ce type de filtre ne prend en compte que les fronts du signal, et que la courbe de densité de probabilité de la réponse est plus basse que celles des deux autres filtres. La démonstration expérimentale sur le point du choix du seuil est présentée dans le chapitre IV.

III.5 Résultats de simulation des signaux à problème

Il est important d'évaluer le compromis entre le besoin de réduire les détections de chaque caméra les fausses alarmes en situation, et la baisse de sensibilité aux faibles signaux utiles qui en résulte inévitablement. Dans cette section, nous présentons quelques simulations sous Matlab de signaux artificiels capable d'engendrer de fausses détections.

Nous comparons les performances des différents filtres numériques proposés et les réglages d'optimisation correspondants :

- **F1** : filtre adapté en créneau « classique »
- **F2** : filtre adapté en créneau « 4-phases »
- **F3** : filtre « multicanaux » sur la dérivée de signal brut

Nous avons pris comme modèle une caméra 8 bits, c'est-à-dire que les signaux enregistrés sont entre 0 et 255 DN. Seule l'expérience, abordée au chapitre suivant, permettra d'aller plus loin, pour identifier les plus dangereux.

Ci-dessous la liste de signaux d'entrée que nous avons analysés par simulation :

- Fond variable : nuages, feuilles des arbres, passage du bord d'objet clair à sombre ou sombre à clair au choix, etc.
- Motifs répétitifs, ou à fluctuations rapides
- Soleil en direct proche de l'horizon
- Mauvaises conditions météorologiques

III.5.1 Fond variable

Un fond variable correspond au changement de l'éclairage, comme :

- Entrée ou sortie d'un tunnel, ou d'un parking sans éclairage civil (éclairage naturel), etc.
- Entrée ou sortie d'un parking avec éclairage civil à 50 Hz ou 100 Hz, etc.
- Passage du bord d'objet clair : nuages, peintures routières, poteaux, panneaux blancs, feuilles d'arbres etc.

En ce qui concerne les 2 premiers scénarii, le signal est typiquement un saut, dont la pente dépend de la vitesse de roulage et la condition d'éclairage. Un ordre de grandeur qu'on peut noter est que, si le véhicule roule à 150 km/h, soit 42m/s, pendant le temps d'analyse de 10ms, le déplacement du véhicule est 0,42 mètre.

En ce qui concerne le passage de bord d'objet clair, typiquement le signal monte ou descende en continu tout au long ou partiellement pendant la durée d'analyse. La pente dépend de la vitesse du roulage, et de la dimension ainsi que la position de l'image sur ma matrice de détecteurs. Les scénarii possibles sont des lignes blanches ou d'autres peintures routières, les panneaux blancs, des bâtiments éclairés, les poteaux, etc.

Ci-dessous trois signaux d'entrée, SE_1 , SE_2 , et SE_3 , comme le montre la figure III.22. Le signal d'entrée SE_1 décrit le passage d'un environnement naturel sombre à l'autre environnement bien éclairé, qui est aussi naturelle. Le signal d'entrée SE_2 correspond au passage d'un environnement naturel sombre, à un environnement éclairé urbain de 50 Hz. Le signal d'entrée SE_3 , quant à lui, est similaire que le scénario du SE_2 , mais l'éclairage urbain est de 100 Hz. Pour tous les trois signaux, le niveau moyen (de la partie continue) est 2 DN avant le passage et 255 DN après, avec un échantillon transitoire de 128 DN. Les échantillons de modulation de 50 Hz et de 100 Hz ont été calculés en prenant en compte de l'équation (3.36).

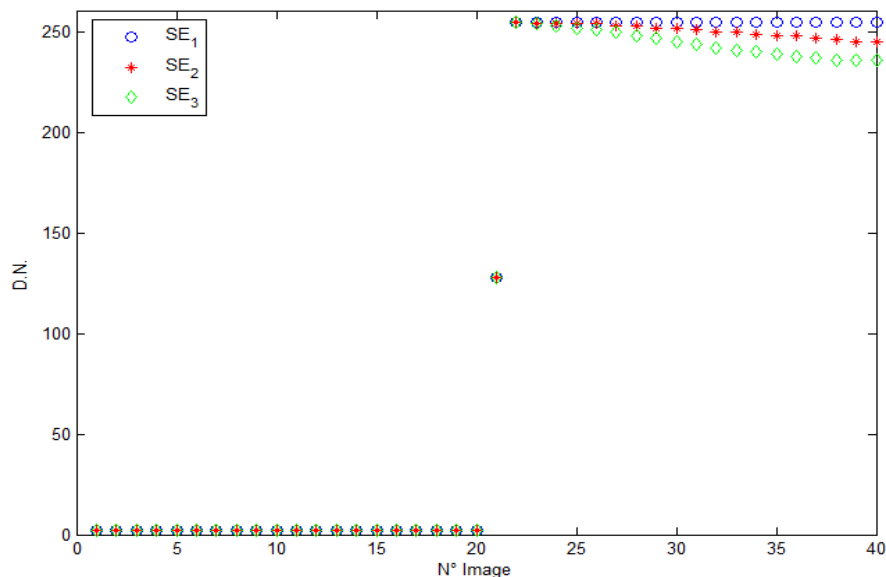


Figure III.22 Signaux bruts d'un passage du bord sombre / clair

Les signaux en sortie des trois filtres numériques pour chaque signal d'entrée, sans normalisation et avec normalisation, sont présentés dans le tableau III-3 ci-dessous.

Tableau III-3 Signaux de sortie des filtres

	S_{Mod}	Sans normalisation			Avec normalisation		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
SE_1	253	22,4	29,0	25,3	0,16	0,22	0,20
SE_2	253	21,8	28,3	25,3	0,16	0,22	0,20
SE_3	253	21,4	27,8	25,1	0,16	0,22	0,20

On voit dans ce tableau que, sans normalisation, les signaux de sortie de filtres sont importants et cela pourra être gênant pour le système, parce que ça veut dire que l'amplitude des signaux issus des feux à Leds doit être plus importante que 30 (environ) pour que le fond puisse être rejeté. Dans ce cas, la distance de détection est très limitée vu l'intensité des feux à Leds automobiles d'aujourd'hui. Au contraire, avec normalisation, les signaux de sortie de filtres ont été réduits et qu'ils sont beaucoup plus petits que le signal de sortie d'un signal utile (voir les courbes de densité de probabilité). Comme ces signaux de sortie correspondent aux cas les plus défavorables possibles dans les scénarii routiers, on considère que le fonctionnement est aussi efficace dans les cas où la variance du signal d'entrée est moins forte.

Les signaux peuvent être aussi asymétriques pendant la durée d'enregistrement. En prenant en compte les même signaux, mais avec un décalage d'échantillonnage de 10 points, nous avons obtenu les signaux SE_4 , SE_5 , et SE_6 , comme le montre la figure III.23 ci-dessous.

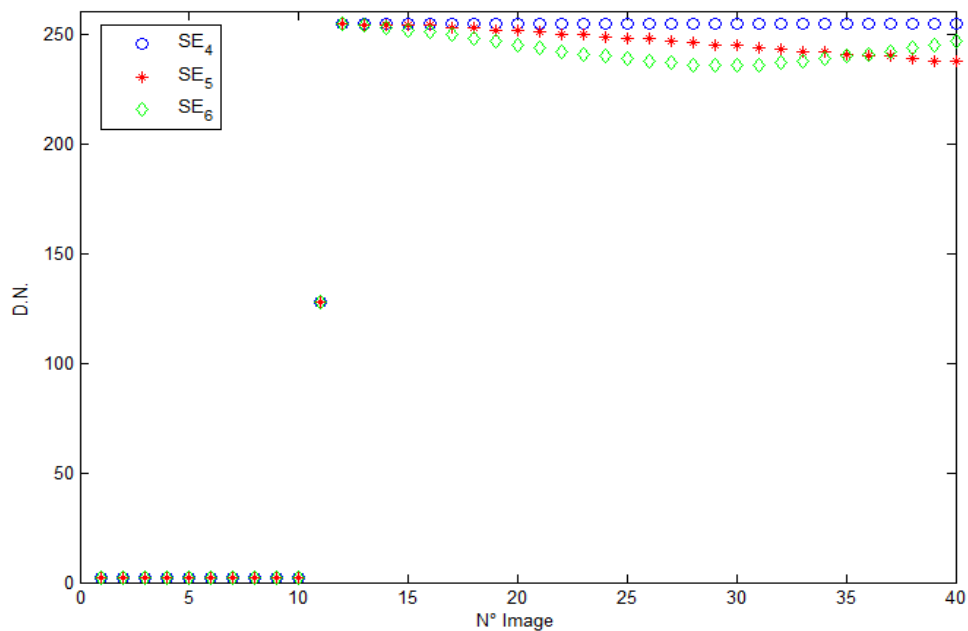


Figure III.23 Signaux de la figure 21 décalés

Dans ce cas, le signal en sortie de filtre est montré dans le tableau III-4 ci-dessous.

Tableau III-4 Signaux de sortie des filtres

	S_{Mod}	Sans normalisation			Avec normalisation		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3

SE_4	253	18,4	24,5	25,3	0,16	0,22	0,20
SE_5	253	17,7	23,6	25,2	0,16	0,22	0,20
SE_6	253	18,0	23,9	25,2	0,16	0,22	0,20

On voit que les signaux de sortie sont plus faibles que ceux montrés dans le tableau 4, mais ils sont toujours défavorables pour le filtrage. Après la normalisation, nous avons obtenu le même résultat, vu que la fréquence des signaux normalisés est la même.

Dans le cas d'un passage du bord d'objet « clair/sombre » ou « sombre/clair », un exemple de signal en montant ou en descendant pendant toute la durée d'analyse de 10 ms (une droite) est le cas du signal 1 décrit dans le paragraphe III.4.1. On voit qu'il produit une réponse importante si l'on n'applique pas la normalisation. Les deux signaux ci-dessous, SE_7 , et SE_8 , montrés sur la figure III.24, chacun représentant une modulation entre 2 DN et 255 DN de pente différente, décrivent le cas où le passage du bord est plus court que la durée d'analyse.

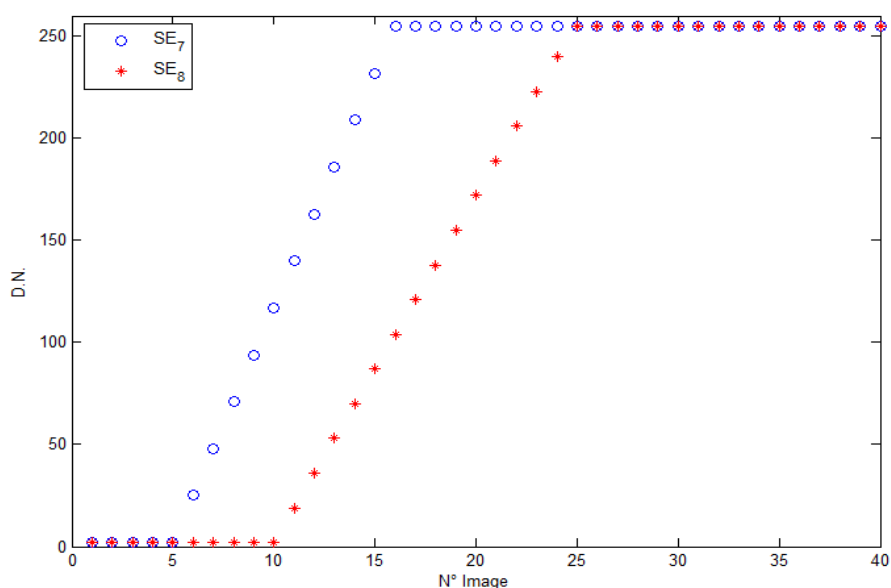


Figure III.24 Signaux correspondants au passage du bord d'objet clair

Le résultat de simulation de signal de sortie de filtre sur ces trois signaux d'entrée pour différents cas est montré dans le tableau III-5.

Tableau III-5 Signaux de sortie des filtres

	S_{Mod}	Sans normalisation			Avec normalisation		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
SE_7	253	12,9	15,9	4,6	0,14	0,17	0,2
SE_8	253	13,2	16,3	1,9	0,07	0,10	0,2

Le résultat de calcul montre que sans normalisation, des forts signaux peuvent être produits en sortie de filtres. On note que le signal de sortie de filtre « multicanaux » est plus faible que celui d'autres filtres. Cependant, cela pourra ne pas être négligeable si la variation est très rapide (pente très forte). La

normalisation, quant à elle, permet de réduire le signal de sortie pour tous les trois filtres. Par ailleurs, on notera que l'examen sur l'amplitude de modulation du signal brut ne peut pas fonctionner pour des signaux très variables en niveau de gris.

III.5.2 Passage de motif répétitif

Les motifs répétitifs comportent les passages piétons, les carrés blancs, les peintures des places de parking, des portails avec des barreaux, les panneaux avec motifs striés, et d'autres peintures qui se répètent. Le signal généré par un motif répétitif pourrait être un signal périodique, dont la fréquence dépend de la fréquence spatiale, de sa distance au capteur, de la vitesse de roulage du véhicule, et de rotation angulaire.

Selon la spécification, le champ horizontal du système est de l'ordre de 160° , soit 2,8 rad, avec une résolution capteur matricielle de 1200 pixels, d'environ 2,3 mrad. Pour un véhicule qui roule à 150 km/h, soit 42 m/s, le déplacement longitudinal pendant 2ms, soit 1 période du signal recherché (feux à Leds modulés), est environ 8,5 cm. Il faut aussi noter que, les motifs routiers sont souvent de dimension beaucoup plus que certaines centimètres.

En conséquence, un motif répétitif pouvait produire des fausses détections s'il crée en sortie de pixel un signal dont la fréquence de modulation est égale à ou proche de 500 Hz, ce qui est très peu probable pendant un roulage en conditions réelles. Par exemple, une barrière avec des barres blanches et sombres alternées située en bord de champ de la caméra ($\cos\theta \approx 0,5$), chaque barre étant de 20 cm de large, génère un signal modulé à 52,5 Hz si le véhicule roule à 42 m/s parallèlement à la lumière.

Nous avons pris comme exemples trois signaux de même amplitude, SE_9 , SE_{10} , et SE_{11} , modulés respectivement à 100 Hz, 250 Hz et 450 Hz, comme le montre la figure III-25.

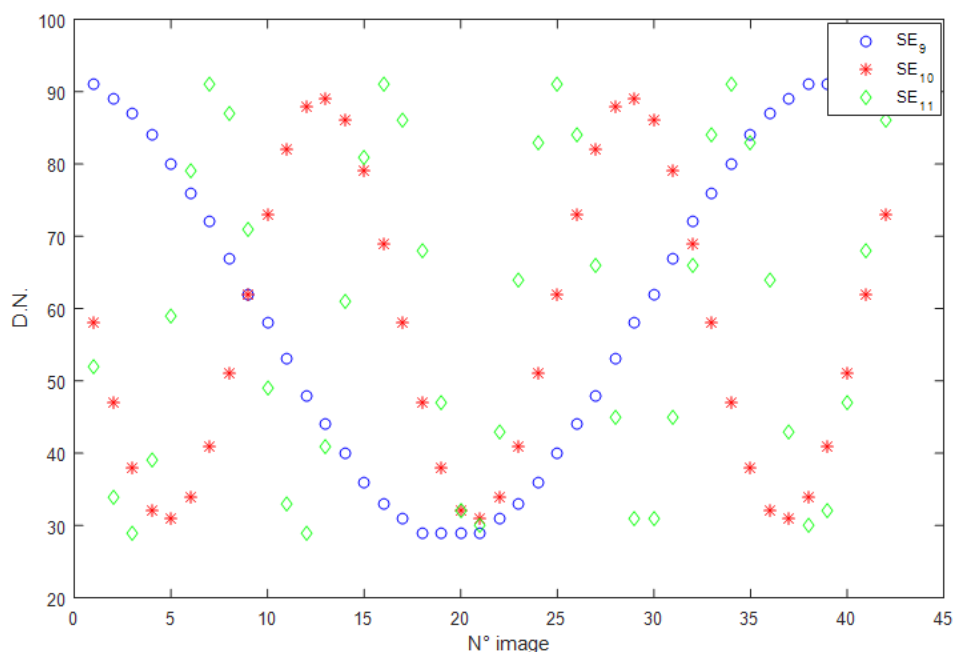


Figure III.25 Signaux du passage de motifs répétitifs

La réponse des filtres sur les trois signaux d'entrée bruts ainsi que sur leurs normalisations est montrée dans le tableau 7 ci-dessous.

Tableau III-6 Signaux de sortie des filtres

	S_{Mod}	Sans normalisation			Avec normalisation		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
SE_9	62	0,14	0,17	0,20	0,14	0,24	0,40
SE_{10}	58	0,14	2,32	3,20	0	0	0,20
SE_{11}	62	12,10	17,20	24,70	0,45	0,67	1,00

On voit que le signal modulé à 450 Hz a produit des signaux forts en sortie des filtres sans normalisation ; avec normalisation, le signal de sortie a été réduit pour tous les trois filtres numériques. Le signal de sortie sur le signal d'entrée modulé à 250 Hz a aussi été réduit, et celui pour le signal à 100 Hz reste à peu près au même niveau.

III.5.3 Soleil en direct proche de l'horizon ou phares d'autres véhicules

Des sources parasites comme le soleil en direct ou les phares d'autres véhicules sont nuisibles parce qu'elles polluent le signal utiles, surtout si elles saturent la caméra. S'il y a saturation, le signal en sortie de pixel est bloqué à 255 DN, laissant disparaître la modulation due au feu à Leds, même si le signal est suffisamment fort pour être détectable. En conséquence, on n'a pas à craindre dans ce cas de fausse alarme, mais des détections manquées sont possibles. Si la saturation dure pendant longtemps et qu'un véhicule proche n'a pas été détecté, ça veut dire que le système anticollision est inopérant pendant cette période et qu'on ne pourra plus prévenir des collisions potentielles.

III.5.4 Mauvaises conditions météorologiques

En ce qui concerne le signal utile issu d'un feu à Leds, il peut être dégradé, soit par la présence de brouillard / brume, soit par les mouvements relatifs entre véhicules « suiveur » et « cible », qui en réduisent la durée et/ou la stabilité.

En présence de brouillard, la diffusion du signal issu d'un feu à Leds entraîne une atténuation du signal, et un élargissement de l'image du feu, donc une plus grande incertitude sur la direction de la source. Le passage rapide de l'image de feu sur la matrice de détecteurs réduit le temps d'analyse du signal utile. De même, un changement du fond causé par le déplacement du véhicule, ou l'inhomogénéité de rayonnement de feu à Leds, peut entraîner une variation du niveau moyen suffisamment importante pour détruire ces effets de la normalisation sur le signal à la fréquence originale de 500 Hz.

Ces différentes situations peuvent être à l'origine de détection manquée des feux à Leds cibles, donc de réduction de la portée du système. Par exemple, en présence de brouillard, on caractérisera la scène par la distance de visibilité météorologique, V_{met} , qui permet de déduire le coefficient d'atténuation de l'atmosphère dans le visible (l'hypothèse de l'observation humaine centrée à 0,55 μm) :

$$\gamma = 3,91 / V_{met} \quad (3.88)$$

Nous faisons l'hypothèse que l'atténuation de signal dans l'atmosphère suit la loi exponentielle décrit par l'équation ci-dessous :

$$L_a(d) = L_0 e^{-\gamma d} \quad (3.89)$$

Où L_a est la luminance apparente d'un objet de luminance intrinsèque L_0 , et d est la distance d'observation.

Les courbes de la figure III.26 montrent la transmission de l'atmosphère et donc la réduction en signal utile, L_a/L_0 , à des distances différentes, respectivement pour des visibilités de 30m, 50m, et 100m (brouillard).

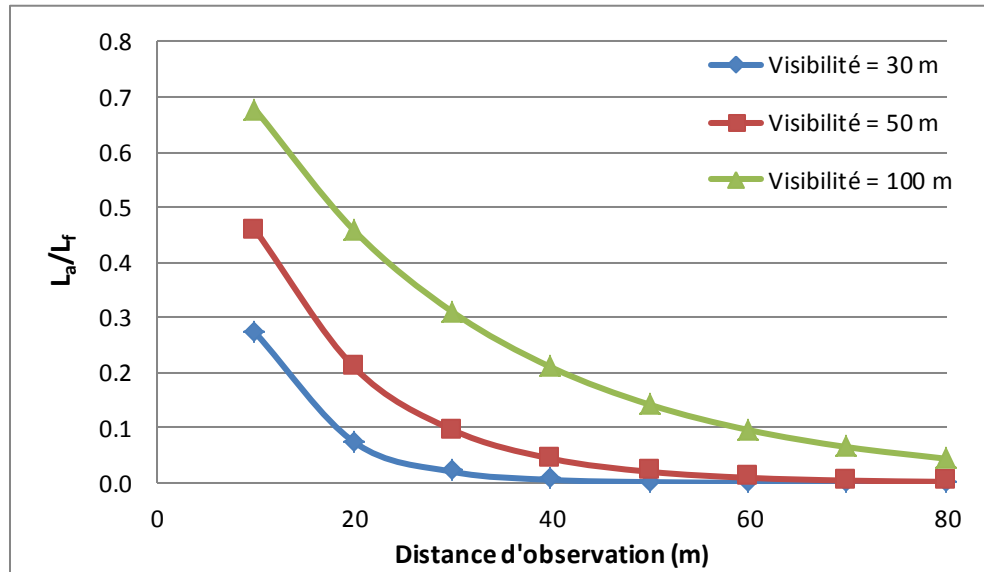


Figure III.26 Atténuation du signal en fonction de distance d'observation (visibilité de 30m, 50m et 100m)

On voit que le signal du feu décroît rapidement lorsque la distance d'observation augmente. À 20 m, la transmission atmosphérique est d'environ 8% pour une distance de visibilité de 30m, 20% pour une distance de visibilité de 50m, et 45% pour une distance de visibilité de 100m. Cette atténuation due à de mauvaises conditions météorologiques est une contrainte majeure pour la distance de fonctionnement du système.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé trois types de filtres pour détecter un signal modulé en créneau à 500 Hz sur des séquences de 10 ms d'une caméra rapide travaillant à 4000 Hz. Comme il est impossible de connaître la phase du signal à détecter par rapport à la phase de l'acquisition de la caméra, nous avons conclu qu'il est nécessaire de concevoir des filtres qui effectuent des moyennes sur plusieurs phases possibles : les cas de 4 et de 8 phases ont été traités. Un avantage potentiel supplémentaire, dont l'expérience montrera s'il est réaliste, est que cette méthode est aisément adaptable à des signaux en créneaux de rapports cycliques variables pour différencier des signaux de catégories diverses.

Nous avons ensuite passé en revue différents types de parasites qui pourraient se produire dans les scènes réelles et effectué par simulation numérique une première estimation de l'efficacité de nos filtres. Seule l'expérience de terrain, qui sera l'objet du chapitre 4, permettra de valider les conclusions

et d'en déduire la distance maximale en-dessous de laquelle le signal recherché ne risque en pratique d'être perturbé par aucune fausse alarme. En conclusion du présent chapitre, nous pouvons cependant d'ores et déjà affirmer :

- que le seuil entre les décisions d'alarme et de non alarme sera fixé de façon simple à partir des courbes de densité de probabilité des signaux avec cible présente et cible absente, compte-tenu des coûts respectifs qu'il apparaîtra pertinent d'attribuer à une détection manquée et à une fausse alarme ;
- que les filtres à mettre au point devront rechercher la fréquence de modulation du signal de la cible par des adaptations du filtrage adapté soit sur le signal lui-même soit sur sa dérivée, mais en prenant garde à la nécessité de détecter toutes les phases possibles de la cible, de 0 à 2π , et à normaliser convenablement le signal ; il est possible qu'il convienne en plus de veiller à supprimer par le filtrage les dérives du signal lentes par rapport à la fréquence de modulation ;
- que la fréquence de modulation choisie, 500 Hz, est assez élevée pour que la présence de signaux parasites à cette fréquence exacte ou dans la bande de fréquence à laquelle les filtres restent sensibles (environ de 400 Hz à 600 Hz, mais cette estimation devra être affinée sur des cas réels) soit très peu vraisemblable ;
- que certains cas (fort brouillard, éblouissement) ne risquent pas d'engendrer de fausse alarme, mais risquent fort d'engendrer des détections manquées. Le système devra donc dans ce cas avertir le conducteur qu'il n'est plus opérationnel.

La comparaison entre les trois filtres étudiés ici montre que l'utilisation de la dérivée est efficace contre les signaux lentement variables, qui rendent la normalisation inopérante.

Chapitre IV Évaluation et validation expérimentales des filtres

Pour valider expérimentalement les performances des filtres numériques présentés dans le chapitre 3, nous avons réalisé un ensemble de mesures au moyen d'une caméra rapide embarquée sur véhicule d'essai « suiveur » ou « porteur du système », qui fonctionne en mode « back-office ».

Dans ce chapitre, nous présentons les matériels et les montages utilisés, les essais en laboratoire qui nous ont permis de tracer la courbe expérimentale de fonction de transfert de chaque filtre, ainsi que les « roulages » sur le terrain, qui nous ont permis d'évaluer la performance (nombre de fausses détections et probabilité de bonnes détections) des filtres, et également les courbes de densité de probabilité de signal du feu modulé et de fond.

Comme les deux types de feux à Leds de voitures, feux DRL et lanternes de signalisations, sont directives en rayonnement, ce qui ne nous permet pas de quantifier de façon stable en fonction du mouvement du signal sur la matrice, de l'orientation de l'émetteur, etc., nous avons utilisé également des sources à Leds isotropes en plus de deux types de feux à Leds de voitures choisis.

Nous avons enregistré trois types de roulages:

- Scènes en statique : les feux à Leds étant montés sur les supports métalliques, le véhicule « suiveur » était en arrêt
- Roulages à vitesses angulaires de feux « faibles », correspondant aux conditions du paragraphe II.4, pour lesquelles le temps de résidence de l'image de la Led sur le pixel est supérieur à 10 ms, durée d'une séquence de traitement. Les vitesses de roulage du véhicule « suiveur » allaient de 30 km/h jusqu'à 80 km/h.
- Roulages à vitesses angulaires de feux « grandes », pour lesquels le temps de résidence est inférieur à la durée d'une séquence de traitement : les feux à Leds étant installés sur le véhicule « cible », le véhicule « suiveur » roulait à environ 30 km/h.

La plupart des roulages ont été effectués dans les conditions de lumière ambiante défavorables, avec un fond très clair, ce qui représente un éclairage de scène égal ou supérieur à 50000 lux, ceci dans le but de favoriser l'apparition de fausses détections.

IV.1 Présentation des matériels utilisés

Les matériels que nous avons utilisés dans les expérimentations sont les suivants :

- Deux véhicules d'essai, un véhicule « suiveur » ou « porteur de caméra », un véhicule « cible » ou « porteur des feux à Leds »
- 1 Caméra rapide Basler A504k, réglée à la cadence image de 4000 Hz, et équipée d'un objectif Fisheye de focale 4,5 mm, et de nombre d'ouverture à 2,8
- 1 support « ventouse » pour monter la caméra sur le véhicule « suiveur »
- 3 feux à Leds de voiture : deux feux de circulation diurne (DRL) et 1 lanterne de signalisation (feu de position arrière)
- 1 source à Leds isotropes de divergence horizontale de 90 degrés
- 3 supports métalliques des feux à Leds, et deux barres de remorquage métalliques « spéciales »

- 3 strobe controllers pour l'alimentation et la modulation des feux à Leds et des sources à Leds
- 3 batteries Lithium 24 V 10 A pour l'alimentation des strobecontrollers
- 1 PC industriel pour l'acquisition et l'enregistrement des images de la caméra rapide
- 2 batteries de véhicules 12V 85 Ah 760 AEN et un convertisseur pour l'alimentation du PC industriel

IV.1.1 Véhicules d'essai

Dans les expérimentations, deux véhicules d'essai ont été utilisés, respectivement comme véhicule « suiveur » portant la caméra (figure IV.1) et comme véhicule « cible » portant les sources à Leds (figure IV.2).



Figure IV.1 Véhicule d'essai « suiveur » portant la caméra



Figure IV.2 Véhicule d'essai « cible » portant les feux à Leds

Le véhicule « suiveur » est une Mégane Berline, et le véhicule « cible » est une Laguna 3.

IV.1.2 Caméra rapide + objectif Fisheye

La caméra rapide comporte deux constituants : le capteur rapide Basler A504k, et l'objectif fisheye circulaire de Nikon. La figure IV.3 ci-dessous montre cette caméra avec son objectif embarquée sur le véhicule « suiveur ». On voit que la caméra est fixée par la ventouse, en haut derrière le pare-brise, et qu'elle regarde vers l'avant du véhicule.



Figure IV.3 Caméra rapide embarquée sur véhicule « suiveur »

Le capteur Basler est un capteur monochrome, de type CMOS, avec des caractères principaux suivants :

- Dimensionnement de la matrice de détecteurs : 15,36 mm (Horizontal) × 12,29 mm (Vertical)
- Résolution matricielle : 1280 H × 1024 V pixels
- Dimension de chaque pixel : 12 μm × 12 μm
- La surface sensible occupe 40% de l'aire du pixel
- Nombre de bits : 8 bits (niveaux de gris compris entre 0 et 255)
- Obturateur électronique
- Dispositif anti-éblouissement
- Contrôleur automatique de temps de pose
- Température de fonctionnement : 0°C – 50°C
- Alimentation : 12 Volt en tension continue

Nous avons choisi l'objectif Fisheye circulaire Sigma de Nikon (figure IV.4), avec une loi de distorsion en $f-\theta$.

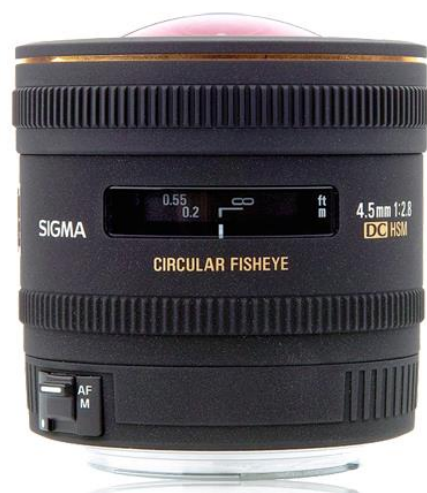


Figure IV.4 Sigma 4,5mm F2,8 Fisheye Circulaire de Nikon

Cette optique dispose des caractères suivants :

- Nombre d'ouverture minimale : F2,8
- Nombre d'ouverture maximale : F22
- Distance focale : 4,5 mm
- Distance minimale de mise au point : 13,5 cm
- Dimensions : 76,2 mm (Φ) $\times$ 77,8 mm (L)

Avec son capteur, cette caméra présente un champ de vision de 180° en horizontal par 156,5° en vertical, avec une résolution de 1177 H $\times$ 1024 V pixels, plus petite que celle de la matrice, en raison de la limitation de champ angulaire de l'objectif.

La caméra rapide Basler permet d'enregistrer des images jusqu'à 16000 images/s. Cependant, le nombre de lignes dépend de la vitesse d'enregistrement : plus la vitesse d'acquisition augmente, plus le nombre de lignes est réduit. Le tableau IV-1 ci-dessous montre la résolution maximale que l'on peut obtenir à différentes vitesses d'enregistrement de la caméra.

Tableau IV-1 Capacité d'enregistrement de la caméra rapide Basler A504k en fonction de la cadence

Fréquence d'image maximale (images/s)	500	1000	2000	4000	8000	16000
Résolution horizontale x Verticale (pixels)	1280 x 1023	1280 x 512	1280 x 256	1280 x 128	1280 x 64	1280 x 32

Dans nos expérimentations qui ont été effectuées à 4000 Hz, le nombre de lignes par image est limité à 128, et, par ailleurs, le nombre de points par ligne a été limité à 864, à cause de la capacité de traitement de notre version de Matlab. Les données acquises par la caméra sont transférées au dispositif d'enregistrement via deux câbles de Caméra Link.

IV.1.3 PC enregistreur de la caméra rapide

La caméra rapide est connectée avec un PC industriel, qui permet de modifier les paramètres d'enregistrements et de sauvegarder les données acquises par la caméra, par des logiciels dédiés. La figure IV.5 ci-dessous montre la connexion entre la caméra et le PC.

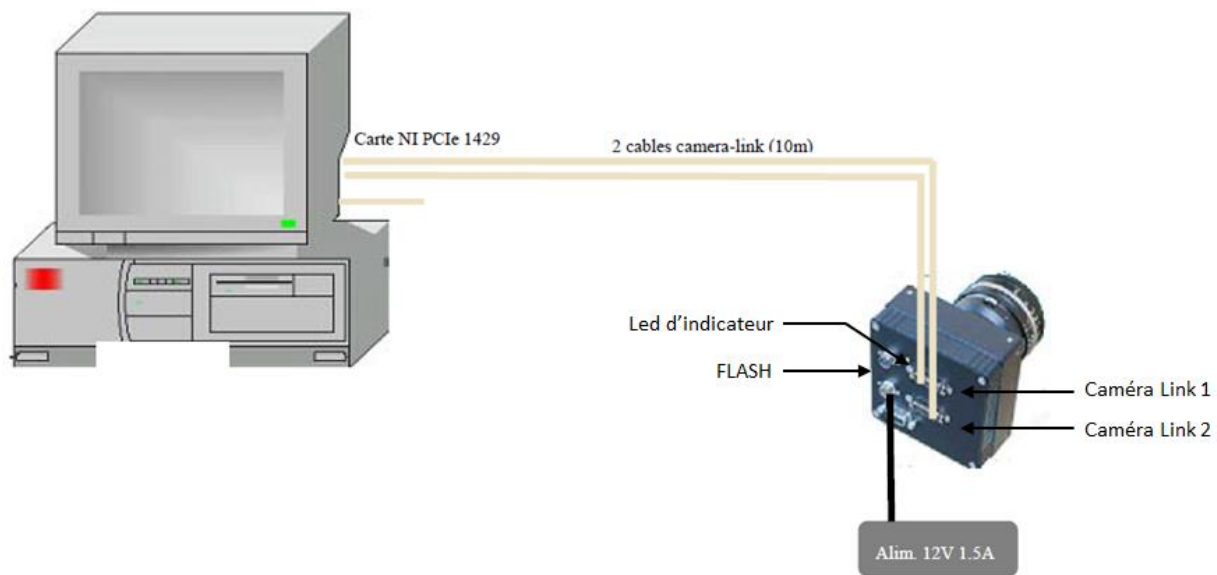


Figure IV.5 Connexion entre la caméra rapide Basler et le PC industriel

Le PC industriel est installé sur le siège derrière du véhicule, avec son circuit d'alimentation installé dans le coffre. Il est dédié à l'enregistrement des données de la caméra rapide Basler, sur 12 disques WD1500 RAPTOR, de 150Go, qui sont configurés en RAID0 :

- Débit maximum soutenu dans NV 1000 environ 430 Mo/s
- Volume maxi : 1,5 To
- Capacité d'enregistrement : >20 séquences de 2 mn à 1000 images/s en 768 H x 512 V pixels

Le logiciel qui pilote la caméra, le NV1000, a été développé par le fournisseur New Vision Technologies. Un exemple d'interface d'utilisation du logiciel est montré sur la figure IV.6. On voit qu'il permet d'acquérir et de visualiser les images par la caméra (modules « Mesures sur les images » et « Affichage »), de modifier les paramètres de l'enregistrement (modules « Prise de vue » et « Commandes de lecture »), et de sauvegarder les images ou les vidéos obtenues sur disque dur (module « Gestion des séquences »).

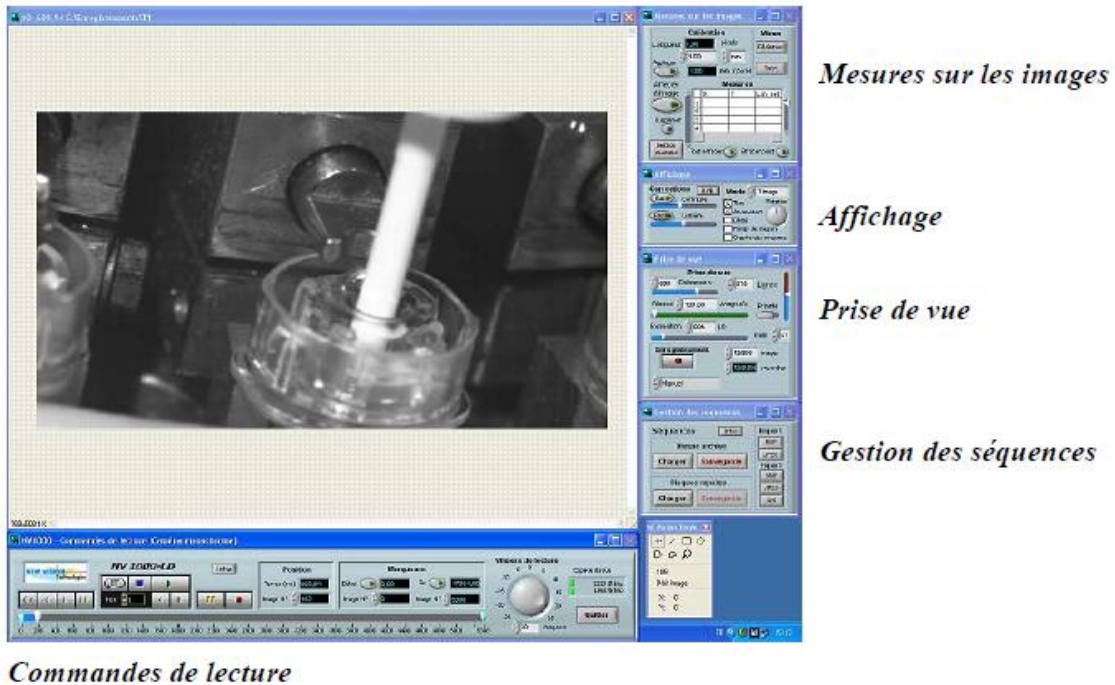


Figure IV.6 Interface d'utilisation du logiciel NV1000

IV.1.4 Feux à Leds de voiture

Pour évaluer les performances des filtres dans différents scénarii, nous avons d'abord monté les feux à Leds, sur des supports métalliques fixes de type trépied (figure IV.7), puis sur les anneaux de remorquages « spéciales » de la voiture « cible » (figure IV.8). Tous les supports sont conçus et fabriqués par le fournisseur BEM.



Figure IV.7 Supports du feu à Leds en laboratoire



Figure IV.8 Support du feu à Leds embarqué

Les feux à Leds montrés dans les figures IV.7 et IV.8 sont des feux de circulation diurne (DRL), constitués de 9 Leds blanches, en forme de « L », d'environ 30 cm de largeur et 15 cm de hauteur.

Nous avons aussi utilisé une lanterne de signalisation (feu de position arrière), comme le montre la figure IV.9. Ce feu est composé de 10 Leds rouges, rangées en deux lignes parallèles, suivant une courbe légère. Il fait environ 30 cm en largeur, et 15 cm en hauteur. Les supports de cette lanterne sont les mêmes que ceux qui ont été utilisés pour les feux DRL.



Figure IV.9 Feu de position arrière rouge à Leds

Tous ces feux sont modulés en créneau, à la fréquence de 500 Hz, et alimentés sous la même tension. L'intensité d'un feu DRL est 600 Cd, celle d'une lanterne est environ 450 Cd.

IV.1.5 Sources à Leds isotropes

En plus des sources décrites ci-dessus, nous avons expérimenté des sources fournies par le Start-up Effilux, qui sont des barres de Leds (figure IV.10), à émission quasi isotrope dans un cône réglable. Quatre angles de divergences sont disponibles selon l'optique utilisée : 90°, 45°, 25° et 10°, identiques en horizontal et vertical.



Figure IV.10 Barre à Leds d'Effilux

Nous avons utilisé trois modules de telles sources dans les expérimentations :

- Des barres de Leds rouges d'intensité lumineuse égale à 100Cd sur l'axe, 60 Cd à 30° (pour un courant de 700 mA)
- Des barres de Leds blanches d'intensité de 500 Cd sur l'axe, 300 Cd à 30° (pour un courant de 700 mA)
- Des barres de Leds blanches d'intensité de 1000 Cd sur l'axe, 600 Cd à 30° (pour un courant de 700 mA)

Ces sources sont aussi modulées en créneau à 500 Hz.

IV.1.6 Strobe Controller

Les feux à Leds de voiture et les sources à Leds isotropes sont alimentés et modulés par des contrôleurs stroboscopiques (« strobe controller ») de Smartek. La figure IV.11 montre les panneaux avant et arrière du modèle utilisé, l'IPSC4, qui comporte 4 sorties en parallèle. Il dispose aussi d'une porte Ethernet, qui permet la connexion au PC et au routeur, ainsi qu'une entrée de signal de déclenchement externe. Les ports de sortie sont situés sur le panneau arrière du dispositif.



Figure IV.11 Smartek strobe controller (face avant et arrière)

Le Smartek IPSC4 propose trois modes de fonctionnement pour générer des modulations par trigger :

- Le mode « Trigger Externe », qui permet de générer des séquences à partir de signaux de déclenchement d'entrée externes. C'est le mode le plus précis, parce que le délai entre le signal de déclenchement et l'émission de la séquence est très faible (~ 2 ms).
- Le mode « Trigger logiciel », qui reçoit un trigger provenant du logiciel pilote via les câbles de connexion avec l'extérieur. Comme il existe un délai important entre le dispositif et le PC, ce mode est moins précis que le mode « Trigger Externe ».
- Le mode « Switch Externe », où le dispositif agit comme un « interrupteur » : s'il reçoit un signal de commande externe, le dispositif sort un courant continu, tant que signal de commande est actif.

Pour générer la modulation en créneau, nous avons utilisé le mode « Trigger Externe ». Les strobes controller sont alimentés chacun par une batterie de 24 V.

IV.2 Caractérisation des réponses des pixels de la caméra rapide

IV.2.1 Caractérisation en statique

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats des expérimentations destinées à caractériser les réponses des pixels de la caméra aux émissions des sources à Leds en configuration statique, le véhicule porteur de la caméra était à l'arrêt. Nous avons fait les mesures avec les sources de référence (Leds isotropes), et avec les feux à Leds de voitures répondant aux spécifications automobiles, ce qui nous a permis de comparer les comportements des feux de voiture compte-tenu de leur son directivité. Les expérimentations ont été effectuées à l'intérieur du Technocentre de Renault, par temps très ensoleillé, sur la scène présentée à la figure IV.12.



Figure IV.12 Scène d'essai au Technocentre Renault

La figure IV.13 montre une image brute de la scène enregistrée à 4000 Hz.



Figure IV.13 Image brute de la scène montrée sur la figure IV.12

La plupart des essais, soit en statique, soit en mouvement, ont été effectués à cet endroit, car cette scène est très intéressante par la variété des objets, qui s'y trouvent : elle comporte des arbres sombres, un ciel très clair avec des nuages, des poteaux et des lignes blanches, et un bâtiment réfléchissant avec des structures répétitives.

L'histogramme de l'image brute de la figure 18, présenté sur la figure IV.14, montre que les niveaux de gris sont compris entre 0 DN et 150 DN, la plupart étant entre 0 DN et 50 DN. Parmi les 10 bits de signal acquis par la caméra, l'image est transmise sur 8 bits, que nous avons choisi parmi ceux de poids les plus forts pour que la caméra soit moins perturbée possible par les fluctuations du fond. Par ailleurs, cela permet d'éviter une saturation du signal de sortie sur les zones de scène les plus lumineuses (ciel par exemple).

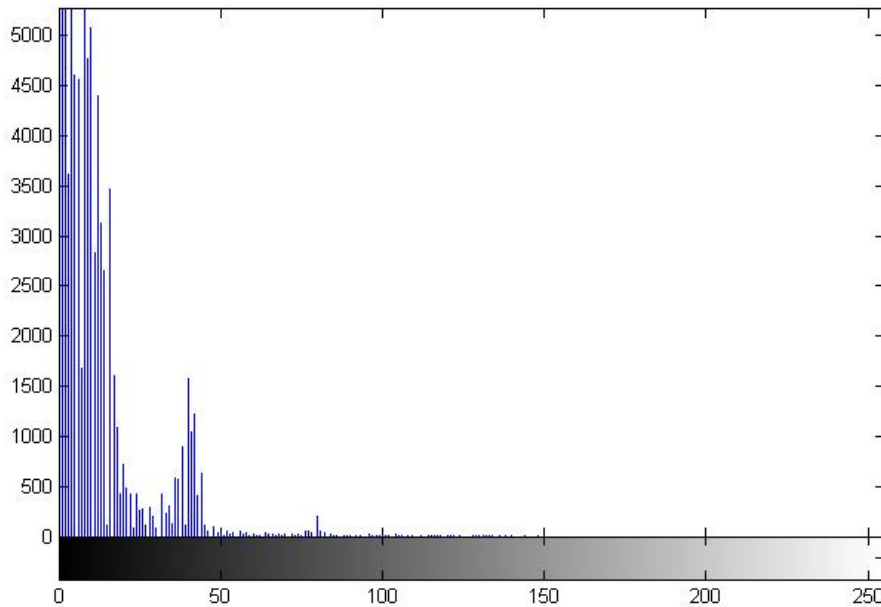


Figure IV.14 Histogramme de l'image de la figure IV.13

a) Feux de voiture

Nous présentons ci-après des enregistrements de signaux issus de la caméra sur feux à Leds, pour lesquels le DRL 1 et lanterne étaient à 20m de la caméra et le DRL 2 était à 100m (le long de l'axe de la caméra). La figure IV.15 ci-dessous montre cette configuration, avec un zoom autour des trois feux à Leds sur l'image brute de la scène, ou une analyse finie montre que les signaux issus du DRL 1 et de la lanterne (proches à 20m), respectivement sur des rectangles de 12 pixels et de 8 pixels, tandis que le signal du feu DRL 2 (plus lointain) apparaît sur un seul pixel.

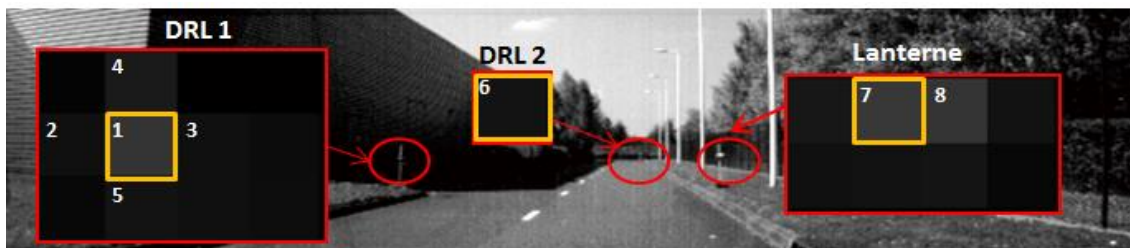


Figure IV.15 Images des feux à Leds

Les figures IV.16, IV.17 et IV.18 présentent une sélection des signaux les plus représentatifs (selon la numérotation incrustées dans les zones zoomées) : pixels 1 à 5 pour DRL 1 et 7-8 pour lanterne à 20m, pixel 6 pour DRL 2 à 100m, sur 123 images successives (durée d'enregistrement de 30,75 ms).

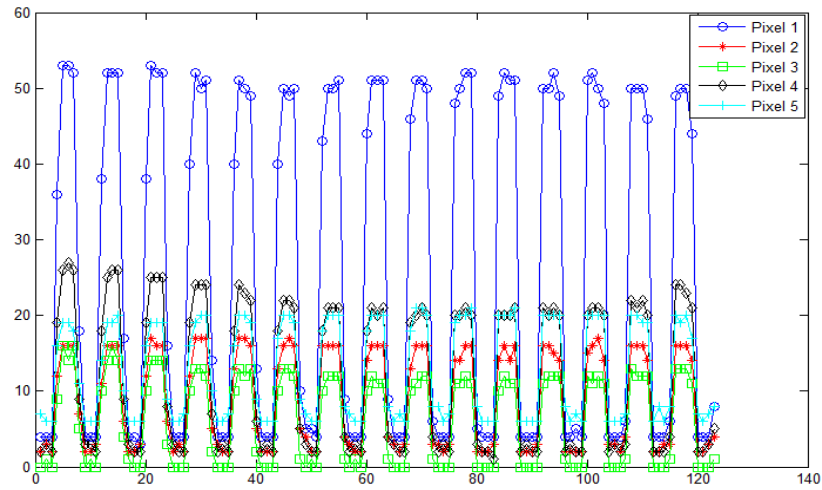


Figure IV.16 Signaux bruts des pixels 1-5(feux DRL 1 à 20m)

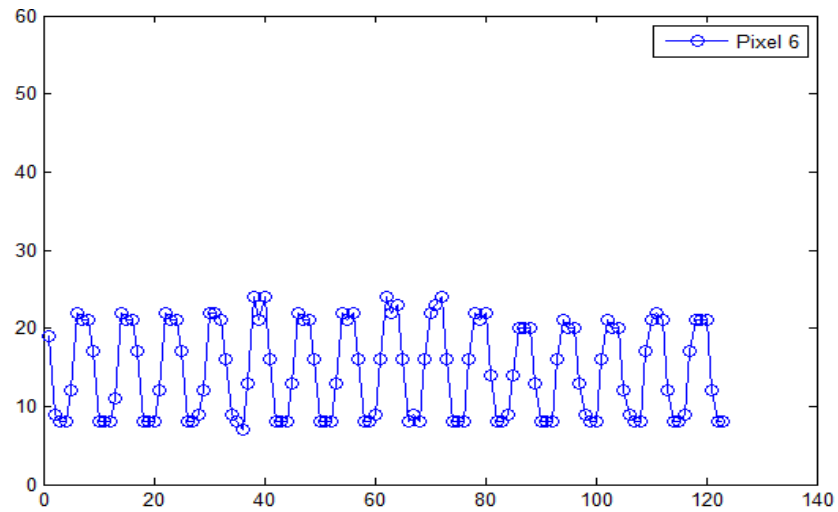


Figure IV.17 Signal brut du pixel 6 (feux DRL 2 à 100m)

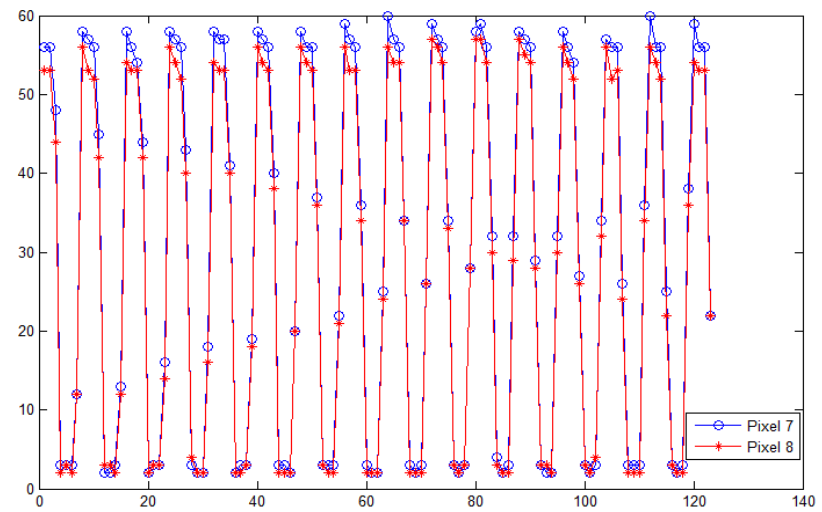


Figure IV.18 Signaux bruts des pixels 7 et 8 (lanterne de signalisation à 20m)

L'analyse des enregistrements confirme la fréquence de modulation des feux à 500 Hz (l'échantillonnage a été effectué par la caméra rapide à 4000 Hz), avec un taux de modulation assez stable pendant la durée d'échantillonnage. L'amplitude moyenne sur le pixel le plus modulé est respectivement 50 DN pour le DRL 1 à 20 m, 17 DN pour le DRL 2 à 100 m, et 56 DN pour la lanterne de signalisation à 20 m.

Les signaux issus d'un même feu sont synchronisés entre eux, et les signaux issus de feux différents sont déphasés, puisque leurs alimentations ne sont pas synchronisées, ce qui est représentatif de scènes opérationnelles (les feux de voiture différentes seront désynchronisés).

Nous avons fait les mêmes analyses pour tous nos enregistrements. Les différentes distances de chaque feu à Leds à la caméra sont rapportées dans le tableau IV-2 ci-dessous. Nous avons fait des enregistrements pour 9 distances différentes du feu DRL et 4 distances différentes pour la lanterne de signalisation.

Tableau IV-2 Différentes distances utilisées pour la caractérisation des feux à Leds

Feu à Leds	Distances (m)					
DRL 1	20	40	60	80	/	/
Lanterne	20	40	60	80	/	/
DRL 2	30	80	100	120	140	160

À chaque distance, nous avons enregistré une centaine d'images brutes et en avons extraits l'amplitude de modulation du signal issu du feu en fonction de la distance (voir le tableau IV-3).

Tableau IV-3 Amplitude moyenne de modulation des feux à Leds en fonction de la distance

DRL 1	20	30	40	60	80
Signal (D.N.)	50	37	78	18	19
DRL 2	100	120	140	160	
Signal (D.N.)	17	5	3	3	
Lanterne	20	40	60	80	
Signal (D.N.)	56	18	10	11	

On peut remarquer que les données du DRL 1 à 40 m et à 80 m sont anormales, parce qu'elles ne correspondent pas à la courbe théorique de l'atténuation du signal en fonction de la distance, ce qui peut s'expliquer par la directivité du rayonnement des feux à Leds automobiles que nous avons utilisés. Comme le véhicule porteur de la caméra avançait en ligne droite vers les feux statiques, les différentes distances correspondent à différents points du diagramme de rayonnement des feux. Lorsque le véhicule passe d'une position à une autre, le point d'impact de l'image d'un feu se déplace et peut trouver ou non sur une zone « aveugle » d'un pixel.

b) Signaux du fond

Nous avons également analysé les signaux du fond en statique. La figure IV.19 ci-dessous montre un exemple de 4 points que nous avons échantillonnés pendant la même durée de 30,75ms, et qui correspondent respectivement aux points du ciel, du bâtiment, des arbres, et de la route.



Figure IV.19 Signaux du fond

Les signaux bruts de ces quatre points échantillonnés sont présentés sur la figure IV.20.

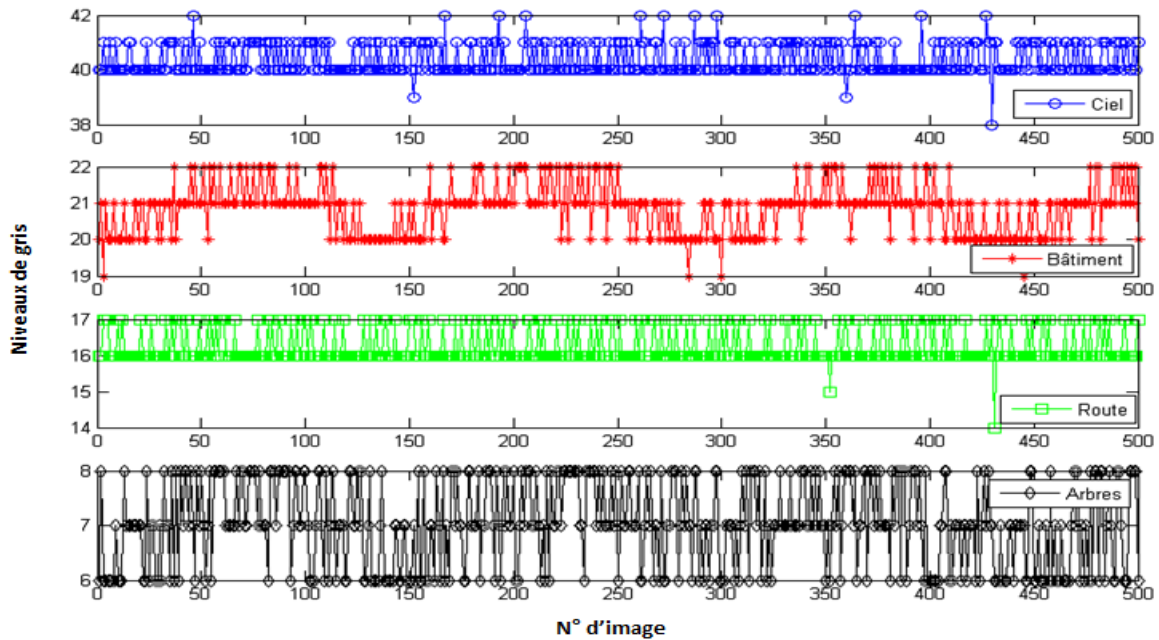


Figure IV.20 Signaux bruts issus du fond statique

Contrairement aux signaux issus des feux à Leds, les 4 signaux issus du fond « statique » sont très peu modulés, et la fréquence de modulation est éloignée de celle recherchée. Les fluctuations autour de la moyenne sont en général de quelques D.N. (<5 D.N.).

L'analyse spectrale de ces signaux nous a permis d'obtenir leurs spectres, comme le montre la figure IV.21. Il en résulte que les composantes fréquentielles des signaux du fond en statique s'arrêtent à 300 Hz. Il y a une remontée vers 450 Hz pour le signal provenant du ciel.

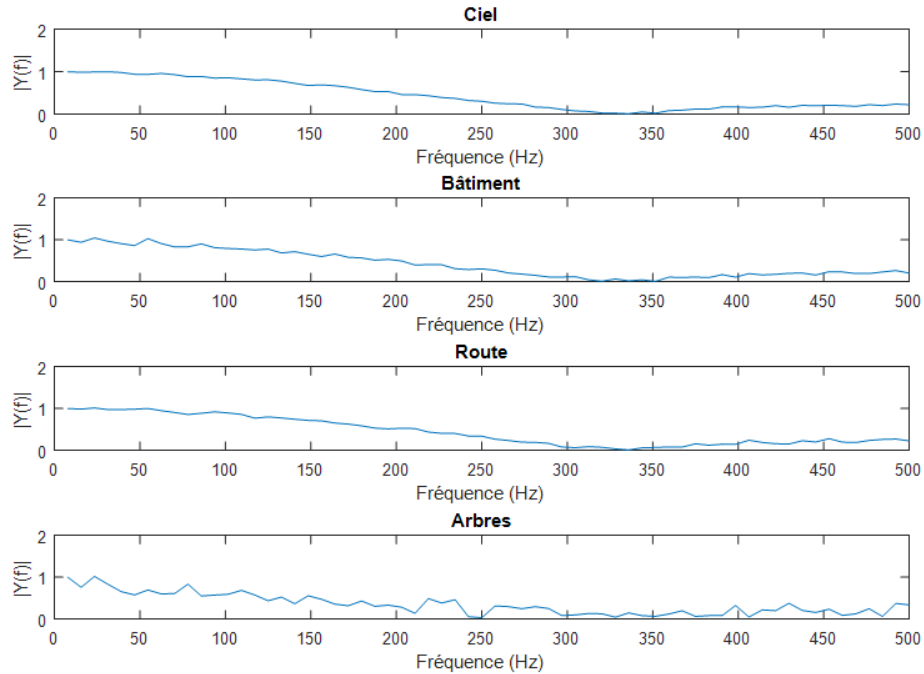


Figure IV.21 Spectres des signaux bruts du fond statique

L'analyse de plusieurs centaines d'images brutes de l'ensemble de la scène montre que les signaux du fond « statique » sont pour la plupart de faibles fréquences, éloignées de celle de modulation des feux à Leds.

IV.2.2 Caractérisation en mouvement

Nous avons effectué des expérimentations avec déplacements sur la route pour évaluer les cas où l'image d'un feu à Leds défile sur la matrice de pixels. Dans ce cas, le signal reçu dépend du dimensionnement de cette image, de la vitesse angulaire de défilement des objets, et de la structure géométrique intérieure des pixels. Nous avons fait des analyses dans les 2 cas suivants :

- Vitesse angulaire de feux « faible », où le temps de résidence de l'image est supérieur à la durée de traitement (10ms)
- Vitesse angulaire de feux « élevée », où le temps de résidence de l'image est inférieur à la durée de traitement (10ms)

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2, nous prenons en compte seulement la vitesse angulaire horizontale, parce que le mouvement horizontal est beaucoup plus important que le mouvement vertical, les cibles restant dans un plan quasi horizontal par rapport à la caméra.

Calcul de la vitesse angulaire limite :

La caméra observe un champ d'environ 130° en horizontal par l'ensemble de 864 colonnes de pixels. Donc chaque pixel observe un champ de :

$$\Delta\theta = \frac{130 \times \frac{\pi}{180}}{864} \text{rad} = 2,6 \text{ mrad}$$

Cela correspond à une vitesse angulaire de limite $(d\theta/dt)_{T=10ms}$ où le temps de résidence est égal à la durée d'analyse de 10ms de :

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{T=10ms} = \frac{2,6 \text{ mrad}}{10 \text{ ms}} = 0,26 \text{ rad/s}$$

Si l'image du feu couvre plusieurs pixels, on peut considérer que le défilement de l'image est ralenti et que la vitesse angulaire devient plus petite.

IV.2.2.1 Scène à vitesses angulaires de feux « faibles »

Nous avons d'abord construit un montage de mesure où les feux à Leds restaient devant la caméra en statique, près de l'axe d'observation, et éclairaient la caméra. Nous avons fait des enregistrements des vidéos pendant 1s environ, à des positions différentes, avec le véhicule « suiveur » roulant à des différentes vitesses.

L'installation des feux à Leds est identique à celle des enregistrements en statique (figure IV.22), avec le feu DRL 2 près de l'axe de la caméra, le feu DRL 1 et la lanterne situés respectivement 5 mètres à gauche et 2 mètre à droite (distances horizontales) de cet axe.

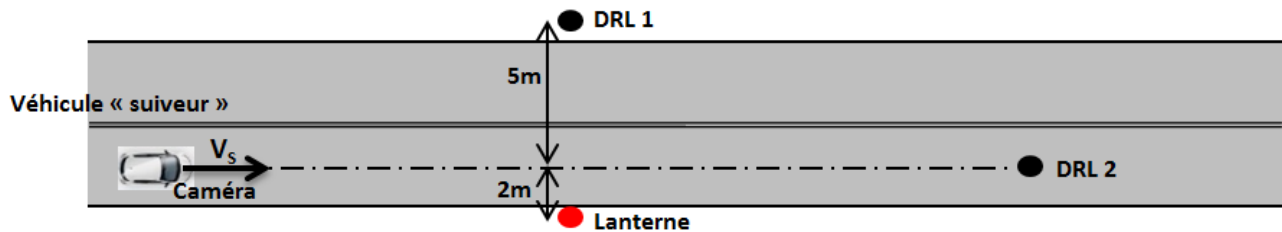


Figure IV.22 Scène à « faibles » vitesses angulaires de feux

Les feux demeurant immobiles, le véhicule porteur de la caméra roulait à la vitesse V_s suivant l'axe longitudinal. Les tableaux IV-4, IV-5 et IV-6 donnent les vitesses angulaires $(d\theta/dt)$ en rad/s respectives des feux, DRL 1, DRL 2 et lanterne de signalisation, pour les vitesses de roulage et les distances données. Les expérimentations correspondant aux cellules en gris n'ont pas été réalisées. Chaque essai comporte 4000 images, soit 1 s de roulage.

Tableau IV-4 Vitesses angulaires horizontales théoriques pour les essais avec le feu DRL 1

Distance longitudinale du feu au capteur (m) \ V_s (km/h)	20	40	60	80	100
30	0,10	0,05	0,03	0,03	0,02
50	0,17	0,08	0,06	0,04	0,03
70	0,24	0,12	0,08	0,06	
80		0,14			

Tableau IV-5 Vitesses angulaires horizontales théoriques pour les essais avec le feu DRL 2

Distance longitudinale du feu au capteur (m) V_s (km/h)	100	120	140	160	180	200
30	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	
70	0	0	0	0		
80		0				

Tableau IV-6 Vitesses angulaires horizontales théoriques pour les essais avec la lanterne de signalisation

Distance longitudinale du feu au capteur (m) V_s (km/h)	20	40	60	80	100
30	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
50	0,07	0,03	0,02	0,02	0,01
70	0,09	0,05	0,03	0,02	
80		0,05			

La vitesse angulaire du feu DRL 1 et de la lanterne est proportionnelle à la vitesse de roulage de la caméra, et inversement proportionnelle à leur distance à celle dernière. En ce qui concerne le feu DRL 2 qui est situé sur l'axe de la caméra, sa vitesse angulaire est nulle et son image reste sur le même pixel pendant les échantillonnages.

Puis nous avons étudié le mouvement horizontal du signal entre des pixels voisins à la même vitesse de roulage. Nous avons pris l'exemple ici des essais en présence du feu DRL 1, avec vitesse de roulage de 30 km/h, et distance de 40m suivant de l'axe de la caméra. Un premier examen sur des images brutes montre que son image est comprise dans plusieurs pixels. Nous avons pris trois pixels voisins, appelons respectivement de gauche à droite N-1, N, N+1, comme le montre la figure IV.23 ci-dessous.

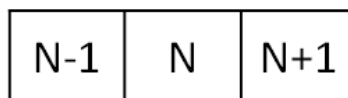


Figure IV.23 Trois pixels voisins de l'image du feu DRL 1

Le signal en sortie du pixel N sur 800 images brutes est présenté sur la figure IV.24.

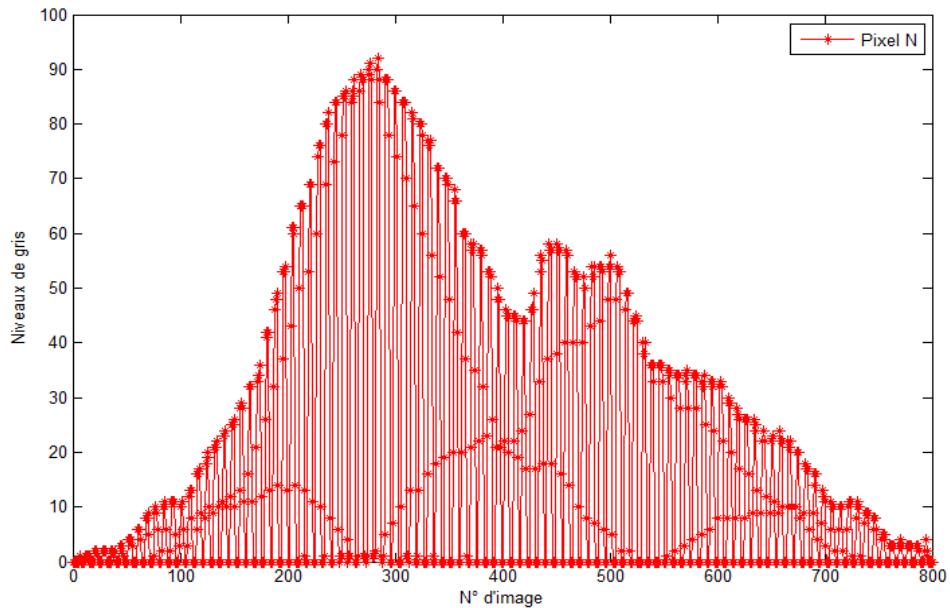


Figure IV.24 Signaux bruts du pixel N (feu DRL 1 à 40m 30km/h)

On voit que le signal issu du feu à Leds commence à entrer le pixel, et que la réponse du pixel devient plus importante. L'amplitude de la modulation est devenue maximum lorsque le pixel est couvert par l'image du feu, et a descendu au fur et à mesure lorsque l'image du feu est partie du pixel.

La figure IV.25 ci-dessous montre les signaux bruts en sortie des pixels N-1, N et N+1, ce qui démontre le défilement de l'image d'un pixel à l'autre.

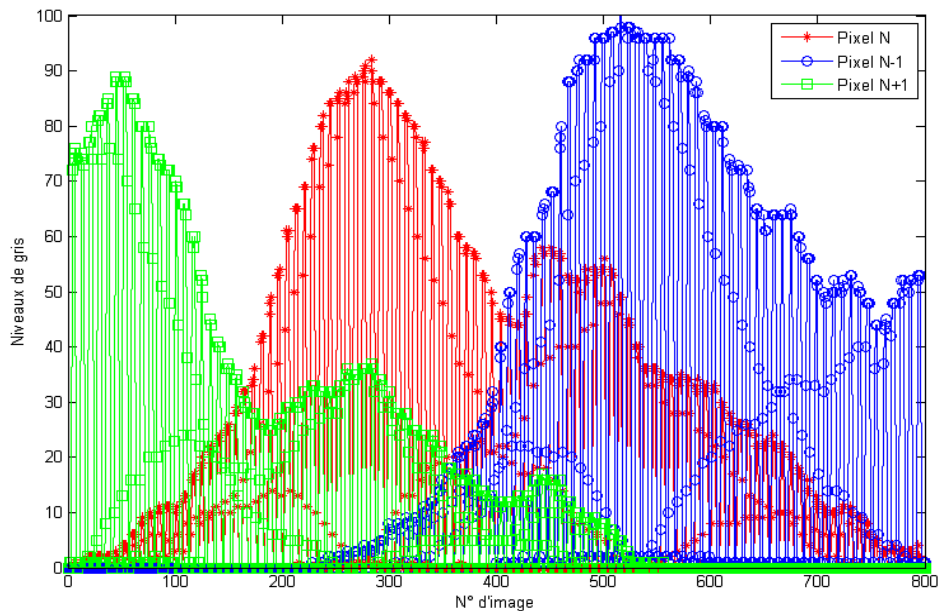


Figure IV.25 Signaux bruts des pixels N-1, N et N+1 (feu DRL 1 à 40m 30km/h)

Il en résulte que le décalage entre les signaux est d'environ 220 images, ce qui correspond à une durée Δt de :

$$\Delta t = 220 \times \frac{1}{4000} s = 55ms$$

Ainsi, la vitesse angulaire mesurée expérimentalement est :

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{DRL1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \approx 0,05 \text{ rad/s}$$

Cette valeur est cohérente avec celle de 0,05 rad/s donnée par le calcul géométrique du tableau 4.

Ensuite nous avons analysé les essais d'une vitesse de roulage différente, de 70 km/h, la distance longitudinale du feu DRL 1 au capteur étant 40m (pareil que celle dans le 1^{er} cas étudié). La figure IV.26 ci-dessous montre les signaux de trois pixels voisins :

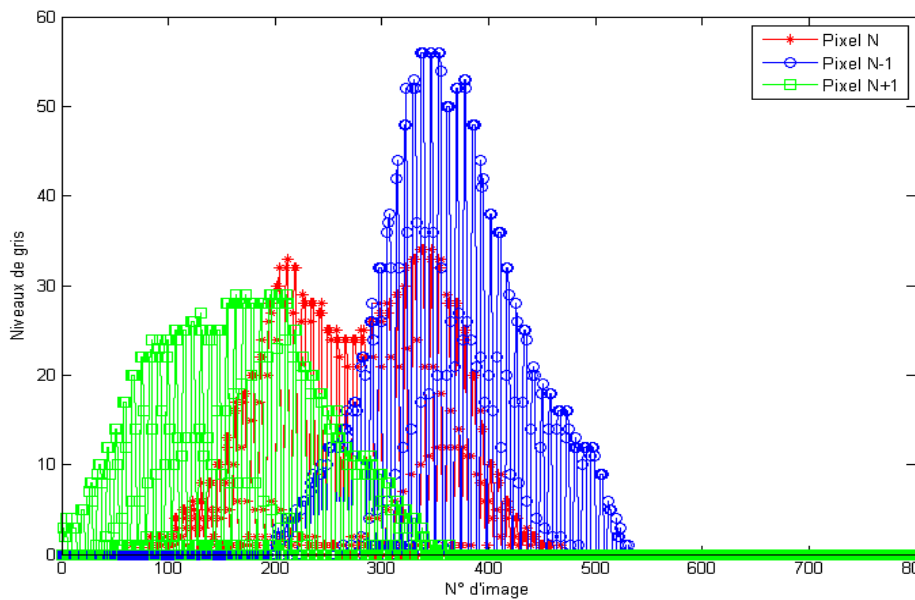


Figure IV.26 Signaux bruts donnés par l'image du feu DRL 1 (à 40m 70km/h) sur 3 pixels voisins

Les trois signaux sont décalés l'un l'autre d'environ 100 images, ce qui correspond à une période Δt pendant laquelle le signal a traversé un pixel :

$$\Delta t = 100 \times \frac{1}{4000} s = 25ms$$

La vitesse angulaire mesurée expérimentalement est donc :

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{DRL1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2,6mrad}{25ms} \approx 0,11 \text{ rad/s}$$

De même, nous avons analysé d'autres séquences enregistrées avec le feu DRL 1, et ceci nous a donné des vitesses angulaires horizontales entre le feu et la caméra mesurées expérimentalement, comme le montre le tableau IV-7 ci-dessous. Nous avons mis « N.D. » pour « Non Disponible », si les données enregistrées ne permettent pas d'obtenir de résultat d'analyse.

Tableau IV-7 Vitesses angulaires horizontales mesurées pour les essais avec le feu DRL 1

$d\theta/dt$ mesurée (rad/s)	Distance longitudinale du feu au capteur (m)				
V_s (km/h)	20	40	60	80	100
30	0,10	0,05	0,03	N.D.	N.D.
50	0,26	0,07	0,04	N.D.	N.D.
70	0,23	0,11	0,07	0,06	
80		0,12			

En comparant avec le tableau IV-4, on notera que les données mesurées sont cohérentes avec la théorie, avec des écarts de l'ordre de 5% - 15%. Indiquer sur le tableau IV-7, entre parenthèses, le pourcentage d'écart avec les valeurs correspondantes du tableau 4.

Pareillement les analyses sur la lanterne de signalisation nous ont donné les résultats de mesures, montrés dans le tableau IV-8.

Tableau IV-8 Vitesses angulaires horizontales mesurées pour les essais avec la lanterne de signalisation

$d\theta/dt$ mesurée (rad/s)	Distance longitudinale du feu au capteur (m)				
V_s (km/h)	20	40	60	80	100
30	0,05	0,02	N.D.	N.D.	N.D.
50	N.D.	0,04	N.D.	N.D.	N.D.
70	0,11	0,04	N.D.	0,03	
80		N.D.			

Ce tableau montre que les mesures pour la lanterne de signalisation sont cohérentes avec les calculs théoriques, avec cependant des écarts de l'ordre de 10%. Certaines valeurs toutefois ont dû être écartées, le niveau de signal étant insuffisant.

En ce qui concerne le feu DRL 2, nous avons constaté que son image est restée sur le même pixel pendant la durée d'une acquisition, et que les signaux de sortie de pixel étaient assez stables tout au long des essais.

Pour conclure, nous avons montré par les résultats expérimentaux que la loi du dynamique du signal sur la matrice de détecteurs correspondent assez bien aux calculs théoriques. Les différences éventuelles entre les valeurs théoriques et expérimentales peuvent s'expliquer par les raisons suivantes :

- Les pixels de la caméra ne sont pas 100% photosensibles. En effet, le taux de remplissage d'un capteur CMOS est assez faible (typiquement 60%) et ainsi, une grande partie de la surface d'un pixel est « opaque », ce qui ne permet pas de détecter la totalité du signal incident.
- De même, il existe une zone non sensible entre pixels voisins, et le flux incident sur cette zone n'est pas détecté.

Pour améliorer la précision de ces mesures, il faut connaître la structure interne du pixel et disposer de sources étendues homogènes, ce qui n'est pas le cas des feux à Leds automobiles.

IV.2.2.2 Scène à vitesses angulaires de feux « élevées »

Nous avons également effectué des roulages où les vitesses angulaires étaient plus importantes que la limite de 0,26 rad/s imposée par le temps de résidence minimal de 10 ms. Pour illustrer ce cas, nous avons fait rouler le véhicule « cible » porteur des feux à Leds sur une route perpendiculaire à l'axe de la caméra, le véhicule « suiveur » était immobile, comme le montre la figure IV.27. La largeur des routes est 7m, la distance entre la caméra et le bord de la route est 15m, et le véhicule « cible » a été pris en charge par la caméra à une distance d'environ 60m de l'intersection. La vitesse de roulage du véhicule « cible », V_0 , était égale à 30km/h soit environ 8,3 m/s.

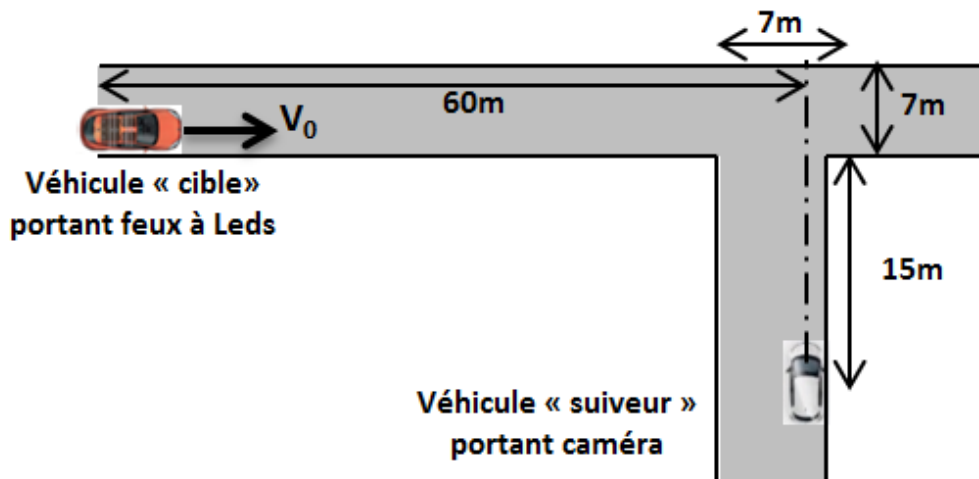


Figure IV.27 Schéma du scénario de « grandes » vitesses angulaires

Une image de la scène est présentée sur la figure IV.28, où le véhicule « cible » arrive près du centre de champ de vision horizontal de la caméra.



Figure IV.28 Image brute du scénario de « grandes » vitesses angulaires

Un simple calcul montre que la vitesse angulaire du feu à Leds est égale à 0,04 rad/s lorsque le véhicule « cible » est situé en bord du champ (à 60m), et à 0,45 rad/s lorsqu'il est situé sur l'axe de la caméra. Nous présentons ci-après donc les résultats d'analyse des signaux issus des Leds modulées durant le roulage du véhicule « cible ». Le principe d'analyse est identique que celui utilisé dans le paragraphe IV.3.2.1.

Nous avons d'abord pris en compte 120 images brutes où le véhicule est à 3 m de l'axe de la caméra, ce qui présente une vitesse angulaire de 0,44 rad/s. Les signaux bruts des pixels correspondant à la modulation de Leds sont montrés sur la figure IV.29.

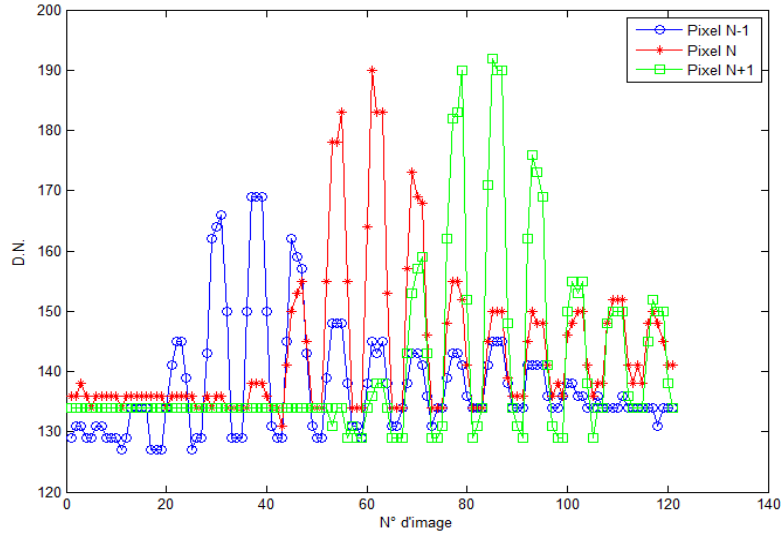


Figure IV.29 Signaux bruts des pixels correspondant à l'image du feu DRL

L'écart entre les modulations étant 22 images brutes, le temps mis par le signal pour parcourir un pixel est 5,5ms. Ainsi, la vitesse angulaire mesurée est :

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{exp} = \frac{2,6}{5,5} \text{ rad/s} \approx 0,47 \text{ rad/s}$$

Cette vitesse mesurée est compatible avec la valeur théorique compte tenu de la précision des mesures.

IV.2.2.3 Signaux du fond

Nous avons effectué la même analyse spectrale sur les signaux du fond de scène en mouvement, que celle présentée dans la section IV.2.1 c). Les spectres obtenus pour les mêmes types d'objets (ciel, bâtiment, route, arbres), pour une vitesse de roulage de 30km/h, sont montrés sur la figure IV.30.

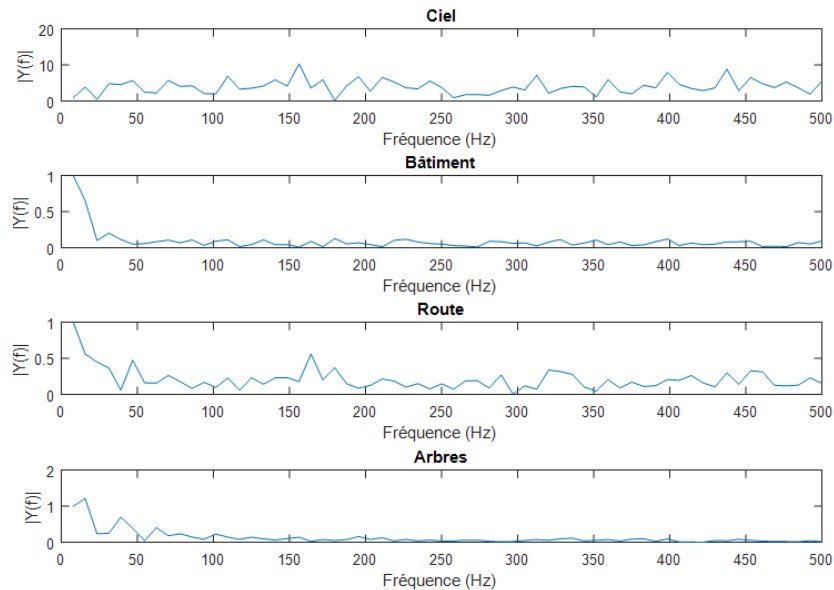


Figure IV.30 Spectres des signaux bruts du fond avec vitesse de roulage de 30km/h

L'analyse sur l'ensemble des données montre que, les signaux à fluctuations rapide, comme les signaux de la route ou du ciel, peuvent introduire des composantes fréquentielles proches de la fréquence de modulation. Cependant, ce sont souvent des faibles modulations, et la différence entre les valeurs maximale et minimale de la modulation est de quelque DN.

IV.3 Évaluation sur la détection des feux à Leds

Nous présentons dans ce paragraphe le résultat de l'évaluation des filtres numériques sur trois types de scénarii routiers enregistrés :

- en statique
- Vitesse angulaire de feux « faible », où le temps de résidence de l'image est supérieur à la durée de traitement (10ms)
- Vitesse angulaire de feux « élevée », où le temps de résidence de l'image est inférieur à la durée de traitement (10ms)

Nous avons évalué la performance de chaque filtre en terme de probabilité de détection des « cibles » recherchées. Ci-dessous le tableau IV-9 montre les valeurs de seuil utilisées pour chaque filtre, qui ont été choisies selon les calculs théoriques présentés dans le chapitre 3 :

Tableau IV-9 Valeurs de seuils utilisées pour l'évaluation des trois filtres numériques

Filtre	Sur signaux d'entrée bruts			Sur signaux d'entrée normalisés		
« classique »	5	10	15	0,6	0,65	0,7
« 4-phases »	6	12	18	1	1,05	1,1
« multicanaux »	5	10	15	1,8	1,9	2

IV.3.1 Scénarii en statique

On présente ici les différents stades des traitements proposés dans le cas d'une scène statique (cibles et fond), qui est évidemment la configuration la plus favorable pour le filtrage des signaux utiles, qui sont modulés pendant toute la durée du traitement et l'élimination des signaux de fond, qui, eux, sont quasi constants ou du moins, comme on l'a déjà montré, ne présentent pas de composante appréciable à la fréquence de signal de 500 Hz.

Les enregistrements d'images brutes à 4000 Hz nous ont permis d'obtenir les nombres suivants d'images calculées à 100 Hz par sommation de 40 images successives, donnés sur le tableau IV-10, pour les feux DRL et pour la lanterne, à chaque distance d'enregistrement :

Tableau IV-10 Nombre d'images calculées à 100 Hz sur scène statique (pour feux DRL et lanterne)

	20m	30m	40m	60m	80m	100m	120m	140m	160m
Feux DRL	3	12	12	3	15	3	12	3	12
Lanterne	3		12	3	15				

Nous prenons l'exemple du scénario où le feu à Leds DRL 1 et la lanterne sont à 20m, et le feu DRL 2 à 100m (configurations en gras sur le tableau IV-10). La présentation en 3D de niveau de gris de la scène est montrée sur la figure IV.31 ci-dessous, où l'on voit que les signaux issus des feux à Leds ne sont pas

identifiables et détectables par rapport aux signaux de forts niveaux de gris issus du fond par leur niveau moyen.

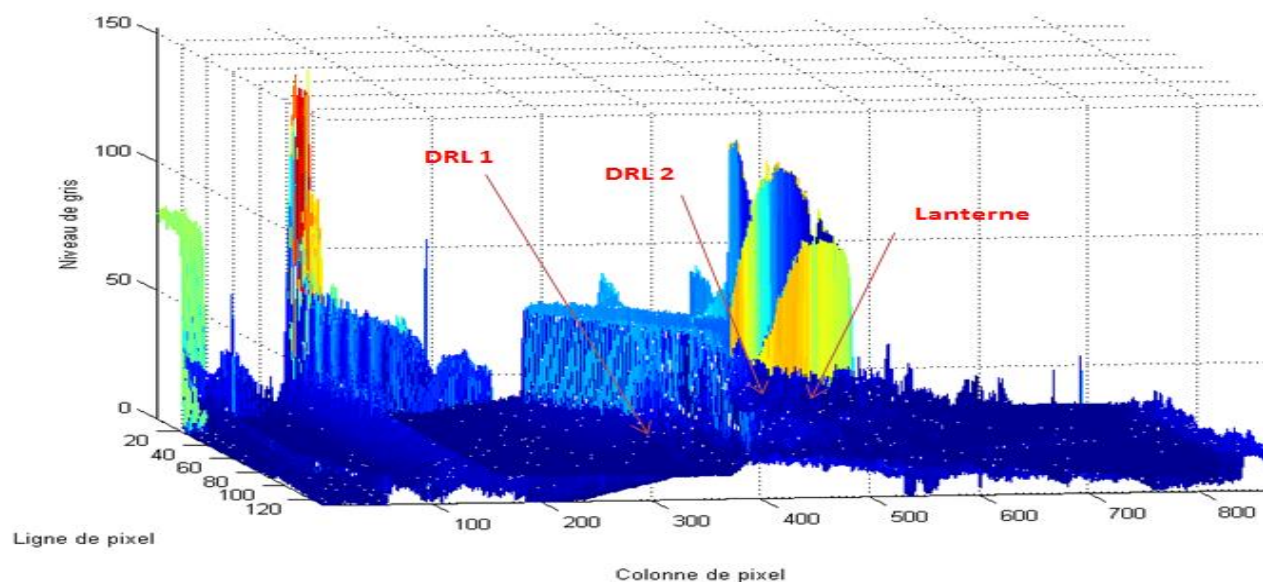


Figure IV.31 Présentation 3-dimensionnelle de l'image de la scène

La première étape de filtrage sur une séquence de 40 images consécutives (42 dans le cas du filtrage « multicanaux »), sans normaliser les signaux bruts, conduit aux images calculées, respectivement pour les filtres « classique », « 4-phases », et « multicanaux », présentées sur la figure IV.32.

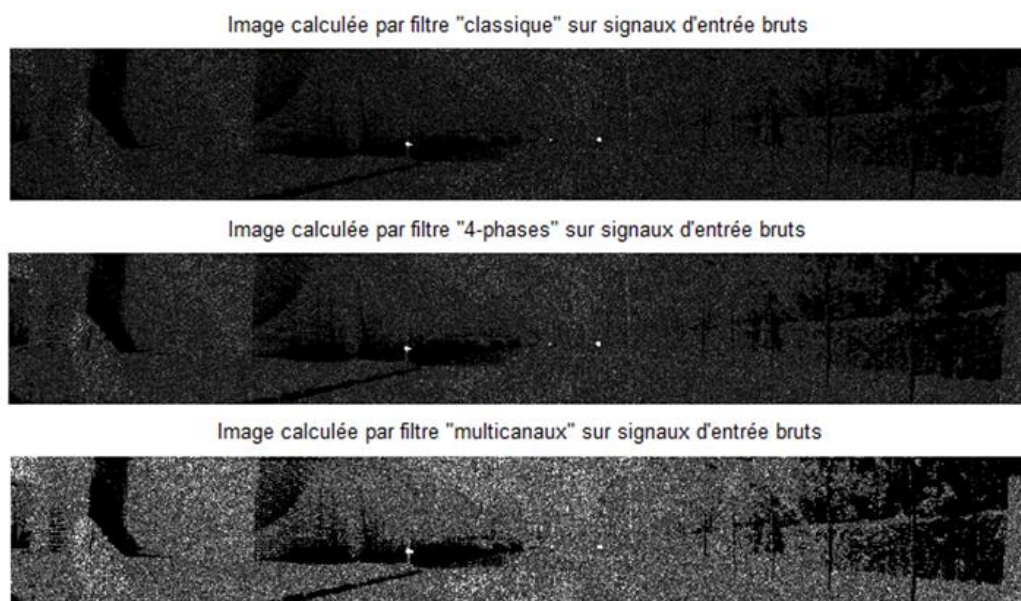


Figure IV.32 Exemples d'images calculées par les trois filtres sur signaux d'entrée bruts

Les présentations 3-dimensionnelles de ces trois images calculées sont montrés sur la figure IV.33, où l'on constate que le fond a été fortement réduit, de sorte que les signaux des feux sont devenus très faciles à sélectionner.

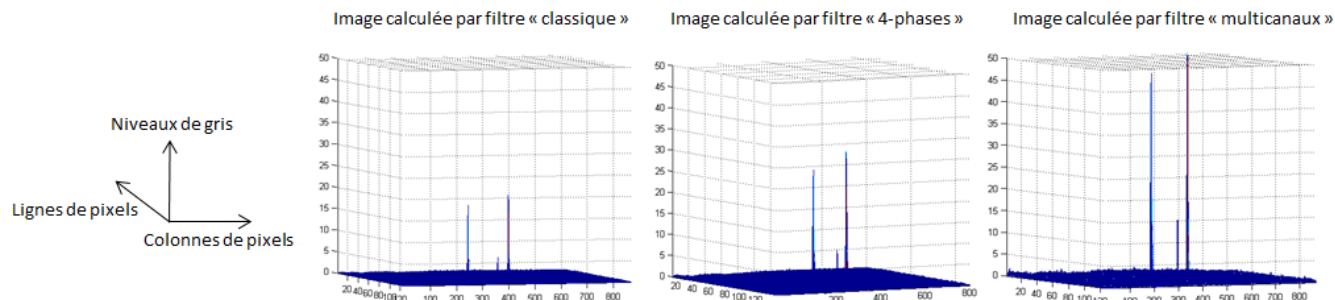


Figure IV.33 Présentation 3-dimensionnelle des images de la figure IV-31

Pour rejeter encore plus efficacement le fond (et si possible l'éliminer) et ainsi faciliter la détection des cibles utiles, nous avons effectué un seuillage sur chacune des images calculées. La figure IV.34 présente un exemple d'images obtenu après seuillage, pour chaque type de filtre : les valeurs des seuils utilisés sont respectivement de 5 DN pour le filtre « classique », 6 DN pour le filtre « 4-phases », et 5 DN pour le filtre « multicanaux ». On voit que les seuls points lumineux qui sont détectés correspondent au feu DRL 1 et à la lanterne, qui sont à 20 mètres du capteur. Le feu DRL 2 (à 100m) n'est pas détecté parce que son signal en sortie du filtre est inférieur à la valeur de seuil. On constate par ailleurs que, sur une telle scène statique, il n'y a aucune fausse détection sur le fond.

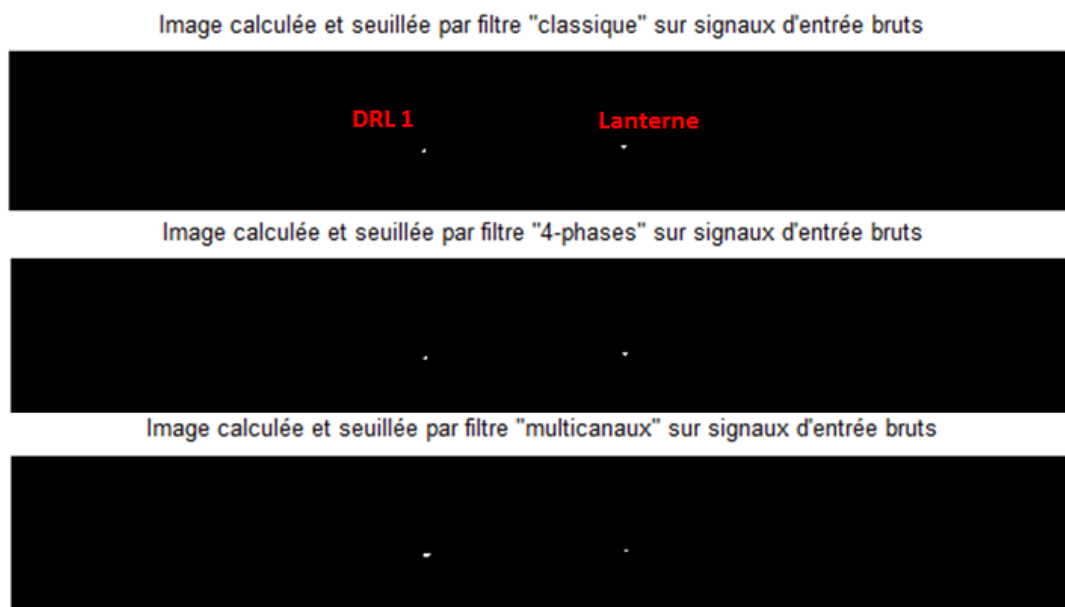


Figure IV.34 Exemples d'images calculées et seuillées par les trois filtres sur signaux d'entrée bruts

La seconde étape de filtrage sur la même séquence d'images consécutives, mais après normalisation des signaux bruts, conduit aux images calculées, montrées sur la figure IV.35 ci-dessous.

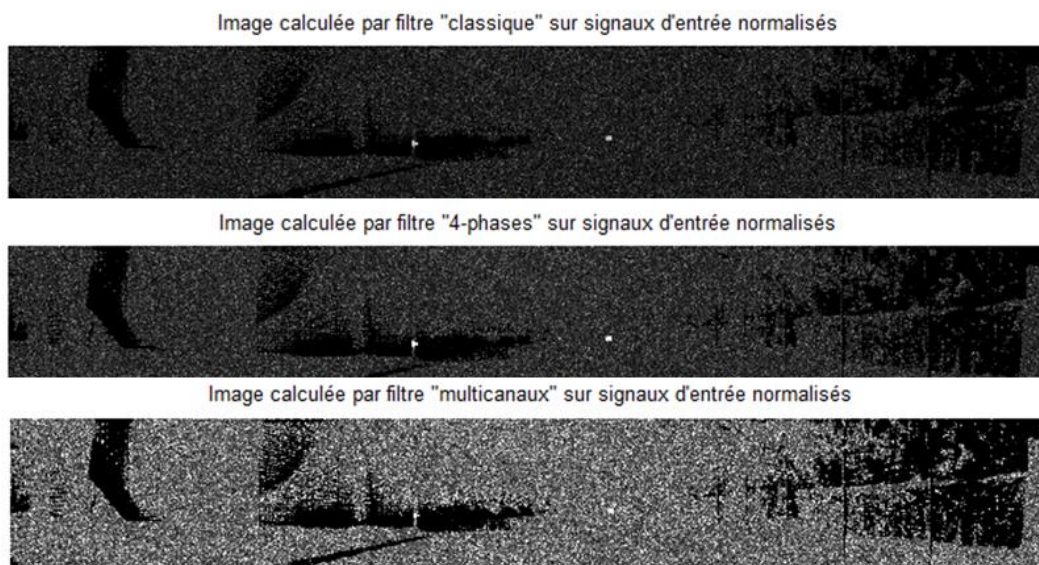


Figure IV.35 Exemples d'images calculées par les trois filtres sur signaux d'entrée normalisés
Après application du seuillage sur ces images, on obtient les résultats montrés sur la figure IV.36, avec les valeurs de seuil de 0,65 pour le filtre « classique », 1,05 pour le filtre « 4-phases », et 1,9 pour le filtre « multicanaux ». Les trois feux à Leds, le DRL 1, le DRL 2 et la lanterne, ont été détectés. Comme dans le stade précédent, il n'y a pas de fausse détection sur le fond.

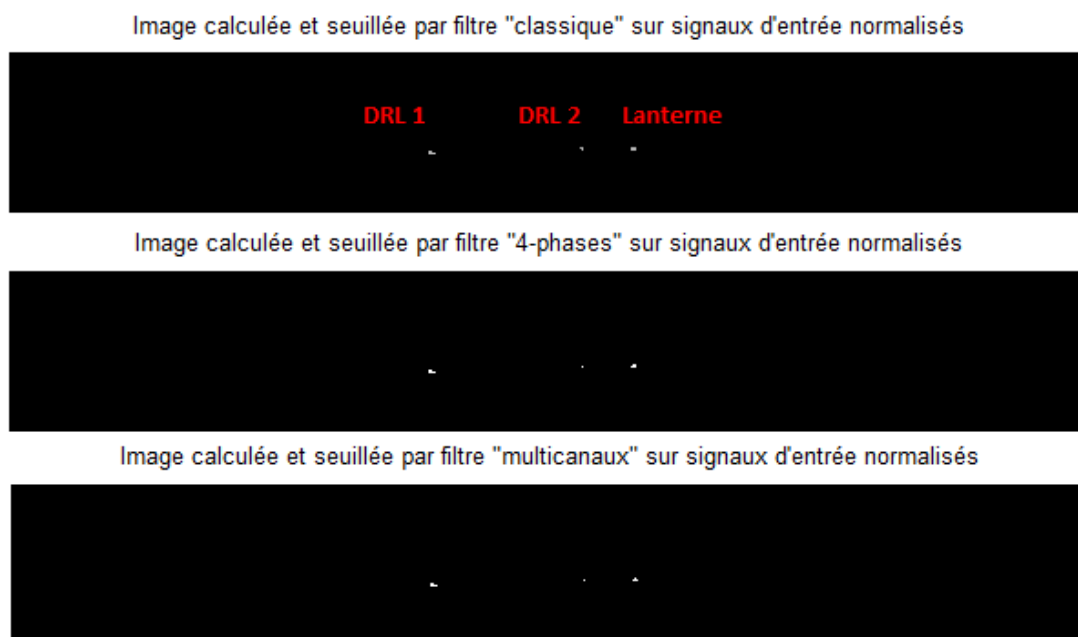


Figure IV.36 Exemple d'images calculées et seuillées par les trois filtres sur signaux d'entrée normalisés
En ce qui concerne le filtrage sur signaux d'entrée bruts, les résultats d'analyse pour les feux DRL et pour la lanterne sont respectivement montrés sur les tableaux IV-11 et IV-12. Le nombre d'images traitées est toujours celui du tableau 10, rappelé entre parenthèses sur la première ligne.

Tableau IV-11 Nombre de détection des feux DRL à 100 Hz (cibles statiques, signaux d'entrée bruts)

Distance(m) Filtre et seuil utilisés	20 (3)	30 (12)	40(12)	60 (3)	80(15)	100 (3)	120(12)	140(3)	160(12)
« classique » 5	3	12	12	2	12	2	0	0	0
« classique » 10	3	12	12	0	0	0	0	0	0
« classique » 15	3	12	12	0	0	0	0	0	0
« 4-phases » 6	3	12	12	2	12	3	0	0	0
« 4-phases » 12	3	12	12	0	0	0	0	0	0
« 4-phases » 18	3	12	12	0	0	0	0	0	0
« multicanaux » 5	3	12	12	3	13	3	0	0	0
« multicanaux » 10	3	12	12	3	12	3	0	0	0
« multicanaux » 15	3	12	12	1	12	0	0	0	0

Tableau IV-12 Nombre de détection de la lanterne à 100 Hz (cible statique, signaux d'entrée bruts)

Distance(m) Filtre et seuil utilisés	20(3)	40(12)	60(3)	80(15)
« classique » 5	3	12	0	0
« classique » 10	3	0	0	0
« classique » 15	3	0	0	0
« 4-phases » 6	3	12	0	2
« 4-phases » 12	3	0	0	0
« 4-phases » 18	3	0	0	0
« multicanaux » 5	3	12	2	12
« multicanaux » 10	3	12	0	3
« multicanaux » 15	3	10	0	0

Il en résulte que la probabilité de détection d'un feu DRL est de 100% pour tous les filtres jusqu'à 40m, et qu'elle se dégrade à plus longues distances. Au-delà de 120m, aucun filtre ne permet de détecter le feu, avec les valeurs de seuils utilisées. En ce qui concerne la lanterne, on ne peut la détecter avec les traitements « classique » et « 4-phases » si on utilise la valeur de seuil la plus faible (5 DN et 6 DN), alors que le filtre « multicanaux » a permis de détecter jusqu'à 80m avec une valeur de seuil similaire (5 DN).

En ce qui concerne le filtrage sur signaux d'entrée normalisés, les résultats d'analyse pour les feux DRL et pour la lanterne sont respectivement montrés sur les tableaux IV-13 et IV-14.

Tableau IV-13 Nombre de détection des feux DRL à 100 Hz (cibles statiques, signaux d'entrée normalisés)

Distance(m) Filtre et seuil utilisés	20 (3)	30 (12)	40 (12)	60 (3)	80 (15)	100 (3)	120 (12)	140 (3)	160 (12)
« classique » 0,6	3	12	12	3	15	3	10	3	10
« classique » 0,65	3	12	12	3	15	3	10	3	10
« classique » 0,7	3	12	12	3	15	3	10	2	9
« 4-phases » 1	3	12	12	3	15	3	11	1	8
« 4-phases » 1,05	3	12	12	3	15	3	11	1	6
« 4-phases » 1,1	3	12	12	3	15	3	9	1	6
« multicanaux » 1,8	3	12	12	3	15	3	11	2	8
« multicanaux » 1,9	3	12	12	3	15	3	10	1	6
« multicanaux » 2	3	12	12	3	15	3	10	1	6

Tableau IV-14 Nombre de détection de la lanterne à 100 Hz (cible statique, signaux d'entrée normalisés)

Distance(m)	20 (3)	40 (12)	60 (3)	80 (15)
Filtre et seuil utilisés				
« classique » 0,6	3	12	3	12
« classique » 0,65	3	12	3	12
« classique » 0,7	3	12	3	12
« 4-phases » 1	3	12	3	12
« 4-phases » 1,05	3	12	3	12
« 4-phases » 1,1	3	12	3	12
« multicanaux » 1,8	3	12	3	12
« multicanaux » 1,9	3	12	3	12
« multicanaux » 2	3	12	3	12

Selon le tableau IV-13, le feu DRL a été détecté sur toutes les images par tous les filtres jusqu'à 100 mètres, quelle que soit la valeur du seuil appliquée. À partir de 120m, la probabilité de détection se dégrade lorsque la distance augmente. En ce qui concerne la lanterne, il résulte du tableau IV-14 qu'elle a été détectée par les 3 filtres sur toutes les images jusqu'à 60 mètres, et pour 12 images sur 15 à 80 mètres.

Les figures IV.37, IV.38 et IV.39 présentent la probabilité de détection des feux DRL respectivement par les trois filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ».

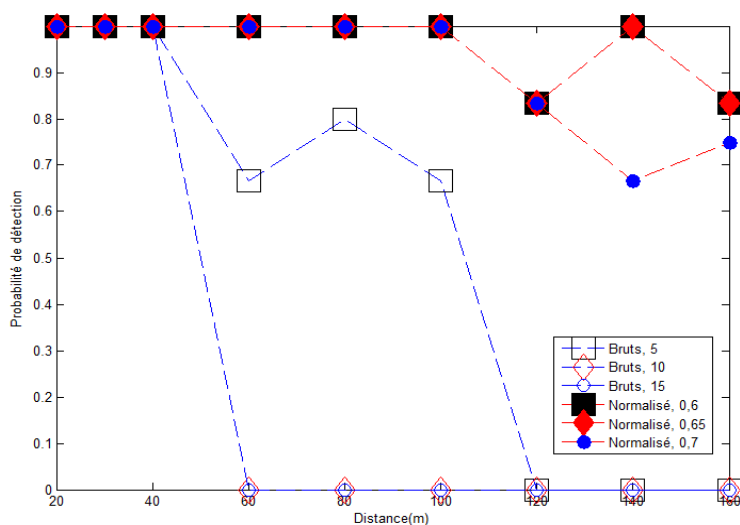


Figure IV.37 Probabilité de détection des feux DRL statique par filtre « classique »

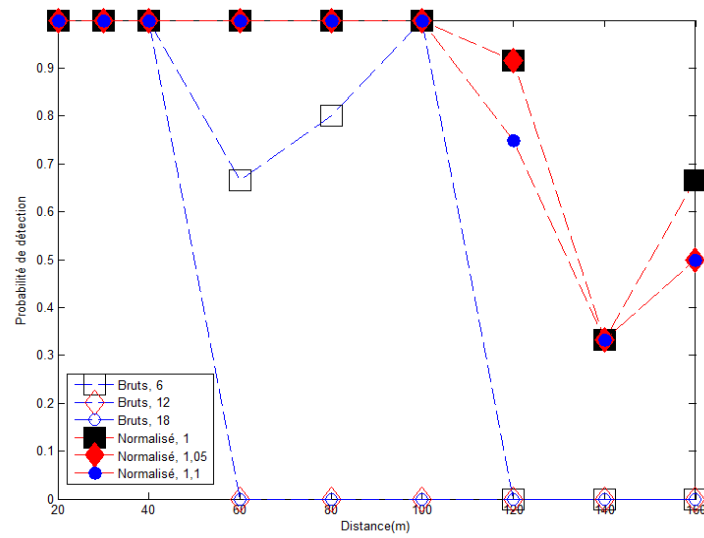


Figure IV.38 Probabilité de détection des feux DRL statique par filtre « 4-phases »

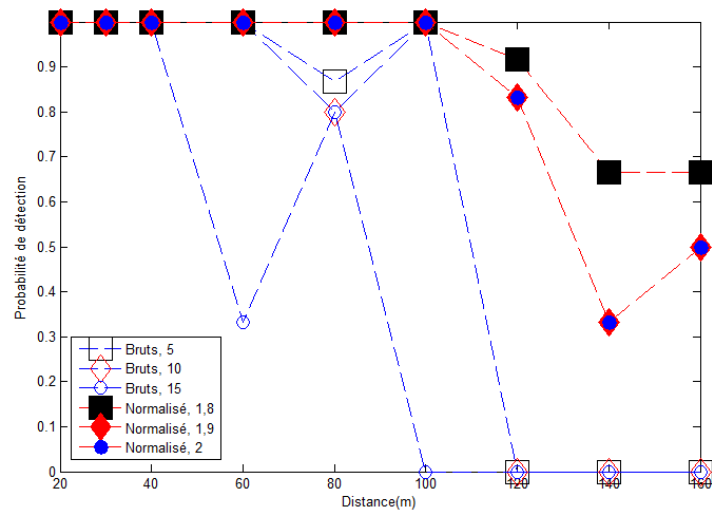


Figure IV.39 Probabilité de détection des feux DRL statique par filtre « multicanaux »

Les figures IV.40, IV.41 et IV.42 présentent la probabilité de détection de la lanterne respectivement par les trois filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ».

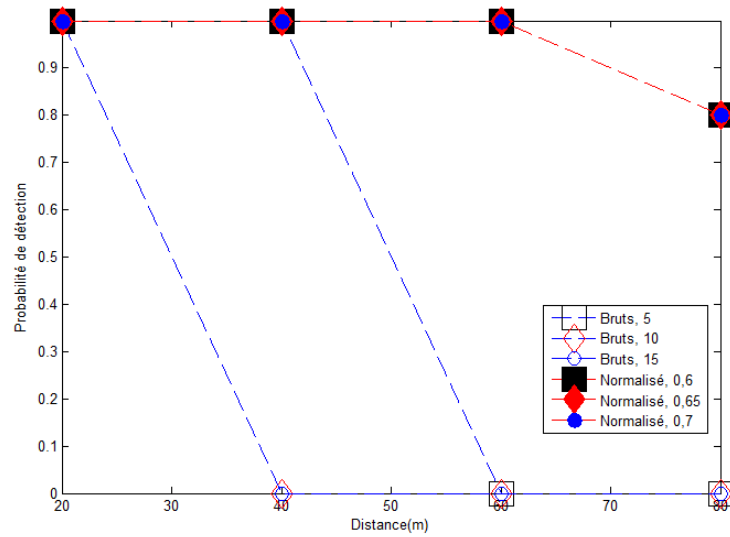


Figure IV.40 Probabilité de détection de la lanterne statique par filtre « classique »

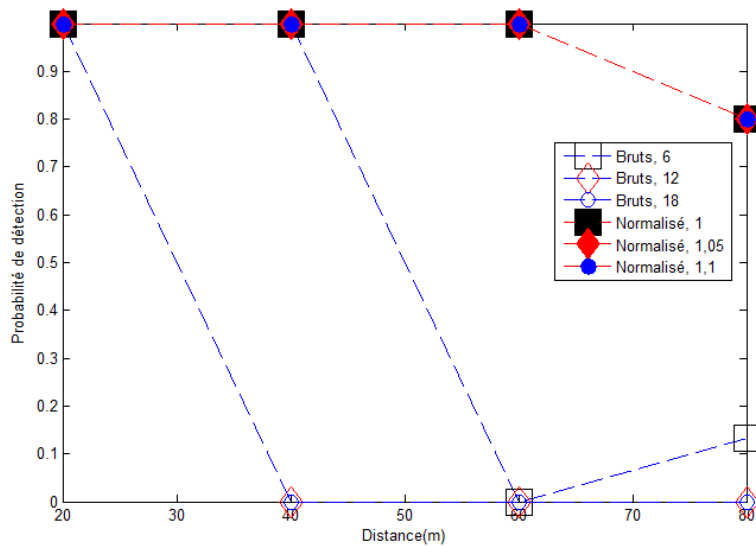


Figure IV.41 Probabilité de détection de la lanterne statique par filtre « 4-phases »

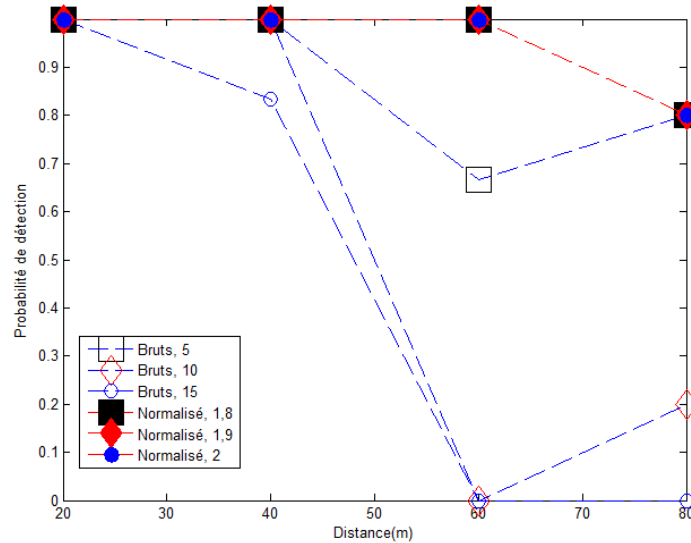


Figure IV.42 Probabilité de détection de la lanterne statique par filtre « multicanaux »

On voit que la normalisation des signaux bruts ainsi que le seuillage des niveaux de gris sur les images traitées apportent une amélioration importante sur la distance de détection des feux.

IV.3.2 Essais à vitesses angulaires de feux « faibles »

Des roulages avec vitesses angulaires de feux « faibles » ont été effectués sur une scène présentée dans le paragraphe IV.2.2.1, et comprenant 2 feux DRL et 1 lanterne. Nous avons obtenu 20 images calculées à 100 Hz pour chaque distance des feux, de 20m à 180m pour le DRL, de 20m à 100m pour la lanterne, et pour chaque vitesse de roulage différente.

Le principe d'évaluation est identique à celui utilisé pour la scène statique. Pareillement, nous avons établi les tableaux de synthèse de résultat sur nombre de détection des feux DRL et de la lanterne par chaque filtre et seuil, et nous avons obtenu les courbes de probabilité de détection ci-après. On rappelle que les vitesses angulaires correspondantes sont présentées dans les tableaux 4, 5 et 6.

- En ce qui concerne la détection des feux DRL

La figure IV.43 présente la probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique », avec vitesse de roulage de 30 km/h.

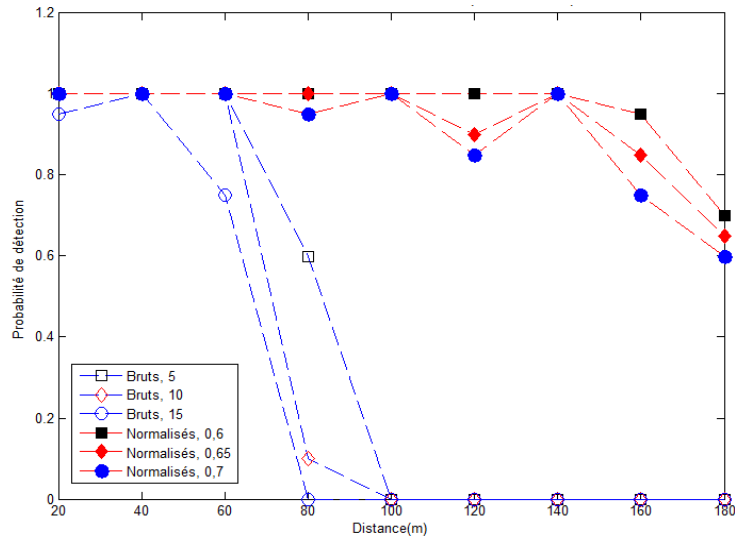


Figure IV.43 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 30 km/h)

À 60m, les seuillages à 5 DN et à 10 DN ont donné la même probabilité de détection de 100%. À 80m, on constate que pour le filtrage sur signaux bruts, la probabilité de détection décroît de 60% à 10% si on augmente le seuil de 5 DN à 10 DN. Ceci est lié à l'amplitude de modulation du signal, comme le montre la figure IV.44 ci-dessous.

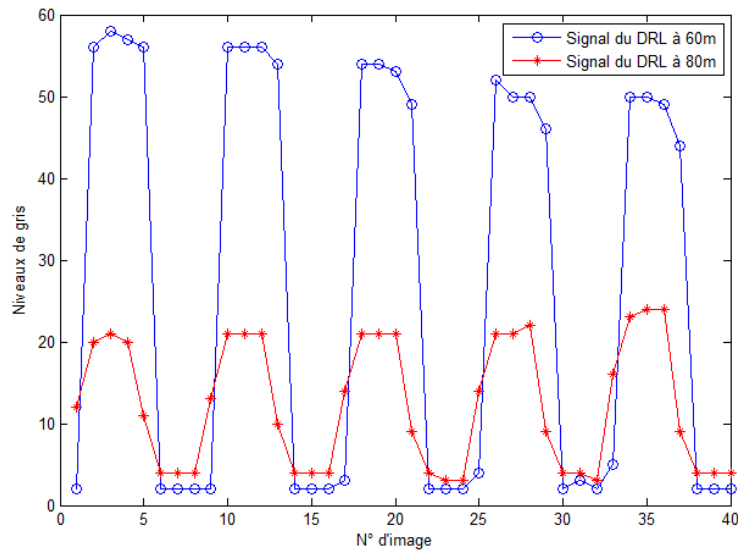


Figure IV.44 Signaux bruts du feu DRL à 60m et à 80m

On voit que l'amplitude de modulation est respectivement 56 DN et 20 DN à 60m et à 80m, ce qui donne une réponse en sortie du filtre « classique » de respectivement de 18,1 (à 60m) et de 7,4 (à 80m). Ainsi, on ne pourrait pas détecter ce signal avec le seuil de 10 DN lorsque le feu DRL est à 80m. Cependant, après la normalisation, tous les signaux, quel que soit leurs amplitude de modulation, passent à trois niveaux (-1, 0 et 1). Dans ce cas, on peut détecter le signal lointain avec nos propres seuils.

Les figures IV.45 et IV.46 ci-dessous présentent la probabilité de détection des feux DRL avec vitesse de roulage de 30 km/h, respectivement par les filtres « 4-phases » et « multicanaux ».

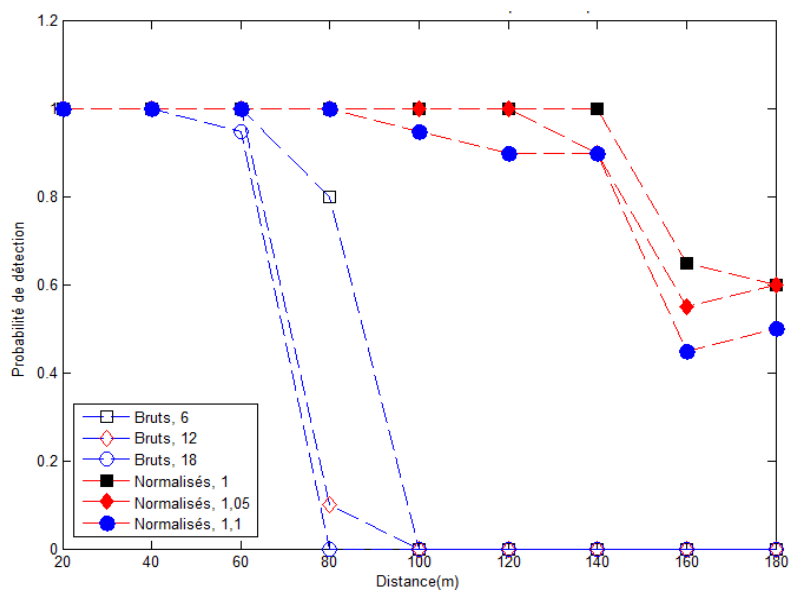


Figure IV.45 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 30 km/h)

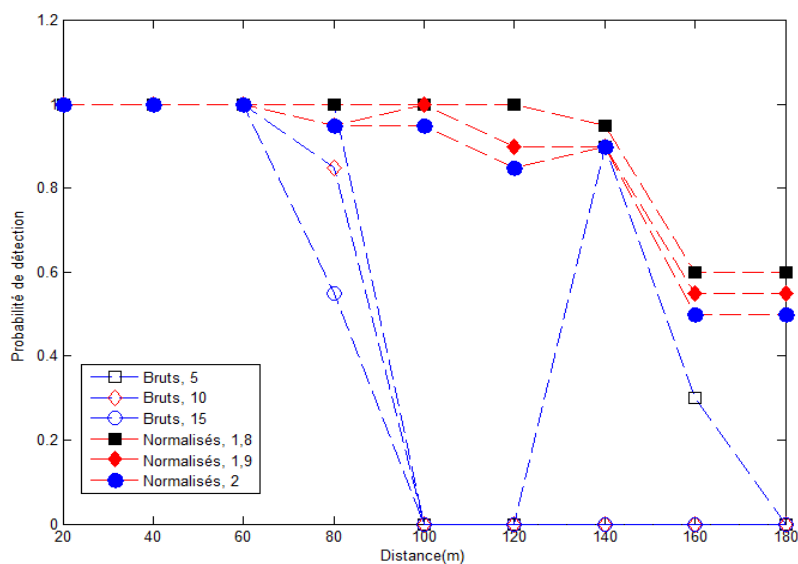


Figure IV.46 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 30 km/h)

Les figures IV.47, IV.48 et IV.49 présentent la probabilité de détection des feux DRL avec vitesse de roulage de 50 km/h, respectivement par les filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ».

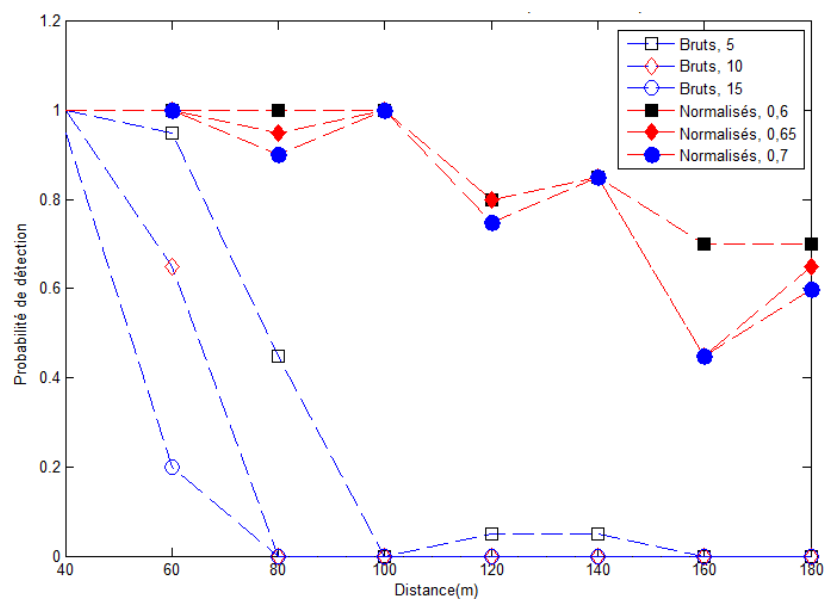


Figure IV.47 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 50 km/h)

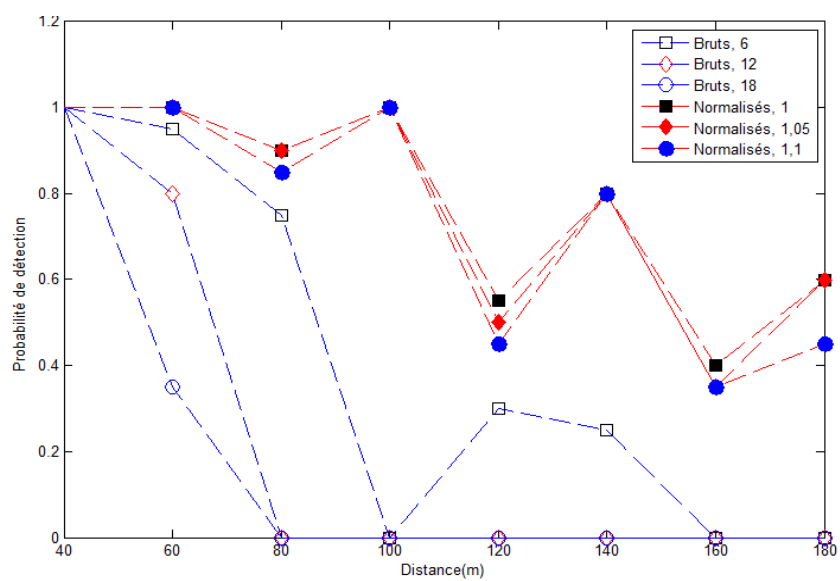


Figure IV.48 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 50 km/h)

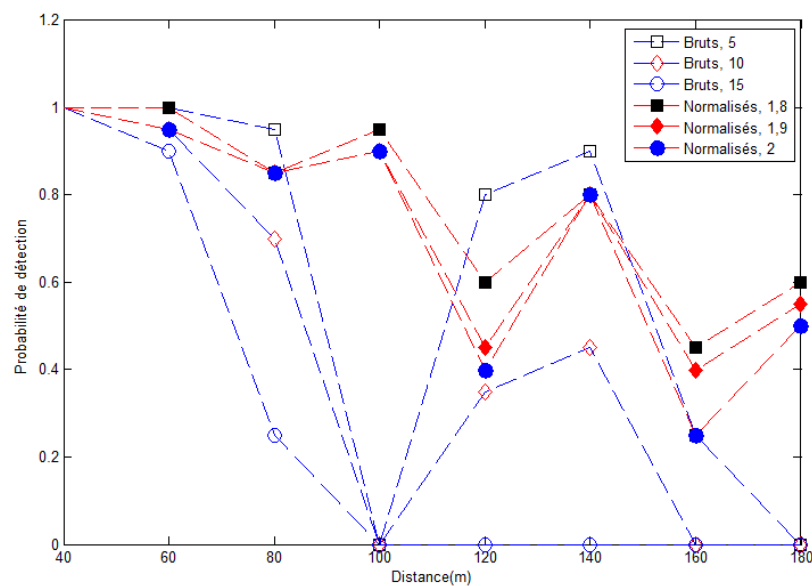


Figure IV.49 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 50 km/h)

Les figures IV.50, IV.51 et IV.52 présentent la probabilité de détection des feux DRL avec vitesse de roulage de 70 km/h, respectivement par les filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ».

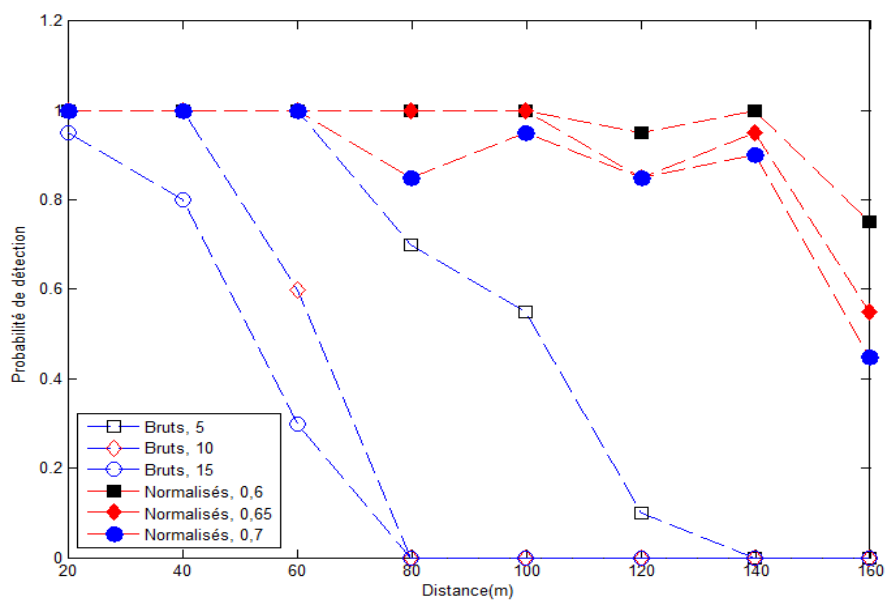


Figure IV.50 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 70 km/h)

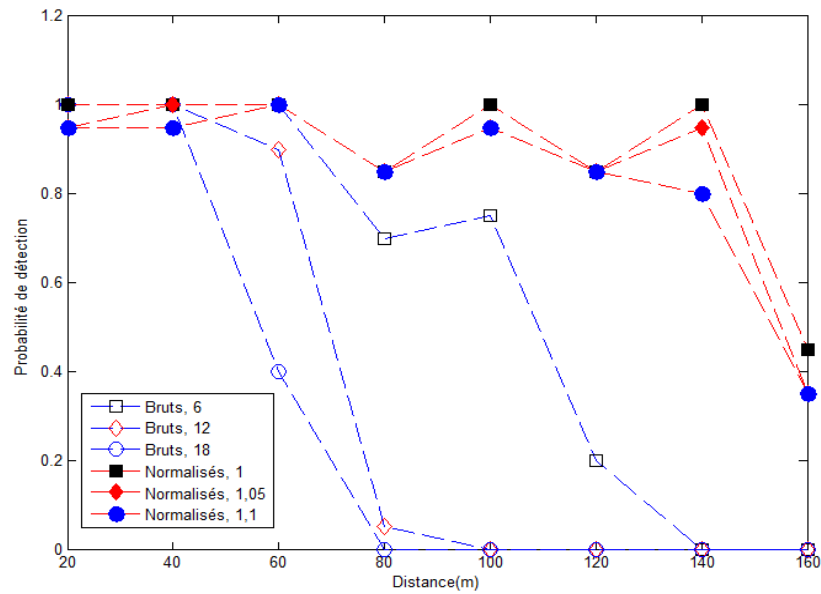


Figure IV.51 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 70 km/h)

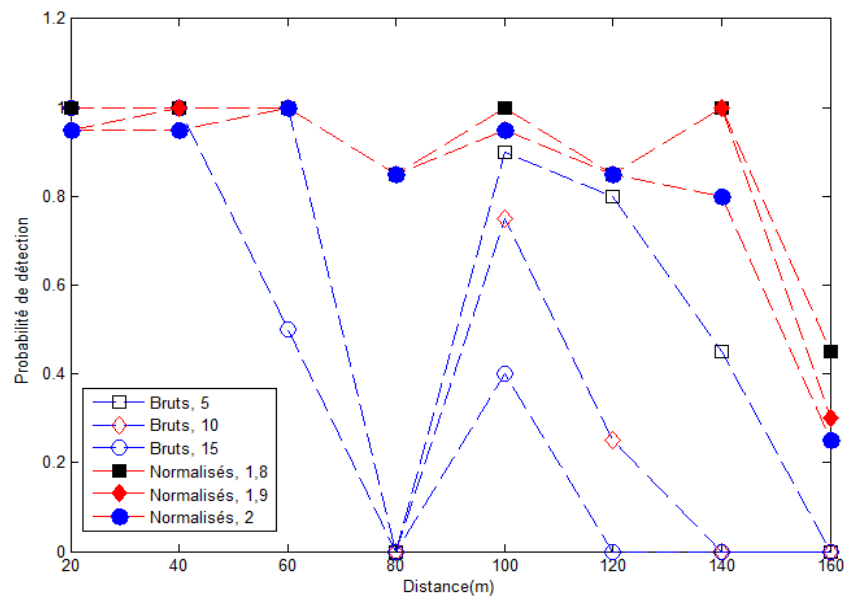


Figure IV.52 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 70 km/h)

Les figures IV.53, IV.54 et IV.55 présentent la probabilité de détection des feux DRL avec vitesse de roulage de 80 km/h, respectivement par les filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ». Seuls deux points de mesure sont disponibles, tracer une ligne entre eux n'avait pas de sens.

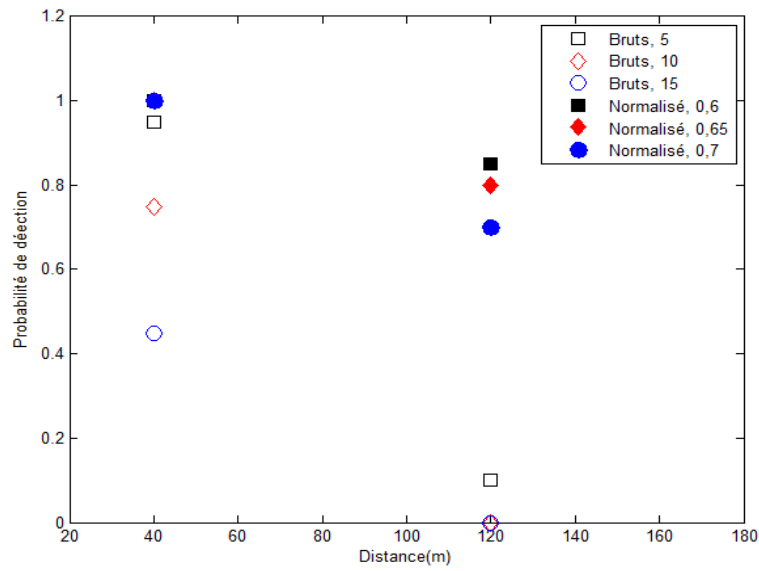


Figure IV.53 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 80 km/h)

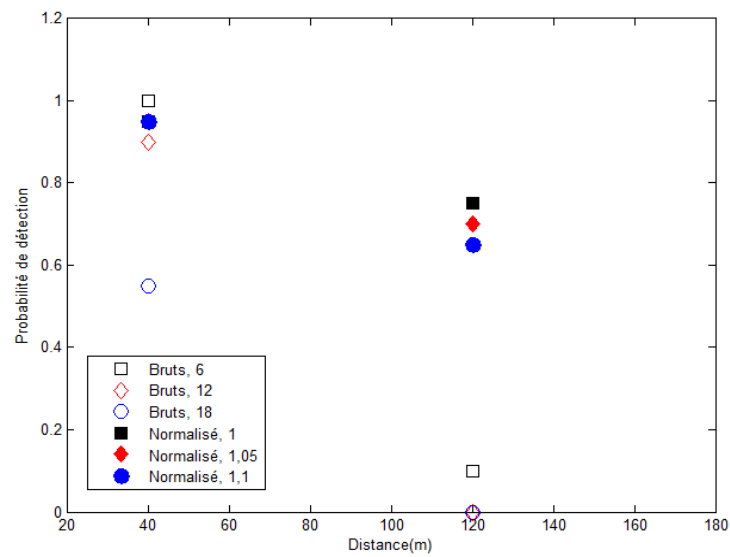


Figure IV.54 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 80 km/h)

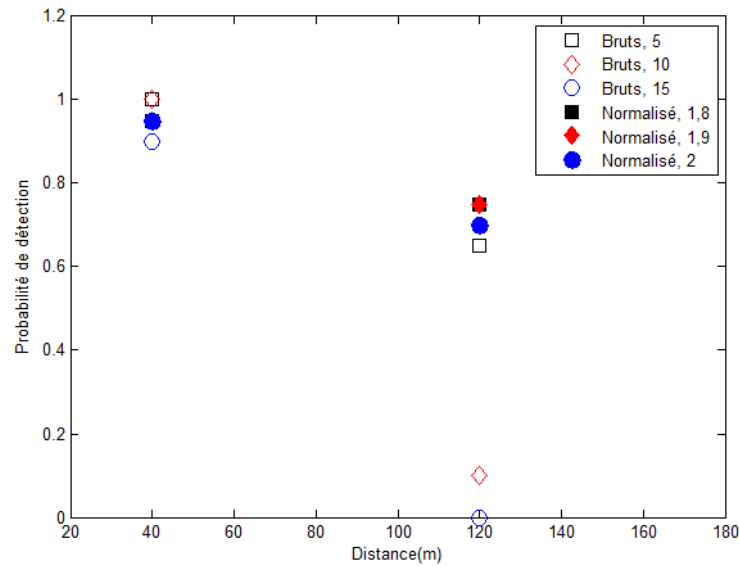


Figure IV.55 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 80 km/h)

Pour les essais effectués jusqu'à 70 km/h, on peut constater que la détection des feux à Leds DRL se dégrade à partir à 60m, et devient faible à 80m. Au-delà de 100m, la probabilité de détection est quasi nulle. Pour une distance, la probabilité de détection décroît lorsque la vitesse angulaire du feu augmente. Pour les essais à 80 km/h, seules les mesures à 40 m et à 100 m étaient disponibles mais elles sont parfaitement compatibles avec les constatations précédentes.

- En ce qui concerne la probabilité de détection de la lanterne

Nous avons effectué la même analyse sur la lanterne. Les figures IV.56, IV.57 et IV.58 présentent la probabilité de détection de la lanterne avec vitesse de roulage de 70km/h.

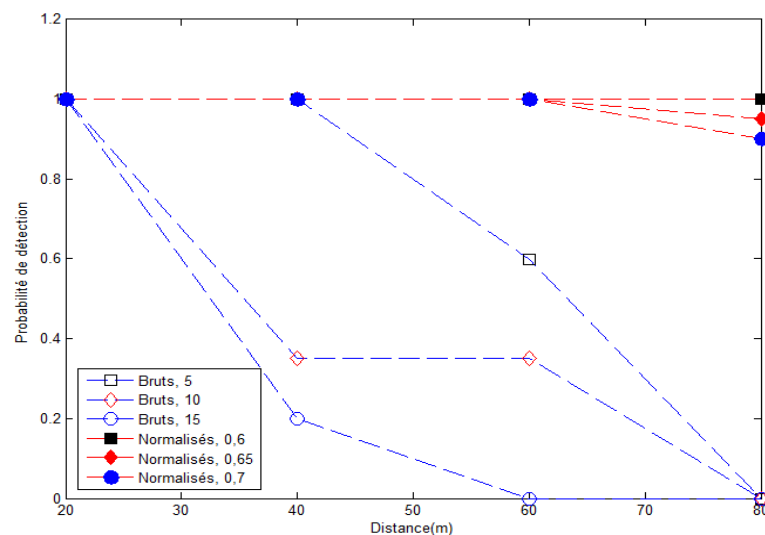


Figure IV.56 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 70 km/h)

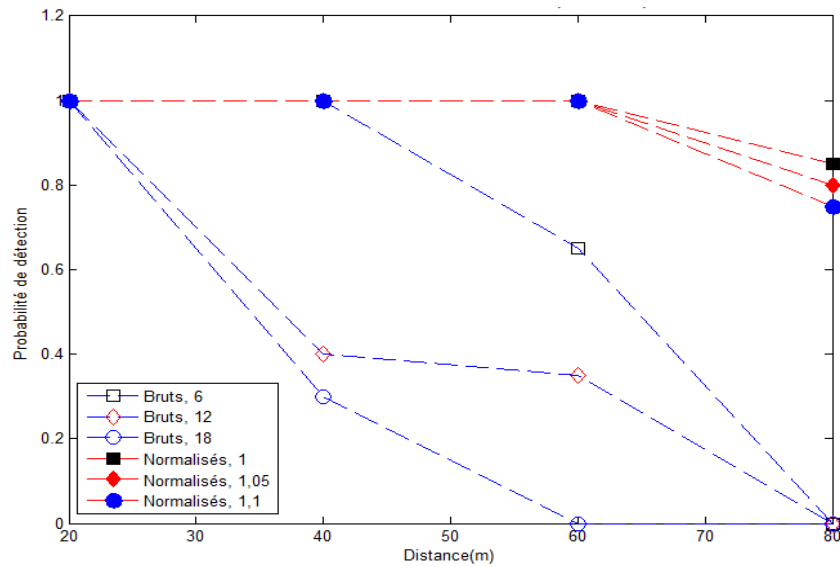


Figure IV.57 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 70 km/h)

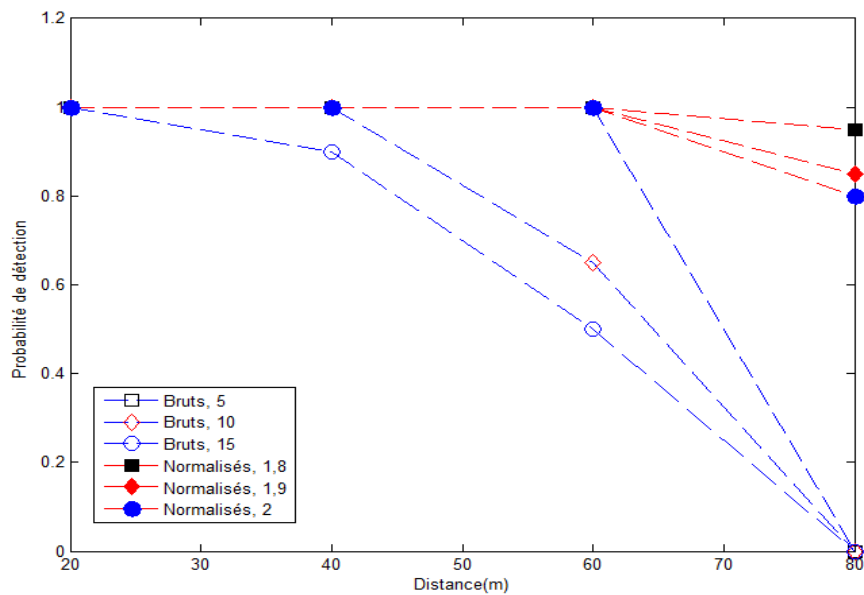


Figure IV.58 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 70 km/h)

Les résultats de calculs avec d'autres vitesses de roulage, de 30km/h, 50 km/h et 80km/h, sont présentés dans l'annexe D.

Le résultat obtenu sur la lanterne est similaire à celui obtenu sur les feux DRL : la probabilité de détection décroît à partir à 40m, et s'annule au-delà de 80m. Elle augmente lorsque la vitesse angulaire de l'image est plus faible.

Pour conclure, nous avons illustré dans ces expérimentations le fait que, pour les scénarii où le temps de résidence est égal ou supérieur à la durée de traitement, la normalisation des signaux bruts et le

seuillage sur image traitée augmentent la distance de détection du filtrage, jusqu'à 160-180m pour les feux DRL, et jusqu'à 80-100m pour la lanterne, et qu'ils réduisent l'influence de la vitesse angulaire sur la performance du dispositif, par rapport à un simple filtrage sur signaux bruts.

IV.3.3 Essais à vitesses angulaires de feux « élevées »

Deux enregistrements ont été effectués à vitesses angulaires de feux « élevées », respectivement avec un feu à Leds DRL et avec un feu quasi isotrope d'Effilux. La vitesse angulaire du feu était de l'ordre de 0,44 rad/s, et sa distance de l'ordre de 20m, chaque enregistrement a duré 0,6s, et nous avons obtenu 60 images calculées à 100 Hz.

Nous avons comptabilisé le nombre d'images où le feu a été détecté par chaque filtre et calculé le pourcentage de détection correspondant, qui est donné sur le tableau IV-15.

Tableau IV-15 Pourcentage de détection des feux à Leds DRL et d'Effilux

Signaux d'entrée bruts			Signaux d'entrée normalisés		
Type de feu Filtre et seuil utilisés	Feu DRL	Feu Effilux	Type de feu Filtre et seuil utilisés	Feu DRL	Feu Effilux
« classique » 5	100,0%	100,0%	« classique » 0,6	100,0%	100,0%
« classique » 10	83,3%	80,0%	« classique » 0,65	95,0%	96,7%
« classique » 15	80,0%	0,0%	« classique » 0,7	95,0%	96,7%
« 4-phases » 6	100,0%	100,0%	« 4-phases » 1	91,7%	95,0%
« 4-phases » 12	83,3%	86,7%	« 4-phases » 1,05	91,7%	95,0%
« 4-phases » 18	81,7%	1,7%	« 4-phases » 1,1	88,3%	95,0%
« multicanaux » 5	100,0%	100,0%	« multicanaux » 1,8	95,0%	98,3%
« multicanaux » 10	100,0%	100,0%	« multicanaux » 1,9	86,7%	95,0%
« multicanaux » 15	95,0%	81,7%	« multicanaux » 2	86,7%	95,0%

On constate que sur les signaux bruts, ce pourcentage de détection décroît très fortement dans le cas des filtres « classique » et « 4-phases », dès qu'on dépasse les seuils médians choisis (10 pour le « classique » et 12 pour le « 4-phases »), alors que la chute est beaucoup plus faible pour le filtre « multicanaux ». Ceci s'explique par le fait que la modulation du signal du feu DRL est plus importante (~120 DN au maximum) que celle du signal issu du feu Effilux (~30 DN au maximum), comme le montre la figure IV.59. Dans ce cas, les valeurs maximales du signal en sortie de filtre « classique », qui seraient respectivement 60 et 15 (sur feux stationnaires) pour les deux feux ne sont pas atteintes dans le cas de feux en mouvement rapide. Il en est de même dans le cas du traitement 4-phases. Par contre, en ce qui concerne le filtre « multicanaux », les valeurs maximales seraient égales à l'amplitude de la modulation du signal, soient 120 et 30 pour les deux feux, ce qui justifie une chute plus faible de la probabilité de détection avec le seuil de 15 DN.

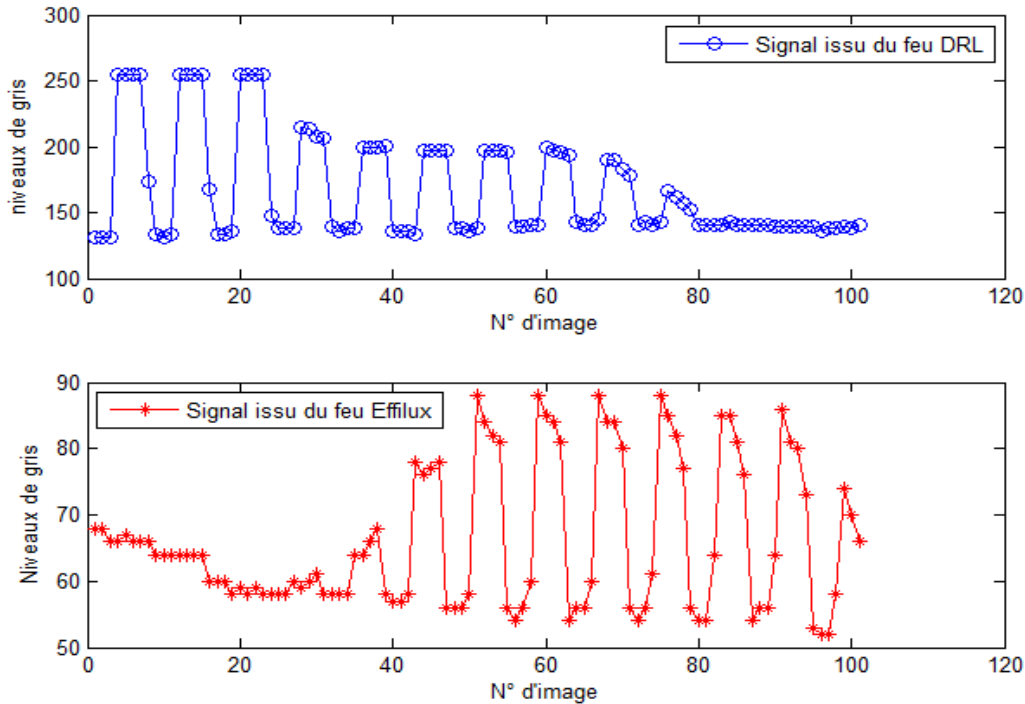


Figure IV.59 Signaux bruts du feu DRL et du feu d'Effilux

Dans le cas de normalisation, le résultat confirme la résistance à la chute de probabilité de détection à cause de l'élévation du seuil. Cependant, la normalisation pourrait être moins efficace pour certaines images, où le signal évolue très rapidement en amplitude, ce qui annule la modulation pendant une fraction de la durée de traitement.

On remarque en plus que, dans les situations opérationnelles, les mouvements angulaires rapides des feux se produisent essentiellement à courtes distances, auquel cas l'image du feu s'étale sur plusieurs pixels, ce qui permet de compenser en partie son défilement rapide à condition d'associer, dans le traitement, plusieurs pixels voisins ; cette question est une voie de prolongement de nos travaux lors d'études ultérieures.

IV.4 Évaluation des fausses détections

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats d'analyse sur le nombre de fausses détections par l'application des filtres et les seuils correspondants présentés dans le chapitre III. Ici nous définissons les fausses détections comme les pixels qui reçoivent le signal issu du fond mais qui sont détectés comme « cibles » par les filtres. Le principe de calcul des signaux de sortie des filtres est identique à celui utilisé dans la section IV.3, avec les mêmes valeurs de seuil utilisées.

Une première analyse montre que les scènes statiques ne produisent pas de fausses détections. Ainsi, nous présentons ci-après seulement des résultats obtenus lors des roulages, surtout ceux à problèmes, qui sont réalisés dans les conditions défavorables, qui risquent le plus de générer les fausses détections, à savoir :

- Infrastructures périodiques et catadioptriques

- Lignes blanches pointillées, passages piétons, etc.
- Variation rapide d'éclairage
- Soleil dans les feuilles

Rappelons que ce sont des scènes sans sources modulées, c'est-à-dire que dans le cas idéal, aucune cible ne doit être détectée.

D'autres scénarii à problèmes comme le défilement de véhicule en sens inverse (jour ou nuit), l'incidence du soleil bas sur l'horizon, roulage sous la pluie/brouillard/la neige (jour ou nuit)...sont aussi prévus, mais n'ont pas été effectués dans la thèse à cause des limites sur moyens d'expérimentation.

IV.4.1 Présentation des roulages

Quatre enregistrements à 90 km/h ont été effectués, dont 1 sur route urbaine et 3 sur autoroute, sur une scène très lumineuse :

- Poteaux catadioptriques réfléchissants des travaux en bord de la route (figure IV.60)
- Entrée de tunnel sur autoroute (figure IV.61)
- Sortie de tunnel sur autoroute (figure IV.62)
- Conduite sur autoroute, avec véhicules environnants (figure IV.63)



Figure IV.60 Poteaux catadioptriques réfléchissants en bord de la route



Figure IV.61 Entrée de tunnel



Figure IV.62 Sortie de tunnel



Figure IV.63 Véhicules environnants sur autoroute

Chaque enregistrement a une durée d'environ de 5s, soit 20000 images brutes acquises par la caméra, et 500 images calculées à 100 Hz.

IV.4.2 Résultat d'évaluation

Nous présentons dans le tableau IV-16 les nombres de fausses détections pour le filtrage sur signaux bruts. On peut remarquer dans ce tableau les nombres énormes de fausses détections, surtout avec les valeurs de seuils faibles (5 pour les filtres « classique » et « multicanaux », 6 pour le filtre « 4-phases »). L'augmentation des seuils réduit les nombres de fausses détections pour chaque filtre, et la chute est plus forte pour les filtres « classique » et « 4-phases ».

Tableau IV-16 Nombres de fausses détections du filtrage sur signaux bruts

Type de feu Filtre et seuil utilisés	Poteaux	Entrée tunnel	Sortie tunnel	Autoroute
« classique » 5	114540	17574	15090	63324
« classique » 10	664	1240	1136	4267
« classique » 15	52	26	11	135
« 4-phases » 6	159362	19266	15766	67088
« 4-phases » 12	1479	1468	1328	5476
« 4-phases » 18	84	49	19	298
« multicanaux » 5	257545	23089	11462	21951
« multicanaux » 10	45762	12803	2944	5363
« multicanaux » 15	987	6591	1504	1176

Le résultat d'analyse du filtrage sur signaux normalisés est montré dans le tableau IV-17. On peut constater que les nombres de fausses détections sont inférieurs à ceux qui sont montrés dans le tableau 16. Pareillement, l'augmentation des seuils conduit à la chute de nombre de fausses détections, pour les filtres « classique » et « multicanaux », sauf pour le filtre « 4-phases », qui a montré déjà très peu de fausses détection à la valeur de seuil la plus faible, de 1. Pour ce filtre, si on utilise le seuillage avec la valeur de seuil de 1,1, il nous reste 1 fausse détection dans le cas d'entrée tunnel (la cellule de bordure rouge), qui correspond au rond rouge indiqué sur l'image IV.64 ci-dessous.

Tableau IV-17 Nombres de fausses détections du filtrage sur signaux normalisés

Type de feu Filtre et seuil utilisés	Poteaux	Entrée tunnel	Sortie tunnel	Autoroute
« classique » 0,6	2581	1867	1972	1745
« classique » 0,65	530	352	363	321
« classique » 0,7	77	65	51	43

« 4-phases » 1	2	3	1	2
« 4-phases » 1,05	0	2	1	2
« 4-phases » 1,1	0	1	0	0
« multicanaux » 1,8	1202	488	634	425
« multicanaux » 1,9	65	21	19	15
« multicanaux » 2	63	21	18	15



Figure IV.64 Fausse détection sur l'image par filtre « 4-phases »

L'examen sur les images brutes donne le signal brut correspondant, comme le montre la figure IV.65 :

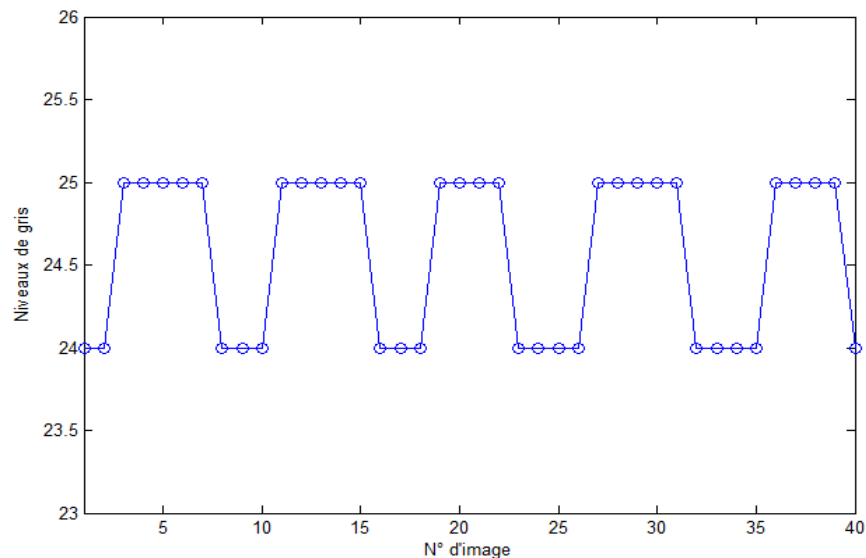


Figure IV.65 Signal brut de la seule fausse détection signalée par filtre « 4phases » (seuil = 1,1, scénario de l'entrée de tunnel)

Ainsi, le signal après normalisé correspondant est de fréquence proche de la fréquence de modulation recherchée, donc a été signalé comme une détection par le filtre.

Cependant, on a constaté que, dans le cas de filtrage sur signaux normalisés, les fausses détections ne provenant que des signaux de faibles amplitudes de modulation (la différence entre le maximal et le minimal du signal pendant la durée de traitement), comme le montre le tableau IV-18 ci-dessous.

Tableau IV-18 Amplitudes de modulation des signaux bruts les plus fortes des fausses détections dans le cas du filtrage sur signaux normalisés

Type de feu Filtre et seuil utilisés	Poteaux	Entrée tunnel	Sortie tunnel	Autoroute
« classique » 0,6	11	6	7	7

« classique » 0,65	9	6	5	6
« classique » 0,7	6	4	3	6
« 4-phases » 1	5	3	1	6
« 4-phases » 1,05	0	3	1	6
« 4-phases » 1,1	0	1	0	0
« multicanaux » 1,8	5	4	4	5
« multicanaux » 1,9	4	3	3	3
« multicanaux » 2	4	3	3	3

Il en résulte que l'amplitude la plus forte pour tous les scénarii de roulage et pour tous les filtres est de 6, si on applique les valeurs de seuils les plus importantes, respectivement de 0,7, 1,1 et 2 pour les filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ». Ça veut dire que le filtrage, quel que soit le type de filtre, appliqué sur signaux d'entrée normalisés, plus un examen sur l'amplitude de modulation des signaux bruts avec un seuil suffisamment élevé (6 DN pour le filtre « classique », 1 DN pour le filtre « 4-phases » et 4 DN pour le filtre « multicanaux » selon nos expérimentations), peut éliminer complètement des fausses détections des signaux du fond. Cela confirme le point d'amélioration sur le seuillage en amplitude de modulation des signaux bruts, que nous avons proposé dans le chapitre III (paragraphe III.4.2).

Par ailleurs, et même sans parler des possibilités offertes par des traitements de plus haut niveau sur l'interprétation de la scène, il est éventuellement faisable de mettre un seuil plus petit sur amplitude de modulation, ce qui permet d'augmenter la distance détection des cibles recherchées, en parallèle avec des valeurs de seuils plus faibles des filtres, parce que les fausses détections ne proviennent pas des mêmes points si l'on utilise différents filtres. Nous avons testé un seuillage de 3 DN sur l'amplitude de modulation des signaux bruts sur les essais de ci-dessus (signaux d'entrée normalisés), dont le résultat d'analyse montré dans le tableau IV-19.

Tableau IV-19 Nombre de fausses détections du filtrage sur signaux normalisé en parallèle avec l'examen sur l'amplitude de modulation des signaux bruts (seuil utilisé = 3 DN)

Type de feu Filtre et seuil utilisés	Poteaux	Entrée tunnel	Sortie tunnel	Autoroute
« classique » 0,7 + 3 D.N.	8	1	0	2
« 4-phases » 1 + 3 D.N.	1	0	0	1
« multicanaux » 2 + 3 D.N.	1	0	0	0

En analysant les signaux bruts, nous avons trouvé que les signaux signalés comme fausses détections par le filtre « 4-phases » et le filtre « multicanaux » ne correspondent pas au même point de la scène, ce qui nous conduit à un traitement qui combine les deux filtres de « 4-phases » et de « multicanaux », pour avoir 0 fausses détections.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré par les essais sur le terrain, à des vitesses de roulages allant jusqu'à 90 km/h sur autoroute, que :

- Nous avons réussi à filtrer 100% de signaux du fond, si on normalise les signaux d'entrée, et met en place un seuillage sur leurs amplitudes. Les valeurs de seuil sur amplitude dépendent du type de filtrage. On peut également utiliser plusieurs filtres en parallèle avec un seuil de l'amplitude plus réduite, ce qui permettra d'augmenter la distance de détection des feux.
- Nous avons réussi à augmenter la distance de détection par la normalisation des signaux d'entrée, où la détection est de 100% pour les feux à Leds jusqu'à 140m et jusqu'à 80m pour les lanternes.

Conclusion et perspectives

Cette thèse concerne le développement d'un système vidéo « coopératif » pour l'anticollision, basé sur la mesure de trajectographie des véhicules « cibles » par caméra stéréoscopique. Dans un premier temps, nous avons établi un cahier des charges sur le volume de détection (champ de vision, portée, vitesses de roulages, ...) ainsi que sur le système lui-même (résolution des capteurs, Base, loi de distorsion de l'optique, ...). L'essentiel du travail a été consacré à la détection fiable et robuste des feux à Leds modulés en créneau à 500 Hz, par filtrage numérique à cette fréquence d'images brutes filmées à 4000 Hz. Ceci permet de sélectionner les signaux utiles et de rejeter les signaux du fond de la scène, tout en réduisant la complexité de calculs par rapport aux traitements d'image traditionnels.

Pour évaluer la performance des filtres numériques proposés, nous avons réalisé d'abord des simulations sur signaux artificiels, et puis des expérimentations sur le terrain avec caméra embarquée sur véhicule d'essai. Nous avons effectué des roulages à différentes vitesses, ce qui nous a permis d'analyser le signal issu du feu ainsi que le comportement de nos filtres à des vitesses angulaires de feu nulles, faibles ou élevées. Le résultat de ces expérimentations montre que le filtrage permet de détecter les feux à Leds de type DRL jusqu'à 140m sans aucune fausse détection sur le fond. Ces expérimentations sont une étape essentielle pour définir de façon plus précise un tel système, en particulier dans le choix du seuil.

Il faut noter que les expérimentations ont été faites dans des conditions de visibilité très bonnes, qu'il faudrait compléter par des roulages dans différentes conditions météorologiques défavorables (brouillard, neige, pluie,...), pour évaluer l'influence de ces conditions sur la portée.

Dans la thèse, tous les calculs ont été effectués dans Matlab, ce qui n'est pas opérationnel vu le volume d'information, mais nous avons établi le cahier des charges d'un prototype, qui est en cours de réalisation : il s'agit d'une plateforme de caméra stéréo avec un processeur-calculateur embarqué, avec traitement en temps réel des images brutes et enregistrement des images calculées à basses fréquences (30 Hz, 50 Hz, etc.). Ce prototype devrait permettre d'effectuer des roulages de plus longues durées.

Par ailleurs, notre capteur peut donner lieu aux améliorations et aux extensions futures suivantes:

- 1) Possibilité de variation du rapport cyclique de modulation des sources
Tout en gardant une modulation en créneau à 500 Hz, mais avec des rapports cycliques différents, par exemple, 25%, 75%, etc., il sera possible avec notre système de différencier les types de véhicules et d'obstacles éventuels, tels que voitures, camions, piétons, vélos,... ce qui n'est pas possible avec la modulation en créneau 50% ON-50% OFF. On pourra appliquer en parallèle ces différents filtres sur l'ensemble des signaux, ce qui permettra de détecter et de reconnaître les cibles, ce qui constitue une information essentielle pour les applications ADAS et pour la conduite autonome. Une pré-étude succincte fait apparaître que les filtres se comporteront de façons différentes face à ce rapport cyclique multiple.
- 2) Possibilité d'introduction d'un 3^e capteur

L'incertitude de mesure de positionnement étant grande à longue distance, il est envisageable d'introduire un 3^e capteur vidéo, qui est placé sur l'axe central et non aligné avec les deux autres capteurs, ce qui permet d'introduire une 2^e Base stéréo verticale, et d'améliorer la précision de mesure en distance et en trajectographie. Il faut observer que les résultats expérimentaux présentés au chapitre IV ont été obtenus avec un seul capteur : un système stéréo à deux caméras aurait peut-être déjà éliminé la plupart des fausses alarmes subsistant après les filtrages décrits.

3) Possibilité de communication inter-véhicule

Une autre méthode pour fiabiliser la détection est la communication inter-véhicule, comme on l'a décrit dans le paragraphe I.2.1. La communication pourra faciliter en plus la mise en correspondance des images de différents capteurs, voire réaliser l'identification des véhicules cibles à condition d'obtenir des capacités suffisantes de transmission de message.

Les technologies telles que « rétines artificielles » ou « capteur CCD à illumination arrière », devraient encore améliorer la performance de tels dispositifs :

- 1) Les rétines artificielles, décrites au paragraphe I.3.1, devraient permettre la conception de capteurs sensibles seulement aux signaux modulés issus des feux à Leds, grâce au filtrage analogique intra-pixel, plus efficace que le filtrage numérique.
- 2) À la différence de la plupart des capteurs actuels, les capteurs CCDs à illumination arrière présentent un taux de remplissage de presque 100%, ce qui améliore le bilan radiométrique du senseur.

Annexes

A. DONNEES SUR LA GEOMETRIE ROUTIERE

1. Les différentes catégories de routes.

En général, il y a trois catégories de routes en France : le **R**, le **T** et le **L**.

R : les routes de catégorie R sont des routes multifonctionnelles. Il comporte deux sous catégories :

- Les **routes** à une chaussée, à carrefours plans ordinaires ou giratoires, à accès riverains, à trafic moyen et à vitesse limitée à 90 km/h.
- Les **artères interurbaines** à deux chaussées séparées par un terre-plein central (TPC) infranchissable, à carrefours giratoires ou plan sans traversée du terre-plein central, à vitesse limitée à 110 km/h si absence d'accès riverains ou à 90 km/h si accès riverains.

T : les routes de catégorie T sont des **routes express de transit** à une chaussée ou deux chaussées, à carrefours dénivelés, isolée de son environnement, à trafic moyen et à vitesse limitée à 110 km/h pour les routes à chaussées séparées et à 90 km/h pour les routes à chaussée unique.

L : les routes de catégorie L sont des **autoroutes de liaison** de catégorie L à deux chaussées séparées par un terre-plein central non franchissable, à carrefours dénivelés, isolée de son environnement, sans accès riverain, à trafic élevé et à vitesse limitée à 130 km/h (ou 110km/h) en site difficile.



Figure 0.1 Route de catégorie T



Figure 0.2 Route de catégorie L

2. Caractéristiques géométriques des routes

Il existe trois éléments géométriques pour définir les caractéristiques d'une route (Fig.0.3-0.5) :

- le tracé en plan : la projection de la route sur un plan horizontal
- le profil en long : la coupe longitudinale sur laquelle sont reportées les valeurs des pentes et des rampes, ainsi que les rayons des sommets de côtes et des points bas
- le profil en travers : coupe suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe



Figure 0.3 Le tracé en plan de routes en France

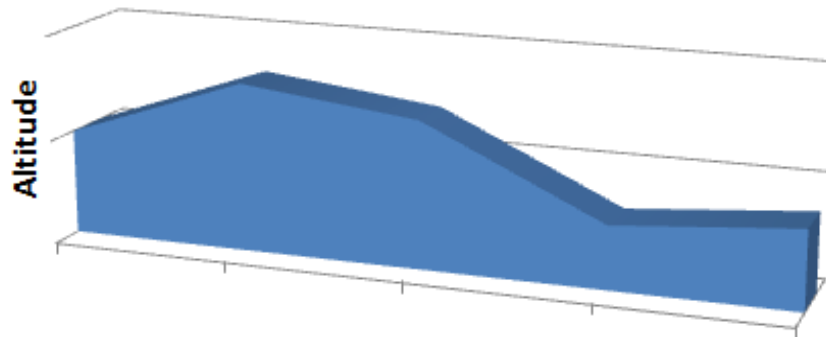


Figure 0.4 Le profil en long

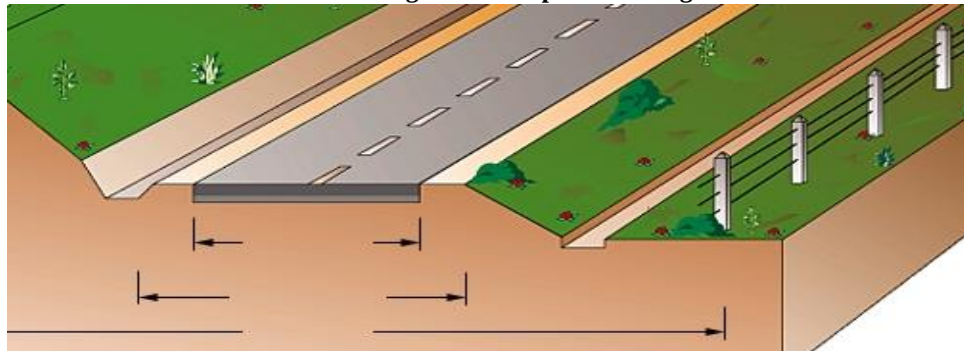


Figure 0.5 Le profil en travers

Ces trois éléments sont définis par les paramètres géométriques ci-dessous respectivement :

- le tracé en plan : le nombre et la largeur de chaussées ; le rayon de courbure ; les raccordements à rayons progressifs ; la forme de la route (description mathématique)
- le profil en long : la déclivité en pente montante et en pente descendante
- le profil en travers : le dévers des chaussées ; le sens du dévers

B. Cinématique des véhicules sur la route

1. La vitesse réglementaire et la V85

La vitesse réglementaire est la limitation de vitesse ou la vitesse maximale autorisée de véhicules sur route. Elle est décidée par le type de route et les conditions de circulation (Tableau 10).

Cependant, il existe toujours les cas atypiques ou extrêmes où le conducteur ne respecte pas cette limitation de vitesse. Ce sont des possibilités qu'il faut prendre en compte quand nous spécifions le système à développer. Pour cela, nous présentons ici la notion de « V85 ». La vitesse V85 est la vitesse au-dessous de laquelle roulent 85% des usagers. Cette vitesse est déterminée par le nombre et les caractéristiques des voies et aussi par le rayon de courbure et la pente de la route.

Sauf pour les autoroutes, la vitesse V85 en fonction du nombre de voies et du rayon R (unité : m) est donnée par les équations ci-dessous :

$$2v \text{ (5m)} : V85 = 92 / (1 + 346 / R^{1.5})$$

$$3v \text{ et } 2v \text{ (6 et 7 m)} : V85 = 102 / (1 + 346 / R^{1.5})$$

$$2x2 v : V85 = 120 / (1 + 346 / R^{1.5})$$

Sauf pour les autoroutes, la vitesse V85 en fonction du nombre de voies et de la rampe p (unité : %) (>250 m) est donnée par les équations ci-dessous :

$$2v \text{ (5m)} : V85 = 92 - 0,31p^2$$

$$3v \text{ et } 2v \text{ (6 et 7 m)} : V85 = 102 - 0,31p^2$$

$$2x2 v : V85 = 120 - 0,31p^2$$

Aujourd'hui, le principe est d'employer la vitesse maximale réglementaire au lieu de la V85. Cependant, nous pensons de tenir en compte la valeur qui est plus grande en comparant la vitesse réglementaire et la V85 afin de laisser des marges pour la spécification.

En résumé, la vitesse réglementaire et la vitesse V85 sont indiquées sur le tableau 0-1 :

Tableau 0-1 Résumé Vitesse Maxima, V85 et vitesse retenue

Type de voie	V réglementaire	V85	V retenue
Autoroute	130 Km/h	150 Km/h	150 Km/h
2x2 voies	110 Km/h	120 Km/h	120 Km/h
3 ou 2 voies (6 et 7m)	90 Km/h ou 110Km/h	102 Km/h	110 Km/h
2 voies (5M)	90 Km/h ou 110Km/h	92 Km/h	110 km/h

De ce fait, nous pouvons assurer que le fonctionnement de notre système découvrir le plus de scénarii routiers possibles.

2. La distance d'arrêt

La distance d'arrêt est la distance parcourue par le véhicule lorsqu'il perçoit un obstacle devant lui et freine jusqu'à l'arrêt. Cette distance est essentielle et elle servira à calculer la distance de fonctionnement et le champ de vision du système à développer.

La distance d'arrêt comprend la **distance de perception réaction** et la **distance de freinage**. Supposons que la vitesse pratiquée du véhicule avant le freinage est V_0 (unité : Km/h).

1) La distance de perception réaction

C'est la distance parcourue pendant le temps de perception et réaction du conducteur.

Soit t_{pr} le temps de perception et réaction en seconde, la distance de perception réaction S_{pr} en mètre est donnée par l'équation :

$$S_{pr} = \frac{V_0 \times t_{pr}}{3,6}$$

Généralement le t_{pr} de 2 s est adopté pour les calculs, y compris 1,3 à 1,5 s de temps physiologique de perception-réaction et 0,5 s pour réagir en action des freins. Cette valeur peut être réduite à 1,8 s si la vitesse est supérieure à 100 Km/h.

Remarque : Le temps de perception-réaction d'un conducteur pris en compte est de 1,5 second. Suivant le confort que l'on veut donner à la manœuvre, si le système se contente d'alerter le conducteur alors il doit le faire entre 3-7s, avant un équivalent de temps d'impact, pour que le conducteur puisse mettre en œuvre la manœuvre d'évitement d'accident appropriée.* Fourchette délai d'avertissement préconisé par les experts du domaine. Il n'y a pas une valeur unique de délai qui fait consensus.*

2) La distance de freinage

La distance de freinage est la distance parcourue durant le freinage.

En théorie, la distance de freinage S_f en mètre est donnée par l'équation :

$$S_f = \frac{V_0^2}{2g(cfl + p)} \frac{km^2/h^2}{m/s^2} = \frac{V_0^2}{25,92g(cfl + p)} m$$

Où g est accélération de la pesanteur ($9,81 m/s^2$), cfl est le coefficient de frottement longitudinal et p est la déclivité du profil en long.

La somme du cfl et p s'appelle le coefficient d'adhérence f . L'équation donc devient :

$$S_f = \frac{V_0^2}{25,92gf} \approx \frac{V_0^2}{254 f}$$

Sur route sèche, f peut être 0,8 pour un béton bitumineux propre et sec, 0,7 pour un revêtement moyen et 0,6 pour un pavé sec. Sur route mouillée, on peut retenir 0,4 comme sa valeur.

Soit $a = -(g \times f)$ la valeur de la décélération en m/s^2 . Les valeurs correspondantes aux quatre coefficients d'adhérence donnés ci-dessus sont $-7,8 m/s^2$, $-6,9 m/s^2$, $-5,9 m/s^2$ et $-3,9 m/s^2$ respectivement.

De ce fait, S_f est donnée par l'équation :

$$S_f = -\frac{V_0^2}{25,92a}$$

La **distance d'arrêt** S_a est la somme de la distance de perception réaction et de la distance de freinage :

$$S_a = S_{pr} + S_f$$

Nous avons calculé la distance d'arrêt ($t_{pr} = 2$ s) comme montré sur le tableau 0-2.

Tableau 0-2 La distance d'arrêt en fonction de vitesse et de décélération

S_a (m)	$V_0=30$ Km/h	50 Km/h	70 Km/h	90 Km/h	110 Km/h	130 Km/h	150 Km/h
$a = -4 \text{ m/s}^2$	25,4	51,9	86,2	128,1	177,8	235,2	300,3
-5 m/s^2	23,6	47,1	76,7	112,5	154,5	202,6	256,9
-6 m/s^2	22,5	43,9	70,4	102,1	138,9	180,9	228
-7 m/s^2	21,7	41,6	65,9	94,6	127,8	165,3	207,3
-8 m/s^2	21	39,9	62,5	89,1	119,5	153,7	191,8

3. La vitesse du véhicule lors du freinage

Soit D la distance inter-véhicule. La vitesse en fonction de D pendant la période d'arrêt est donnée par l'équation suivante :

$$V = \begin{cases} \frac{V_0}{3,6} & \text{si } S_a - S_{pr} \leq D \leq S_a \\ \sqrt{\left(\frac{V_0}{3,6}\right)^2 + 2a(S_a - S_{pr} - D)} & \text{si } 0 \leq D \leq S_a - S_{pr} \end{cases} \quad (\text{unité : m/s})$$

Ci-dessous des équations de quelques vitesses pratiques pour le freinage à -5 m/s^2 et à -8 m/s^2 .

$V_0 = 90 \text{ Km/h}$

$$a = -5 \text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 25 \text{ m/s} & \text{si } 62,5 \leq D \leq 112,5 \text{ m} \\ \sqrt{(25)^2 - 10(62,5 - D)} & \text{si } 0 \leq D \leq 62,5 \text{ m} \end{cases}$$

$$a = -8 \text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 25 \text{ m/s} & \text{si } 39,1 \leq D \leq 89,1 \text{ m} \\ \sqrt{(25)^2 - 16(39,1 - D)} & \text{si } 0 \leq D \leq 39,1 \text{ m} \end{cases}$$

$V_0 = 110 \text{ Km/h}$

$$a = -5 \text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 31 \text{ m/s} & \text{si } 93,4 \leq D \leq 154,5 \text{ m} \\ \sqrt{(31)^2 - 10(93,4 - D)} & \text{si } 0 \leq D \leq 93,4 \text{ m} \end{cases}$$

$$a=-8\text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 31 & \text{m/s} & \text{si} & 58,4 \leq D \leq 119,5\text{m} \\ \sqrt{(31)^2 - 16(58,4 - D)} & \text{m/s} & \text{si} & 0 \leq D \leq 58,4\text{m} \end{cases}$$

$$V_0 = 130\text{ Km/h}$$

$$a=-5\text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 36 & \text{m/s} & \text{si} & 130,4 \leq D \leq 202,6\text{m} \\ \sqrt{(36)^2 - 10(130,4 - D)} & \text{m/s} & \text{si} & 0 \leq D \leq 130,4\text{m} \end{cases}$$

$$a=-8\text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 36 & \text{m/s} & \text{si} & 81,5 \leq D \leq 153,7\text{m} \\ \sqrt{(36)^2 - 16(81,5 - D)} & \text{m/s} & \text{si} & 0 \leq D \leq 81,5\text{m} \end{cases}$$

$$V_0 = 150\text{ Km/h}$$

$$a=-5\text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 42 & \text{m/s} & \text{si} & 173,6 \leq D \leq 256,9\text{m} \\ \sqrt{(42)^2 - 10(173,6 - D)} & \text{m/s} & \text{si} & 0 \leq D \leq 173,6\text{m} \end{cases}$$

$$a=-8\text{ m/s}^2: V = \begin{cases} 42 & \text{m/s} & \text{si} & 108,5 \leq D \leq 191,8\text{m} \\ \sqrt{(42)^2 - 16(108,5 - D)} & \text{m/s} & \text{si} & 0 \leq D \leq 108,5\text{m} \end{cases}$$

C. Synthèse de la spécification du filtre numérique

I. Spécification générale du traitement par filtre numérique des images

- Type du filtre : filtre passe-bande à base de TFD adapté à la fréquence de modulation des feux à Leds
- Fréquence de modulation des feux à Leds : 500 Hz
- Forme de signal et du filtre : en créneau
- Cadence d'enregistrement : 4 kHz
- Durée de traitement (=Temps de mesure) : 10 ms soit 5 cycles du signal modulé recherché (issus des feux à Leds)
- Entrelacement : 0%

II. Filtres proposés dans le cadre de la thèse

- Filtre 1 : filtre adapté en créneau « classique »
- Filtre 2 : filtre adapté en créneau « 4-phases »
- Filtre 3 : filtre « multicanaux » sur la dérivée des signaux bruts

III. Optimisation des filtres

- Normalisation des signaux bruts à trois niveaux, -1, 0 et +1
- Examen de l'amplitude de modulation des signaux bruts avec et sans normalisation

D. Probabilité de détection expérimentale de la lanterne

Les figures 0.6, 0.7 et 0.8 présentent la probabilité de détection de la lanterne avec vitesse de roulage de 30 km/h, respectivement par les filtres « classique », « 4-phases » et « multicanaux ».

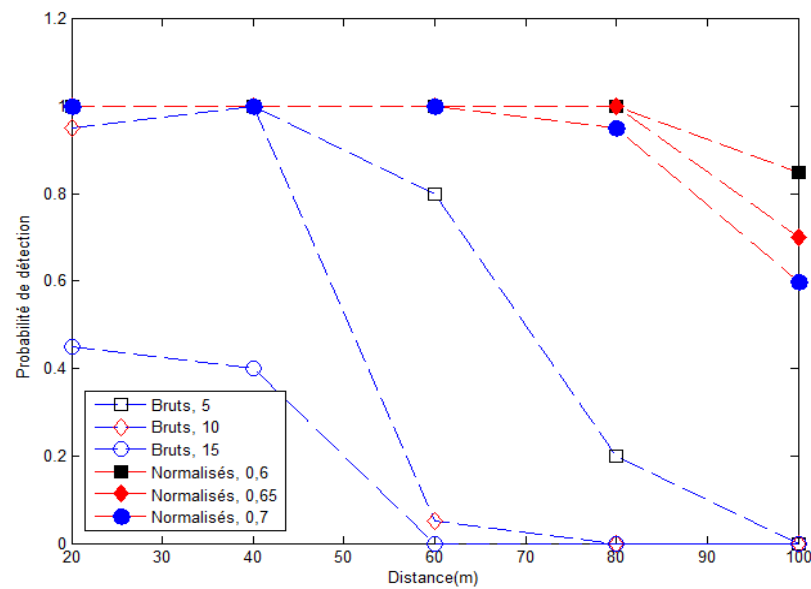


Figure 0.6 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 30 km/h)

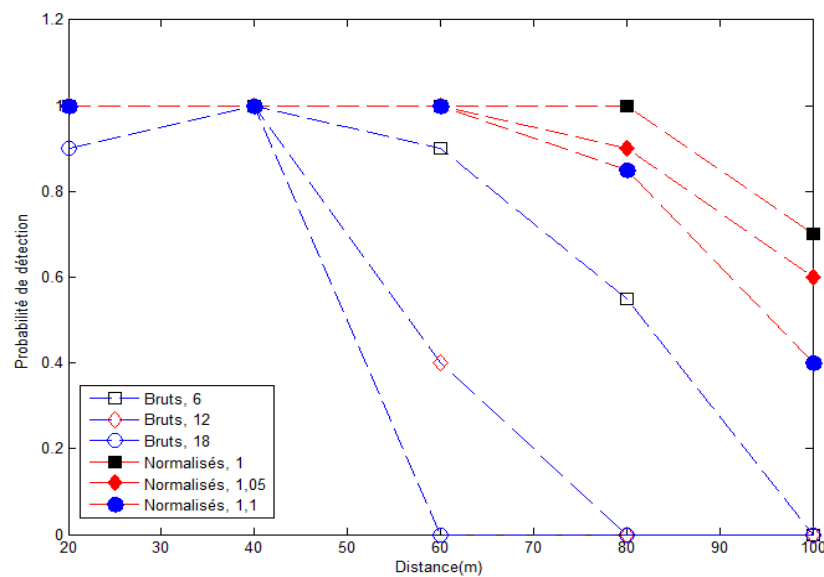


Figure 0.7 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 30 km/h)

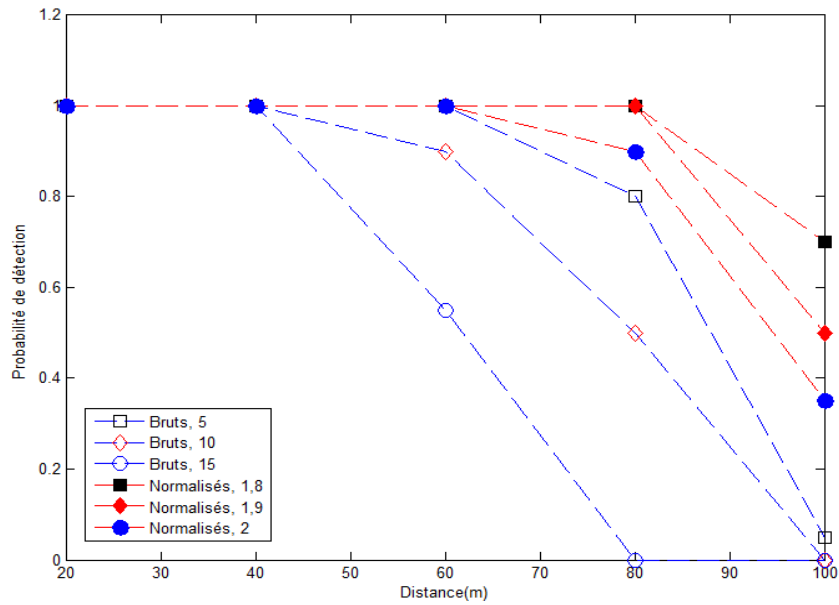


Figure 0.8 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 30 km/h)

Les figures 0.9, 0.10 et 0.11 présentent les résultats obtenus avec vitesse de roulage de 50 km/h.

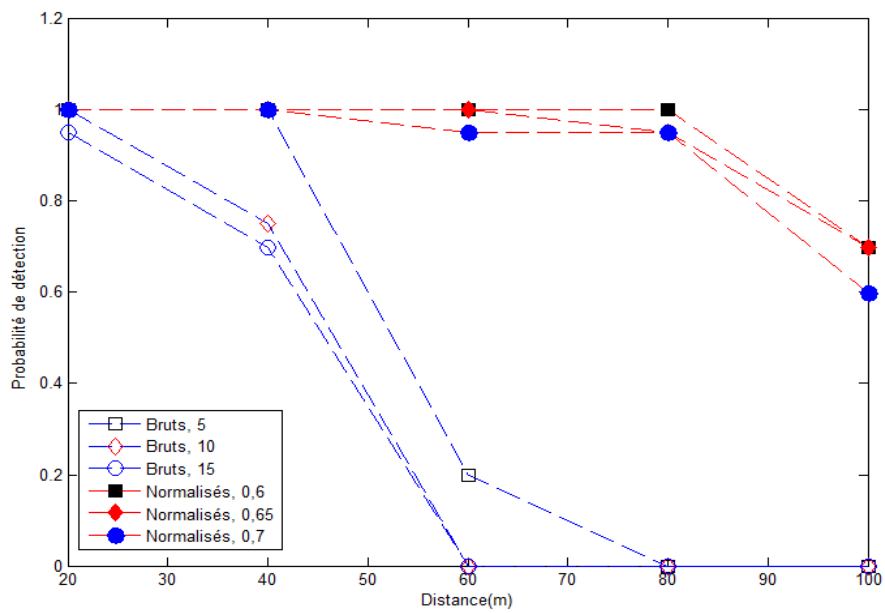


Figure 0.9 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 50 km/h)

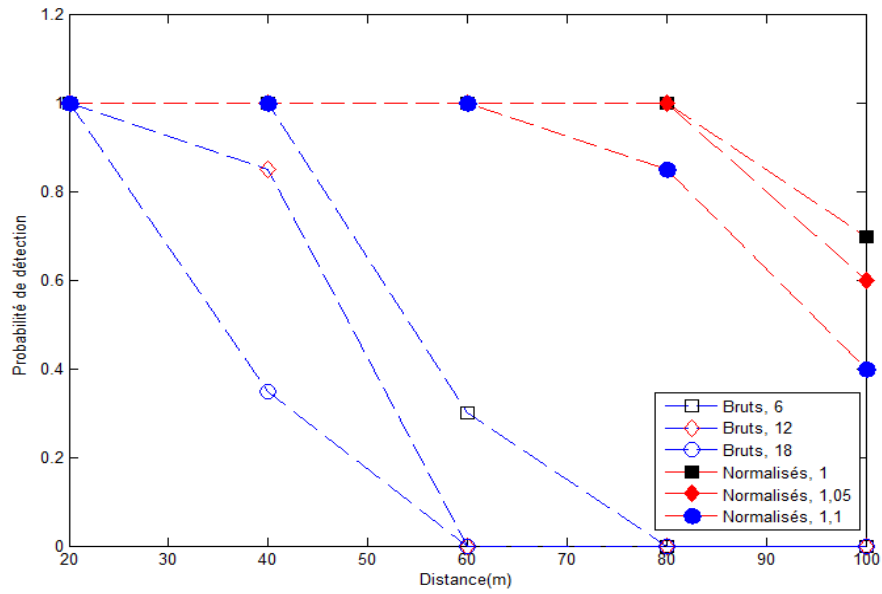


Figure 0.10 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 50 km/h)

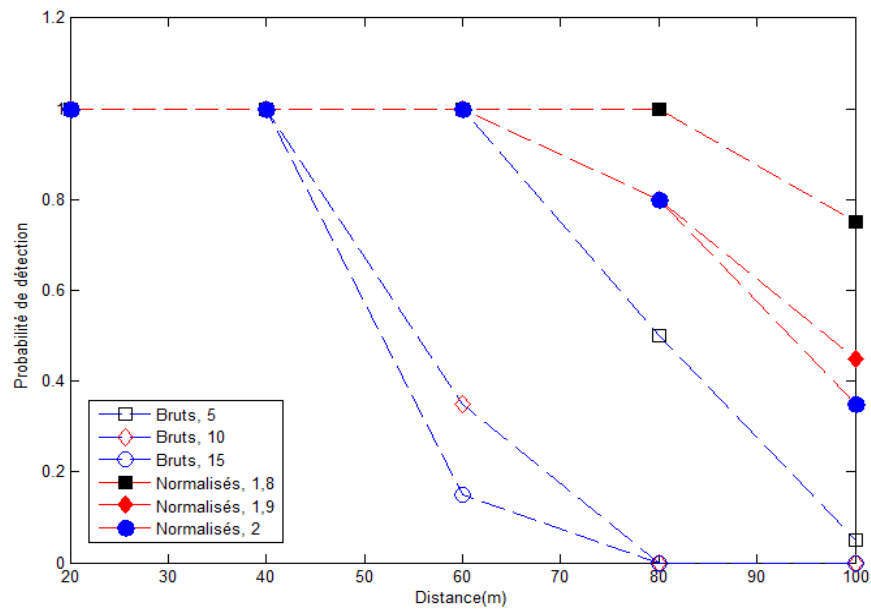


Figure 0.11 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 50 km/h)

Les figures 0.12, 0.13 et 0.14 présentent la probabilité de détection de la lanterne avec vitesse de roulage de 80 km/h.

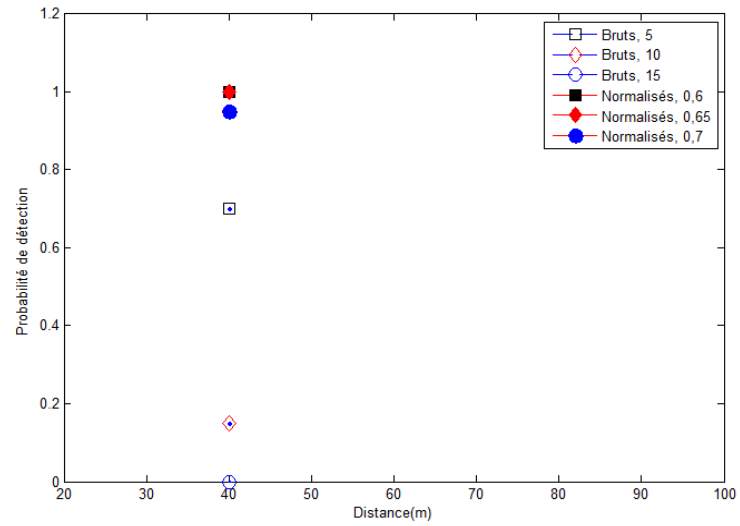


Figure 0.12 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 80 km/h)

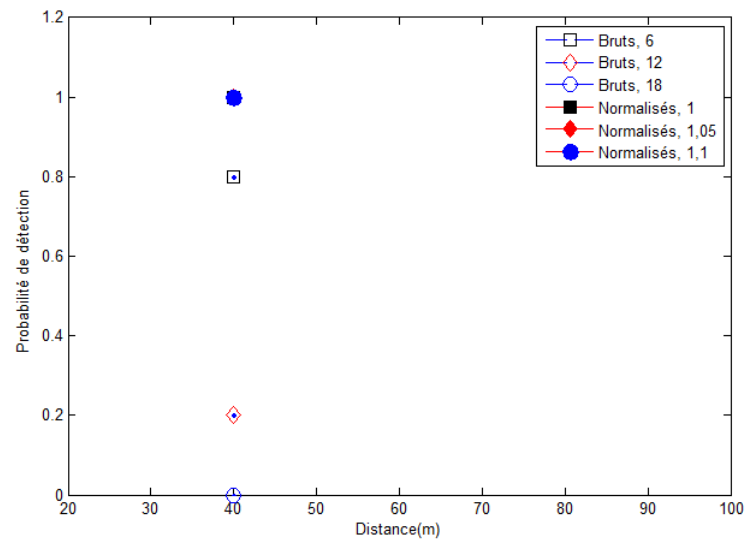


Figure 0.13 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 80 km/h)

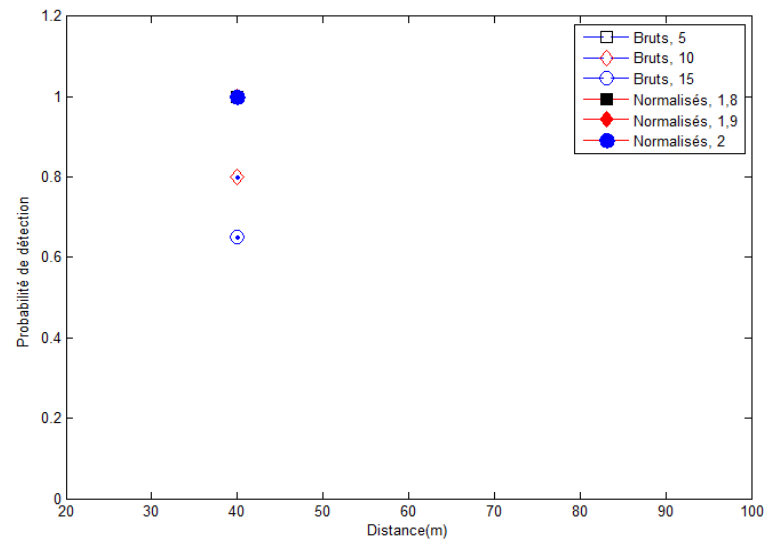


Figure 0.14 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 80 km/h)

Liste des figures

Figure I.1 Mesure de position et de vitesse par Radar	9
Figure I.2 Applications d'aide à la conduite par les Radars.....	9
Figure I.3 Radar AC20 Autocruise.....	10
Figure I.4 Mesure de position par Lidar	11
Figure I.5 Système "City Brake Control" de Fiat.....	12
Figure I.6 Mesure de position par caméra ToF	13
Figure I.7 Caméra ToF destinée aux applications pré-crash.....	14
Figure I.8 Mesure de distance par caméra monoculaire	15
Figure I.9 Reconnaissance de forme d'un véhicule suivant différentes orientations	15
Figure I.10 Système stéréoscopique.....	16
Figure I.11 Mesure de distance par caméra stéréoscopique	18
Figure I.12 Caméra Stéréo EyeSight (Subaru)	19
Figure I.13 Prototype Caméra 6D Vision Mercedes-Benz.....	20
Figure I.14 Architecture de l'enregistrement de données CARSENSE.....	21
Figure I.15 Véhicule d'essai CarSense : Alfa 156 Sportwagon 2.0 Selespeed.....	23
Figure I.16 Exemples d'une imagerie sur 3 paires de feux à Leds arrière modulés	28
Figure I.17 Système vidéo coopératif inter-véhicules	29
Figure I.18 Principe de rétine à filtres analogiques.....	30
Figure I.19 Carte Digiteo Labs intégrant la rétine et l'optique associée.....	30
Figure I.20 Courbes théoriques du filtre adapté par TFD (1, 2, 3, 4 et 5 périodes échantillonnées du signal recherché).....	33
Figure I.21 Image de la scène filtrée à un instant donné.....	34
Figure II.1 Scénario 1.....	36
Figure II.2 Scénario 2.....	37
Figure II.3 Schéma du scénario Fronto-Arrière de dépassement en ligne droite	37
Figure II.4 Scénario 3.....	38
Figure II.5 Scénario 4.....	38
Figure II.6 Le champ de vision horizontal nécessaire à longues distances	41
Figure II.7 Le champ horizontal à courte distance	42
Figure II.8 Le champ vertical nécessaire sur route horizontale	43
Figure II.9 Le champ vertical nécessaire à courtes distances en dédivité	43
Figure II.10 Zone de détection du système stéréoscopique.....	44
Figure II.11 Zone d'incertitude (vue de dessus).....	45
Figure II.12 Incertitude transversale sur les mesures de position des feux à Leds.....	47
Figure II.13 Exemple de calcul de l'incertitude de mesure de position.....	48
Figure II.14 Spectre de DRL blanc.....	54
Figure II.15 Diagramme angulaire d'une DRL	54
Figure II.16 Spectre relatif de lanterne de signalisation	55
Figure II.17 Diagramme angulaire de la lanterne de signalisation.....	55
Figure II.18 La configuration élémentaire du système vidéo coopératif stéréo.....	56

Figure II.19 Sensibilité spectrale du capteur Basler A504k	58
Figure II.20 Courant de sortie d'un pixel de signal provenant d'un feu à Leds.....	59
Figure II.21 Exemple d'éclairement spectrique solaire direct au sol calculé par MODTRAN.....	60
Figure II.22 Luminance spectrique de ciel calculée par MODTRAN.....	62
Figure II.23 Rapport signal d'un feu stationnaire sur fond uniforme.....	63
Figure II.24 Rapport signal d'un feu stationnaire sur fond fluctuant.....	64
Figure II.25 Image brute de la scène (enregistrée à 30 Km/h)	64
Figure II.26 Signaux typiques d'une scène naturelle roulage à 30 km/h	65
Figure II.27 Spectres correspondant aux signaux de la figure 26	65
Figure II.28 Spectres des signaux échantillonnés de scène naturelle avec roulage à 50 km/h	66
Figure II.29 Spectres des signaux échantillonnés de scène naturelle avec roulage à 70 km/h	66
Figure II.30 Géométrie utilisée pour la définition de la BRDF d'une surface	68
Figure II.31 Rétro-réflexion de la lumière d'un feu à Leds vers la caméra.....	69
Figure III.1 Fonction principale et disfonctionnements d'un système anticollision.....	72
Figure III.2 Lois de densité de probabilités d'images brutes non traitées	73
Figure III.3 Lois de densité de probabilités d'une image après traitement.....	74
Figure III.4 Échantillonnage par une caméra du signal d'un feu à Leds modulé en sinusoïdal à la fréquence recherchée ($N_0 = 4, 6, 8, 10$)	79
Figure III.5 Échantillonnage par caméra rapide du signal d'un feu à Leds modulé en créneau à la fréquence recherchée ($N_0 = 4, 6, 8, 10$)	80
Figure III.6 Fonction de transfert du filtre adapté en sinus $N_0=4$ (moyennée sur différentes phases)	84
Figure III.7 Fonction de transfert du filtre adapté en sinus $N_0=8$ (moyennée sur différentes phases)	84
Figure III.8 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau $N_0=4$ (moyennée sur différentes phases)	86
Figure III.9 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau $N_0=8$ (moyennée sur différentes phases)	86
Figure III.10 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau « classique » pour $N_0 = 8, K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases).....	89
Figure III.11 Fonction de transfert du filtre adapté en créneau « 4-phases » pour $N_0 = 8, K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases).....	90
Figure III.12 Calcul des dérivées.....	91
Figure III.13 Fonction de transfert du filtre « multicanaux » sur la dérivée du signal brut pour $N_0 = 8, K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases)	92
Figure III.14 Amplitude moyenne de modulation du signal d'un feu à Leds modulé (unité : D.N.).....	93
Figure III.15 Densité de probabilité du signal de sortie du filtre adapté en créneau « classique » (normalisée entre 0 et 1) sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0	94
Figure III.16 Densité de probabilité du signal de sortie du filtre adapté en créneau « 4-phases » (normalisée entre 0 et 1) sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0	95
Figure III.17 Signaux bruts artificiels d'un passage sombre/dair « symétrique ».....	96
Figure III.18 Probabilité du signal de sortie du filtre par TFD en créneau « classique » sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0 normalisé	99
Figure III.19 Probabilité du signal de sortie du filtre par TFD en créneau « 4-phases » sur signal d'entrée modulé en créneau à f_0 normalisé	99
Figure III.20 Signaux normalisés des signaux bruts de la figure 16	99

Figure III.21 Fonction de transfert du filtre en créneau « classique » pour $N_0 = 8$, $K_0 = 5$ (moyennée sur différentes phases)	100
Figure III.22 Signaux bruts d'un passage du bord sombre / dair.....	103
Figure III.23 Signaux de la figure 21 décalés.....	104
Figure III.24 Signaux correspondants au passage du bord d'objet clair	105
Figure III.25 Signaux du passage de motifs répétitifs	106
Figure III.26 Atténuation du signal en fonction de distance d'observation (visibilité de 30m, 50m et 100m)	108
Figure IV.1 Véhicule d'essai « suiveur » portant la caméra	111
Figure IV.2 Véhicule d'essai « cible » portant les feux à Leds	111
Figure IV.3 Caméra rapide embarquée sur véhicule « suiveur »	112
Figure IV.4 Sigma 4,5mm F2,8 Fisheye Circulaire de Nikon	112
Figure IV.5 Connexion entre la caméra rapide Basler et le PC industriel	114
Figure IV.6 Interface d'utilisation du logiciel NV1000	115
Figure IV.7 Supports du feu à Leds en laboratoire.....	115
Figure IV.8 Support du feu à Leds embarqué	115
Figure IV.9 Feu de position arrière rouge à Leds	116
Figure IV.10 Barre à Leds d'Effilux.....	116
Figure IV.11 Smartek strobe controller (face avant et arrière)	117
Figure IV.12 Scène d'essai au Technocentre Renault.....	118
Figure IV.13 Image brute de la scène montrée sur la figure IV.12.....	118
Figure IV.14 Histogramme de l'image de la figure IV.13.....	119
Figure IV.15 Images des feux à Leds.....	119
Figure IV.16 Signaux bruts des pixels 1-5(feux DRL 1 à 20m).....	120
Figure IV.17 Signal brut du pixel 6 (feu DRL 2 à 100m).....	120
Figure IV.18 Signaux bruts des pixels 7 et 8 (lanterne de signalisation à 20m)	120
Figure IV.19 Signaux du fond	122
Figure IV.20 Signaux bruts issus du fond statique.....	122
Figure IV.21 Spectres des signaux bruts du fond statique	123
Figure IV.22 Scène à « faibles » vitesses angulaires de feux.....	124
Figure IV.23 Trois pixels voisins de l'image du feu DRL 1	125
Figure IV.24 Signaux bruts du pixel N (feu DRL 1 à 40m 30km/h)	126
Figure IV.25 Signaux bruts des pixels N-1, N et N+1 (feu DRL 1 à 40m 30km/h).....	126
Figure IV.26 Signaux bruts donnés par l'image du feu DRL 1 (à 40m 70km/h) sur 3 pixels voisins	127
Figure IV.27 Schéma du scénario de « grandes » vitesses angulaires.....	129
Figure IV.28 Image brute du scénario de « grandes » vitesses angulaires	129
Figure IV.29 Signaux bruts des pixels correspondant à l'image du feu DRL.....	130
Figure IV.30 Spectres des signaux bruts du fond avec vitesse de roulage de 30km/h.....	130
Figure IV.31 Présentation 3-dimensionnelle de l'image de la scène.....	132
Figure IV.32 Exemples d'images calculées par les trois filtres sur signaux d'entrée bruts.....	132
Figure IV.33 Présentation 3-dimensionnelle des images de la figure IV-31.....	133
Figure IV.34 Exemples d'images calculées et seuillées par les trois filtres sur signaux d'entrée bruts ...	133

Figure IV.35 Exemples d'images calculées par les trois filtres sur signaux d'entrée normalisés	134
Figure IV.36 Exemple d'images calculées et seuillées par les trois filtres sur signaux d'entrée normalisés	134
Figure IV.37 Probabilité de détection des feux DRL statique par filtre « classique ».....	136
Figure IV.38 Probabilité de détection des feux DRL statique par filtre « 4-phases ».....	137
Figure IV.39 Probabilité de détection des feux DRL statique par filtre « multicanaux ».....	137
Figure IV.40 Probabilité de détection de la lanterne statique par filtre « classique ».....	138
Figure IV.41 Probabilité de détection de la lanterne statique par filtre « 4-phases »	138
Figure IV.42 Probabilité de détection de la lanterne statique par filtre « multicanaux »	139
Figure IV.43 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 30 km/h)	140
Figure IV.44 Signaux bruts du feu DRL à 60m et à 80m	140
Figure IV.45 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 30 km/h).....	141
Figure IV.46 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 30 km/h).....	141
Figure IV.47 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 50 km/h)	142
Figure IV.48 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 50 km/h).....	142
Figure IV.49 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 50 km/h).....	143
Figure IV.50 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 70 km/h)	143
Figure IV.51 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 70 km/h).....	144
Figure IV.52 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 70 km/h).....	144
Figure IV.53 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « classique » (à 80 km/h)	145
Figure IV.54 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « 4-phases » (à 80 km/h).....	145
Figure IV.55 Probabilité de détection des feux DRL par filtre « multicanaux » (à 80 km/h).....	146
Figure IV.56 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 70 km/h).....	146
Figure IV.57 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 70 km/h)	147
Figure IV.58 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 70 km/h)	147
Figure IV.59 Signaux bruts du feu DRL et du feu d'Effilux.....	149
Figure IV.60 Poteaux catadioptriques réfléchissants en bord de la route	150
Figure IV.61 Entrée de tunnel	150
Figure IV.62 Sortie de tunnel	150
Figure IV.63 Véhicules environnants sur autoroute.....	151
Figure IV.64 Fausse détection sur l'image par filtre « 4-phases ».....	152
Figure IV.65 Signal brut de la seule fausse détection signalée par filtre « 4phases » (seuil = 1,1, scénario de l'entrée de tunnel)	152
Figure 0.1 Route de catégorie T	157
Figure 0.2 Route de catégorie L	157
Figure 0.3 Le tracé en plan de routes en France	158
Figure 0.4 Le profil en long	158
Figure 0.5 Le profil en travers	158
Figure 0.6 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 30 km/h).....	164
Figure 0.7 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 30 km/h)	164
Figure 0.8 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 30 km/h)	165
Figure 0.9 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 50 km/h).....	165
Figure 0.10 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 50 km/h)	166

Figure 0.11 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 50 km/h)	166
Figure 0.12 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « classique » (à 80 km/h)	167
Figure 0.13 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « 4-phases » (à 80 km/h)	167
Figure 0.14 Probabilité de détection de la lanterne par filtre « multicanaux » (à 80 km/h)	168

Liste des tableaux

Tableau I-1 Synthèse de comparaison des différents systèmes anticollision	23
Tableau II-1 Caractéristiques de différentes catégories de routes	35
Tableau II-2 Distances d'arrêt S_a en fonction de la vitesse initiale et de la décélération	40
Tableau II-3 Champs horizontaux nécessaires sur voie en courbe	41
Tableau II-4 Champ de vision du système	43
Tableau II-5 Vitesses angulaires maximales du véhicule C dans le scénario 1 (en rad/s)	49
Tableau II-6 Vitesses angulaires maximales du véhicule D dans le scénario 1 (en rad/s)	50
Tableau II-7 Vitesses angulaires maximales du véhicule E dans le scénario 1 (en rad/s)	50
Tableau II-8 Vitesses angulaires maximales dans le scénario 2 (en rad/s)	51
Tableau II-9 Vitesses angulaires maximales dans le scénario 3 (en rad/s)	51
Tableau II-10 Vitesses angulaires maximales dans le scénario 4 (en rad/s)	51
Tableau II-11 Temps de résidence minimaux pour vitesses extrêmes dans les scénarii typiques (ms)	52
Tableau II-12 Diamètre de l'image d'un feu de position à Leds pour différentes distances	56
Tableau III-1 Niveaux des signaux de sortie des filtres sur signaux d'entrée bruts de la figure 16	96
Tableau III-2 Comparaison des réponses des filtres sur signaux d'entrée normalisés	100
Tableau III-3 Signaux de sortie des filtres	104
Tableau III-4 Signaux de sortie des filtres	104
Tableau III-5 Signaux de sortie des filtres	105
Tableau III-6 Signaux de sortie des filtres	107
Tableau IV-1 Capacité d'enregistrement de la caméra rapide Basler A504k en fonction de la cadence ..	113
Tableau IV-2 Différentes distances utilisées pour la caractérisation des feux à Leds	121
Tableau IV-3 Amplitude moyenne de modulation des feux à Leds en fonction de la distance	121
Tableau IV-4 Vitesses angulaires horizontales théoriques pour les essais avec le feu DRL 1	124
Tableau IV-5 Vitesses angulaires horizontales théoriques pour les essais avec le feu DRL 2	124
Tableau IV-6 Vitesses angulaires horizontales théoriques pour les essais avec la lanterne de signalisation	125
Tableau IV-7 Vitesses angulaires horizontales mesurées pour les essais avec le feu DRL 1	128
Tableau IV-8 Vitesses angulaires horizontales mesurées pour les essais avec la lanterne de signalisation	128
Tableau IV-9 Valeurs de seuils utilisées pour l'évaluation des trois filtres numériques	131
Tableau IV-10 Nombre d'images calculées à 100 Hz sur scène statique (pour feux DRL et lanterne)	131
Tableau IV-11 Nombre de détection des feux DRL à 100 Hz (cibles statiques, signaux d'entrée bruts) ..	135
Tableau IV-12 Nombre de détection de la lanterne à 100 Hz (cible statique, signaux d'entrée bruts) ...	135
Tableau IV-13 Nombre de détection des feux DRL à 100 Hz (cibles statiques, signaux d'entrée normalisés)	135
Tableau IV-14 Nombre de détection de la lanterne à 100 Hz (cible statique, signaux d'entrée normalisés)	135
Tableau IV-15 Pourcentage de détection des feux à Leds DRL et d'Effilux	148
Tableau IV-16 Nombres de fausses détections du filtrage sur signaux bruts	151
Tableau IV-17 Nombres de fausses détections du filtrage sur signaux normalisés	151

Tableau IV-18 Amplitudes de modulation des signaux bruts les plus fortes des fausses détections dans le cas du filtrage sur signaux normalisés	152
Tableau IV-19 Nombre de fausses détections du filtrage sur signaux normalisé en parallèle avec l'examen sur l'amplitude de modulation des signaux bruts (seuil utilisé = 3 DN)	153
Tableau 0-1 Résumé Vitesse Maxima, V85 et vitesse retenue	159
Tableau 0-2 La distance d'arrêt en fonction de vitesse et de décélération	161

Bibliographie

1. ADAS: a range of technologies promoting safety and easier driving experience, Renault press release. <http://group.renault.com/en/passion-2/innovation/renault-a-born-innovator/adas-a-range-of-technologies-promoting-safety-and-easier-driving-experience/>
2. C. Cover, I Knight, F Okoro, I Simmons, G Couper, P Massie, and B Smith (2008). Automated emergency brake systems: technical requirements, costs and benefits. Project report PPR 227. TRL limited for the European Commission.
3. Z. Sun, G. Bebis, and R. Miller (2006). On-road vehicle detection: A review. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 28, no. 5, pp. 694–711.
4. Mak, K. (2013). Automotive Cameras: Chip Platform Strategies Enable Both Mandate Compliance And Enhanced Performance. Automotive Electronics Service. <http://www.strategyanalytics.com/access-service/automotive/powertrain-body-chassis-and-safety/reports/report-detail/automotive-cameras-chip-platform-strategies-enable-both-mandate-compliance-and-enhanced-performance#.Vb8ZpR9xIYN>
5. J. Levinson, J. Askeland, J. Becker, J. Dolson, D. Held, S. Kammel, J. Kolter, D. Langer, O. Pink, V. Pratt, M. Sokolsky, G. Stanek, D. Stavens, A. Teichman, M. Werling, and S. Thrun. Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. Proc. IEEE IV, Jun. 2011, pp. 163–168.
6. Dan Davidian (1994). Anti-collision system for vehicle. Brevet NO. US 5357438 A.
7. Projet européen « OLMO » (rapport final, 1999). On vehicle Laser Micro-system for Obstacle detection. FP4-Esprit4 n° EP 21.235.
8. SBD. (2013). A Camera for every occasion: Technical & Market trends for camera-based ADAS in EU. Analysis report. <http://www.sbd.co.uk/browse/saf524-a-camera-for-every-occasion-technical-market-trends-for-camera-based-adas-in-eu/>
9. Mathias Saint-Venant (2012). Radar anti-collision à corrélation: étude et réalisation. PhD thesis, Université du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes.
10. F. Garcia, P. Cerri, A. Broggi, J. M. Armingo, and A. de la Escalera, Vehicle Detection Based on Laser Radar. New York, NY, USA: Springer- Verlag, 2009
11. FIAT City Brake Control: <http://www.euroncap.com/fr/notations-et-récompenses/récompenses-euro-ncap-advanced/2013-commande-de-frein-city-fiat/>
12. Hyundai concept car tracks your eyes and hand gestures: <http://www.extremetech.com/extreme/146032-hyundai-concept-car-tracks-your-eyes-and-hand-gestures-not-those-gestures>
13. Trivedi, T. G. (2006). Vehicle Surround Capture: Survey of Techniques and a Novel Omni-Video-Based Approach for Dynamic Panoramic Surround Maps. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., VOL. 7, NO. 3. Pages 293-308.

14. G. Toulminet, M. Bertozzi, S. Mousset, A. Bensrhair, and A. Broggi (2006). Vehide detection by means of stereo vision-based obstacles features extraction and monocular pattern analysis. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 15, no. 8, pp. 2364–2375.
15. S. Teoh and T. Brunl (2012). Symmetry-based monocular vehicle detection system. *Machine Vision and Applications* 23(5), pp. 831–842.
16. S. Sivaraman and M. M. Trivedi (2011). Active learning for on-road vehicle detection: A comparative study. *Machine Vision and Applications, Special Issue Car Navigation and Vehicle Systems*, pages 1–13.
17. Vezien, J.-M. (2010). La stéréovision : principes, mise en œuvre et applications. Master RV&A <http://perso.limsi.fr/vezien/stereovision.pdf>
18. A. Broggi, C. Caraffi, R. Fedriga, and P. Grisleri (2005). Obstacle detection with stereo vision for off-road vehicle navigation. *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. CVPR*, Jun. 2005, p. 65.
19. C. Lawrence Zitnick, T. K. (1999). A Cooperative Algorithm for Stereo Matching and Occlusion Detection. Pittsburgh, Pennsylvania 15213: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
20. J. I. Woodlill, R. Buck, D. Jurasek, G. Gordon, and T. Brown (2007). 3D vision: Developing an embedded stereo-vision system. *Computer*, vol. 40, no. 5, pp. 106–108, May 2007.
21. S. Chemg, C.-Y. Fang, C.-P. Chen, and S.-W. Chen (2009). Critical motion detection of nearby moving vehicles in a vision-based driver-assistance system. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 70–82, Mar. 2009.
22. J. Arrospeide, L. Salgado, and M. Nieto (2010). Vehicle detection and tracking using homography-based plane rectification and particle filtering. *Proc. IEEE IV*, Jun. 2010, pp. 150–155.
23. S. Kubota, T. Nakano, and Y. Okamoto (2007). A global optimization algorithm for realtime on-board stereo obstacle detection systems. *Proc. IEEE Intell. Veh. Symp.*, Jun. 2007, pp. 7–12.
24. Subaru EyeSight - la sécurité en ligne de mire : <http://www.subaru.ca/WebPage.aspx?WebSiteID=284&WebPageID=18118>
25. Uwe Franke, Clemens Rabe, Herna ´n Badino, and Stefan Gehrig (2005). 6D-Vision: Fusion of Stereo and Motion for Robust Environment Perception. 27th DAGM Symposium, Vienna, Austria, August 31 - September 2, 2005. Proceedings
26. Lijun Wei, C. C. (2011). Unscented Information Filter Based Multi-sensor Data Fusion Using Stereo Camera, Laser Range Finder and GPS Receiver for Vehide Localization. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.
27. Y. Tan, F. Han, and F. Ibrahim (2007). A radar guided vision system for vehide validation and vehicle motion characterization. *Proc. IEEE ITSC*, Oct. 3–30, pp. 1059–1066.

28. C. Premebida, G. Monteiro, U. Nunes, and P. Peixoto (2007). A lidar and vision-based approach for pedestrian and vehicle detection and tracking. Proc. IEEE ITSC, Oct. 3–30, 2007, pp. 1044–1049.
29. S. Sivaraman and M. M. Trivedi. Combining monocular and stereo-vision for real-time vehicle ranging and tracking on multilane high-ways. Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf., 2011, pp. 1249–1254.
30. C. Hoffmann (2006). Fusing multiple 2D visual features for vehicle detection. Proc. IEEE Intell. Veh. Symp., 2006, pp. 406–411.
31. J. Langheim, A. U. (2001). CARSENSE – New environment sensing for advanced driver assistance systems. Project report. www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=15260
32. X.Mao,D.Inoue,S.Kato,andM.Kagami (2012). Amplitude-modulated laser radar for range and speed measurement in car applications. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 13, no. 1, pp. 408–413.
33. S. Tokoro, K. Kuroda, A. Kawakubo, K. Fujita, and H. Fujinami (2003). Electronically scanned millimeter-wave radar for pre-crash safety and adaptive cruise control system. In Proc. IEEE Intell. Veh. Symp., pp. 304–309.
34. S. Rodriguez, F. V. Freandmont, P. Bonnifait, and V. Cherfaoui (2010). Visual confirmation of mobile objects tracked by a multi-layer lidar. Proc. 13th Int. IEEE Conf. ITSC, pp. 849–854.
35. Sayanan Sivaraman, Mohan Manubhai Trivedi (2013). Looking at Vehicles on the Road: A Survey of Vision-Based Vehide Detection, Tracking, and Behavior Analysis. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., VOL 14, NO. 4.
36. Piao, Jinan, Beecroft, Mark and McDonald, Mike. Vehide Positioning for Improving Road Safety. Transport Reviews, Volume: 30, Issue: 6, Pages: 701-715
37. Arnon, Shlomi (2014). Optimised optical wireless car-to-traffic-light. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies Volume: 25, Issue: 6, Pages: 660-665.
38. J. Fabrizio (2004). Localisation d’obstacles coopératifs par systèmes de vision classiques et panoramiques. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6.
39. R. Aufrère, F. Marmoiton, R. Chapuis, F. Collange, and J.P. Dérutin (2000). Détection de route et suivi de véhicules par vision pour l’ACC. Traitement du Signal, 17(3) :233– 248.
40. Adamu Murtala Zungeru, Jalan Broga (2012). Development of an anti-collision model for vehicles. International Journal of Embedded Systems and Applications (IJESA), vol. 2(4), pp. 21-34.
41. Bai, Bo, Chen, Gang, Xu, Zhengyuan, Fan, Yangyu and leee (2011). Visible Light Positioning based on LED Traffic Light and Photodiode. 2011 IEEE Vehicular Technology Conference.
42. B. Mourllion (2006). Extension d’un système de perception embarqué par communication. Application à la diminution du risque routier. PhD thesis, Université Paris XI.

43. Chaitra Satish (2014). Inter-vehicle communication for collision avoidance using Wi-Fi direct. M.S. thesis, Rochester Institute of Technology.
44. Pang, G. K. H. and Liu, H. H. S..LED location beacon system based on processing of digital images. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Volume: 2, Issue: 3, Pages: 135-150.
45. Triveni Shinde (2013). Car anti-collision and intercommunication system using communication protocol. International journal of science and research, vol. 2, Issue 6, pages187-191.
46. Premachandra, H. Chinthaka N., Yendo, Tomohiro, Yamasato, Takaya, Fujii, Toshiaki, Tanimoto, Masayuki, Kimura, Yoshikatsu and leee (2009). Detection of LED Traffic Light by Image Processing for Visible Light Communication System. 2009 IEEE Intelligent Vehides Symposium, Vols 1 and 2, Pages: 179-184.
47. Premachandra, H. Chinthaka N., Yendo, Tomohiro, Tehrani, Mehrdad Panahpour, Yamazato, Takaya, Okada, Hiraku, Fujii, Toshiaki, Tanimoto, Masayuki and leee (2010). High-speedcamera Image Processing Based LED Traffic Light Detection for Road-to-vehicle Visible Light. 2010 IEEE Intelligent Vehides Symposium (Iv), Pages: 793-798.
48. H. Chinthaka N. Premachandra, Tomohiro Yendo, Mehrdad Panahpour Tehrani, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Toshiaki Fujii, and Masayuki Tanimoto (2010). LED Traffic Light Detection Using a High-speed-camera for a Road-to-vehicle Visible Light Communication System. Japan Science and Technology Information Aggregator, Electronic.
49. Yang, S. H., Kwon, D. H., Kim, S. J., Son, Y. H. and Han, S. K.(2015). Differential Pulse Amplitude Modulation for Multiple-input Single-output OWVLC. Broadband Access Communication Technologies Ix, Volume: 9387.
50. Kim, Jonghun, Lee, Seungwoo, Lee, Yeuhyeong, Hyun, Seungwoo, Ju, MinChul, Park, Youngil and leee (2014). Vehicle-to-Vehide Visible Light Communications Using Sub-Pulse Manchester Modulation. 2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Pages: 481-482.
51. Gong, Jianwei, Jiang, Yanhua, Xiong, Guangming, Guan, Chaohua, Tao, Gang, Chen, Huiyan and leee (2010). The Recognition and Tracking of Traffic Lights Based on Color Segmentation and CAMSHIFT for Intelligent. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (Iv), Pages: 431-435.
52. Chen, Yi-Yuan, Lan, Kuen-Ming, Pai, Hung- I., Chuang, Jen-Hui, Yuan, Chii-Yah and leee (2009). Robust Light Objects Recognition Based on Computer Vision. 2009 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks, Number of Pages: 508-514.
53. Kazuko Hamaguchi, Yuanchen Ma, May Takada, Takayuki Nishijima, Takanori Shimura (2012). Telecommunication Systems in Smart Cities. Hitachi Review Vol. 61, No.3.
54. Yoo, Jong-Ho, Lee, Rimhwan, Oh, Jun-Kyu, Seo, Hyun-Wook, Kim, Ju-Young, Kim, Hyeon- Cheol, Jung, Sung-Yoon and leee (2013). Demonstration of Vehicular Visible Light Communication Based on LED

Headlamp. 2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (Icufn), Pages: 465-467.

55. Akanegawa, M., Tanaka, Y. and Nakagawa, M. (2001). Basic study on traffic information system using LED traffic lights Journal: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Volume: 2, Issue: 4, Pages: 197-203.

56. Shieh, Wern-Yarng, Hsu, Chen-Chien James and Wang, Ti-Ho (2011). A Problem of Infrared Electronic-Toll-Collection Systems: The Irregularity of LED Radiation Pattern and Emitter Design. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Volume: 12, Issue: 1, Pages: 152-163.

57. Vegni, A.M., Biagi, M. (2012). An Indoor Localization Algorithm in a Small-Cell LED-based Lighting System. 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pages 1-7.

58. Zheng, Dongfang, Cui, Kaiyun, Bai, Bo, Chen, Gang, Farrell, Jay A. and Ieee (2011). Indoor Localization Based on LEDs. 2011 IEEE International Conference on Control Applications (Cca), Pages: 573-578.

59. Bernard, T. M. (no. 10, nov 1998). Les rétines artificielles programmables prêtes à sortir du laboratoire. Revue de l'Electricité et de l'Electronique, 93-99.

60. Elouardi, A. (2005). Évaluation des rétines électroniques pour une définition architecturale d'un système monopuce (SoC) dédié à la vision embarquée. Orsay: Thèse de doctorat en Sciences appliquées, Université Paris 11.

61. Thome, N. (2012). Bases du traitement des images. Cours Master. <http://webia.lip6.fr/~thomen/Teaching/BIMA/cours/intro.pdf>

62. Florent, H. (2007). La transformée de Fourier en traitement d'images. Cours Master. <http://humbert-florent.developpez.com/algorithmique/traitement/fourier/>

63. SETRA. (1994). Aménagement des routes principales. <http://dtrf.setra.fr/notice.html?id=Dtrf-0001919>

64. Juyang Wen, P. C. (1992). Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. IEEE Transactions of pattern analysis and machine intelligence, Vol. 14, No.10, pages 965-980.

65. Yalin Xiong, Matties, L. (1997). Error Analysis of a Real-Time Stereo System. Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on, 1087 -1093

66. BLOSTEIN, S.D., Huang, T.S. (1987). Error Analysis in Stereo Determination of 3-D Point Positions. IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL. PAMI-9. NO. 6, pages 752-765.

67. Marius Vasiliu, F.Devos (1996). A Focal Plane Array for Hot Punctual Target Identification and Tracking. Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pages 18-21.

68. Jean-Louis Meyzonnette, T. Lépine (2001). Bases de radiométrie optique. Editions Cépaduès.

69. Benjamaa, M. (2007). Génération de scènes photométriques routières destinées à la conception d'un système de "détection vidéo coopérative point à point". PhD thesis, Université Paris XI, Orsay.
70. Fred E. Nicodemus, J. C. (1977). Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. NBS Monograph 160, 94-145.
71. Frédéric Boily, Michel Tremblay (2014). Le Guide sur la rétro réflexion du marquage routier. Direction du soutien aux opérations, Ministère des Transports Québec.