



HAL
open science

Étude de la propagation optique appliquée à la visibilité routière. La quête du contraste.

Vincent Boucher

► **To cite this version:**

Vincent Boucher. Étude de la propagation optique appliquée à la visibilité routière. La quête du contraste.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université d'Angers (UA), 2023. tel-04438207

HAL Id: tel-04438207

<https://hal.science/tel-04438207>

Submitted on 5 Feb 2024

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.

HABILITATION   DIRIGER DES RECHERCHES

DE
L'UNIVERSITÉ D'ANGERS
ÉCOLE DOCTORALE N  641
*Mathématiques et Sciences et Technologies du numérique,
de l'Information et de la Communication*

Par

Vincent BOUCHER

 tude de la propagation optique appliquée à la visibilité routière
La quête du contraste

soutenue à Angers, le 11 octobre 2023

Unité de recherche :  clairage & Lumière, Cerema Angers

Composition du Jury :

Frédéric Bernardin
Georges Boudebs
Majdi Khoudeir
Mario Marchetti
Georges Zissis

ICTPE, HDR, Cerema Clermont-Ferrand
Professeur, Université d'Angers
Professeur, Université de Poitiers
Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel
Professeur, Université de Toulouse

TABLE DES MATIÈRES

1	L'INFRAROUGE : UNE SOLUTION IDÉALE CONTRE LE BROUILLARD ?.....	5
1.1	La propagation optique en milieu atmosphérique.....	5
1.2	Caractéristiques physiques des brouillards.....	7
1.3	En pratique, dans une salle de brouillard.....	10
1.4	Visible vs infrarouge thermique.....	11
1.5	MWIR vs LWIR.....	15
1.6	La vision active LWIR.....	18
1.7	Conclusion.....	19
2	L'IMAGERIE PAR RÉTRO-INJECTION LASER : COMMENT TRIER LES PHOTONS.....	21
2.1	Stratégies optiques pour la vision en milieu diffusant.....	21
2.2	Théorie et équations des lasers.....	24
2.3	Expérimentations.....	27
2.4	Système d'imagerie par rétro-injection laser sans décalage.....	27
2.5	Système d'imagerie par rétro-injection laser avec décalage.....	32
2.6	Discussion.....	33
3	L'IMAGERIE POLARIMÉTRIQUE : COMMENT CRÉER DU CONTRASTE.....	35
3.1	Introduction.....	35
3.2	Rappels sur la polarisation.....	36
3.3	Formalisme de Mueller.....	37
3.4	Réflexion d'une onde sur une surface.....	38
3.5	Développement du système.....	42

3.6	Méthode directe	44
3.7	Discussion	47
4	L'IMAGERIE DYNAMIQUE À GRANDE DYNAMIQUE : COMMENT MESURER TOUTES LES GAMMES DE LUMINANCE EN ROULANT	49
4.1	Calibration photométrique	50
4.2	Calibration géométrique	52
4.3	Calibration stéréoscopique	55
4.4	Reconstruction HDR	55
4.5	Système mono point de vue.....	57
4.6	Discussion.....	61
5	L'ÉBLOUISSEMENT : COMMENT ÉVALUER LA PERTE DE CONTRASTE	63
5.1	Eblouissement d'incapacité.....	63
5.2	Adaptation visuelle.....	65
5.3	Conclusion	71
6	CONTRASTE & VISIBILITÉ : COMMENT INTÉGRER LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DE LA ROUTE	72
6.1	Modèle de visibilité	72
6.2	Les propriétés optiques des revêtements routiers	74
6.3	Mesurer une table- <i>r</i>	77
6.4	BRDF	80
7	PERSPECTIVES	85

INTRODUCTION

A l'issue d'une thèse en optique non linéaire, j'intègre en 2002 l'Équipe de Recherche Associée (ERA17) au Laboratoire Central des Ponts & Chaussées (LCPC) pour y développer l'activité Optique portée alors par un seul technicien qui s'intéresse aux caractéristiques du brouillard et à la photométrie routière. Cette dernière consiste à mesurer et caractériser ce que perçoit le conducteur automobile à l'aide d'une caméra transformée en œil électronique, dénommée « Cyclope ». Mon arrivée permettra d'élargir les thématiques avec la propagation des rayonnements infrarouges et les systèmes d'imagerie non conventionnels (imagerie laser et imagerie polarimétrique). Au fil des ans, l'équipe s'est étoffée (aujourd'hui, 3 chercheurs, 3 ingénieurs, 1 doctorante) et s'est forgé une solide expertise dans l'étalonnage des capteurs photométriques, la prise de vue dynamique et la modélisation du système visuel humain. Nos activités se déclinent autour de trois axes de recherche :

- La modélisation du système visuel humain par des techniques d'imagerie et des algorithmes de traitement d'images ;
- L'évaluation de la visibilité des objets de l'infrastructure routière ;
- L'optimisation des installations d'éclairage routier.

Nous associons des connaissances issues de la recherche en imagerie, des modèles théoriques en optique et en vision pour proposer des outils et des méthodologies qui participent aux politiques publiques en matière de visibilité routière et de dimensionnement de l'éclairage public.

Le fil rouge de ce mémoire est la quête du contraste. En effet, que ce soit en conditions diurnes ou nocturnes, se déplacer sur une route nécessite une prise d'information adéquate pour percevoir son environnement, ajuster sa trajectoire, repérer la signalisation ou détecter un obstacle potentiel. Au cours de nos déplacements, notre système visuel capte, analyse et traite de nombreuses informations permettant d'agir en conséquence. Quelle que soit l'information perçue, celle-ci réside toujours dans la détection d'un objet par rapport à son voisinage. C'est vraisemblablement pour cela que notre système visuel est « câblé » pour détecter des contrastes. Aussi, pour répondre au besoin de disposer d'un contraste suffisant à tout moment et dans n'importe quelle condition, deux voies d'exploration sont exposées. Dans les situations où le contraste n'est plus détectable, la première voie consiste à substituer à l'œil, un système d'imagerie capable de surpasser les capacités visuelles. Il s'agit dans ce cas d'agir du côté du récepteur du signal et d'utiliser des phénomènes physiques inaccessibles à nos fonctions visuelles (utilisation de longueurs d'ondes au-delà du visible, détection sélective des photons n'ayant pas été diffusés ou encore, mesure de la polarisation de la lumière). La seconde voie réside dans la modélisation des capacités de l'œil et l'amélioration du contraste en optimisant l'infrastructure et l'éclairage. Pour ce faire, il est nécessaire de savoir ce que l'œil voit et comment ces

informations sont interprétées. 'Savoir ce que l'œil voit' consiste à mesurer la scène avec un système d'imagerie ayant les mêmes caractéristiques que l'œil. Il faut alors reproduire sa sensibilité spectrale, sa dynamique (imagerie à grande dynamique), sa résolution spatiale (acuité), sa résolution temporelle (adaptation visuelle). 'Savoir comment ces informations sont interprétées' nécessite d'avoir des modèles de la vision humaine représentatifs de ses performances. Il s'agit alors de reproduire sa capacité à détecter des contrastes (modèle de visibilité) et à quantifier ses limites (modèles d'éblouissement et d'adaptation visuelle). Une fois les données physiques et les modèles à disposition, il devient possible d'étudier l'influence d'un éclairage, d'une géométrie particulière, d'un revêtement sur le contraste perçu et par conséquent d'optimiser tous les éléments contribuant à une bonne perception visuelle.

Je reprendrai donc par la suite les thématiques de l'équipe concernant l'infrarouge, l'imagerie laser et l'imagerie polarimétrique. Je développerai ensuite l'évolution de la thématique originelle, la photométrie routière, vers l'imagerie à grande dynamique, ainsi que les modèles de vision que nous lui associons. Je terminerai avec la thématique la plus actuelle qui concerne la visibilité et les propriétés optiques des revêtements routiers.

"Le débrouillage, le bout de ficelle et le chatterton, sont les trois mamelles de la science et le pont arrière de l'invention."

Pr. Hardy-Petit

1 L'infrarouge : une solution idéale contre le brouillard ?

« Voir à travers le brouillard et la pluie avec une caméra thermique », voilà le titre d'une note technique^[87] éditée par un fabricant de caméras thermiques. Le contenu de la note modère quelque peu ce titre accrocheur mais le discours commercial assène : « un détecteur IR (...) dont la portée est excellente dans le brouillard ». Qu'en est-il réellement de l'apport de ces longueurs d'onde dans la détection de contrastes ? Nous allons tenter de répondre, à la fois à partir de la théorie ainsi qu'à l'aide d'expérimentations. La théorie de la diffusion de Mie nous permettra de prédire l'atténuation due à un milieu diffusant selon les bandes infrarouges. Puis nous confronterons ces résultats à des expérimentations menées dans un tunnel de brouillard.

1.1 La propagation optique en milieu atmosphérique

Lorsqu'un milieu de propagation présente à la fois de l'absorption et de la diffusion, la transmission du milieu sur un parcours x peut s'exprimer comme la somme des coefficients linéiques d'absorption $\mu_a(x)$ et de diffusion $\mu_s(x)$ ¹, appelé coefficient d'extinction du milieu considéré :

$$\mu_{ext}(x) = \mu_a(x) + \mu_s(x) \quad (1-1)$$

Si le milieu de propagation est homogène, c'est à dire si $\mu_{ext}(x)$ est indépendant de x , la transmission s'exprime :

$$\tau(x) = e^{-\mu_{ext} \cdot x} \quad (1-2)$$

Il s'agit là d'une transmission, dite géométrique, qui ne tient pas compte du gain de luminance obtenu par diffusion dans l'axe de propagation. Il est souvent difficile, notamment pour les applications optiques à détection directe, de dissocier les photons transmis de ceux qui ont été diffusés dans la même direction. Ce sera l'objet du chapitre suivant que de trouver des techniques permettant de « trier » les photons. Ainsi, connaître le coefficient d'extinction μ_{ext} selon la composition du milieu atmosphérique, sa température, sa pression, permet de prédire la transmission optique. Cette dernière est la caractéristique la plus significative agissant sur la réduction du contraste des objets observés. Son calcul complet est complexe et des programmes de calcul très évolués^[88] permettent aujourd'hui d'avoir une bonne simulation moyenne de ces effets. Les principaux modèles atmosphériques^{[89], [90], [91]} tiennent compte du spectre solaire réel, des raies d'absorption des composants de l'atmosphère, des diffusions multiples. Ils ont été développés depuis des décennies pour traiter les données satellitaires. Mais pour des applications routières, les distances considérées sont bien moins grandes (quelques centaines de mètres, tout au plus) ; ces modèles deviennent alors

¹ L'indice 's' pour scattering.

peu représentatifs et les effets atmosphériques sur la transmission sont majoritairement décrits par la distance de visibilité^{[88], [92]-[94]}.

Dans le domaine visible, la distance de visibilité V est celle pour laquelle un objet de contraste unitaire C_0 est à la limite de perception à travers le milieu avec un contraste C réduit à 5 %^[94].

$$\frac{C}{C_0} = 5\% = e^{-\mu_{ext} \cdot V} \quad (1-3)$$

Le coefficient d'extinction μ_{ext} (km⁻¹) et la distance de visibilité V (km) sont alors liés par la relation (1-4), valable au voisinage de la longueur d'onde 0,55 μm correspondant au maximum de la sensibilité visuelle diurne :

$$V = \frac{-\ln(0,05)}{\mu_{ext}} \approx \frac{3}{\mu_{ext}} \quad (1-4)$$

A noter qu'au facteur 3 près, il s'agit du libre parcours moyen défini en optique. Notons aussi que le facteur 3 est remplacé par 3,91 chez les anglo-saxons qui utilisent 2 % du contraste initial. On peut élargir la gamme spectrale de validité de cette relation jusqu'à environ 3 μm , tant que les deux hypothèses suivantes sont respectées. La diffusion Rayleigh générée par les petites particules (de taille moléculaire inférieure à la longueur d'onde) doit être négligeable et l'absorption doit rester faible. Une approche empirique utilisant des données météorologiques sur le brouillard^[92] a conduit à étendre la relation précédente avec :

$$\mu_{ext} = \frac{3}{V} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-\alpha} \quad (1-5)$$

Le coefficient α valant :

$$\alpha = \begin{cases} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6 < V < 50\text{km} \\ 0,585 V^{1/3} & \text{si } V < 6\text{km} \end{cases} \quad (1-6)$$

Mais de nouveau, les ordres de grandeur utilisés ne sont pas compatibles avec les distances de visibilité utilisées en météo routières (largement inférieures au kilomètre). Cette approche ne précise pas non plus la relation entre le coefficient d'extinction et la concentration en aérosols donnée par unité de volume, c.à.d. la distribution granulométrique. Or, il est possible de déterminer ce coefficient d'extinction en utilisant un modèle d'interaction entre le brouillard et les ondes lumineuses, basé sur la théorie de Mie^[95]. Il nous faut pour cela connaître précisément les caractéristiques physiques du brouillard.

1.2 Caractéristiques physiques des brouillards

Le brouillard est composé de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air dont le diamètre est en général inférieur à 100 μm . On admet qu'il y a présence de brouillard lorsque la visibilité est réduite à moins de 1 km et que l'humidité relative de l'air atteint le niveau de saturation proche de 100 %. Les brouillards sont caractérisés par différents paramètres physiques tels que la teneur en eau liquide, la distribution en taille des particules, la taille moyenne des particules ou la réduction de visibilité. On distingue généralement deux types de brouillards selon leur mode de formation^{[92], [96]} :

- Les brouillards de rayonnement qui se forment suite à un refroidissement radiatif du sol. Ils apparaissent quand l'air au sol est suffisamment froid et devient saturé (en général dans la nuit ou à la fin de la journée). Le diamètre des particules pour ce type de brouillard présente une faible variation autour de 4 μm .
- Les brouillards d'advection qui se forment à la suite de déplacements de masses d'air chaud et humide au-dessus d'un sol plus froid. Ils sont caractérisés par un diamètre de particules proches de 20 μm .

Pour représenter ces différents types de brouillards, la plupart des études se basent sur des modèles granulométriques. Parmi les lois utilisées pour modéliser la distribution granulométrique, la distribution gamma modifiée est la plus utilisée dans le cas du brouillard^{[92],[93]}.

$$n(r) = c_1 \cdot r^{c_2} \cdot e^{-c_3 \cdot r} \quad (1-7)$$

Où $n(r)$ est le nombre de particules par classe de rayon r , et c_1, c_2, c_3 sont des paramètres utilisés pour caler le modèle sur les observations. La référence [93] propose ainsi une typologie des différents types de brouillard en 4 classes dont les paramètres sont donnés dans le tableau 1-1. r_m est le rayon de mode et N est la concentration des particules.

Tableau 1-1 : paramètres des distributions granulométriques de brouillard

Type de brouillard	Modèle	c_1	c_2	c_3	$r_m(\mu\text{m})$	$N(\text{cm}^{-3})$
advection	1	0.027	3	0.3	10	20
	2	0.066	3	0.375	8	20
rayonnement	3	2.37	6	1.5	4	100
	4	607.5	6	3	2	200

En optique ondulatoire, la théorie de Mie est une théorie de la diffraction de la lumière par des particules sphériques^[97]. Elle permet d'évaluer les sections efficaces d'absorption et de diffusion pour un aérosol de type donné (en fonction de la dimension des particules, de la longueur d'onde du

rayonnement incident et de l'indice de réfraction de la particule). Les hypothèses sont que les particules sont sphériques, homogènes et suffisamment éloignées les unes des autres pour que le champ diffusé par une particule en arrivant sur une autre puisse être calculé en régime de champ lointain^{[95], [98]}. La diffusion de Mie est un problème vectoriel qui implique l'utilisation sous leur forme complète des champs électrique et magnétique. Le lecteur intéressé trouvera les détails de calcul de l'onde diffusée par une particule dans la référence [95] et leur déclinaison en langage informatique dans la référence [99]. On définit le paramètre de taille x et l'indice de réfraction relatif m :

$$x = k \cdot r = \frac{2\pi nr}{\lambda}, \quad m = \frac{k_1}{k} = \frac{n_1}{n} \quad (1-8)$$

Avec r , le rayon de la sphère (l'aérosol, c.à.d. la gouttelette de brouillard), n_1 et n sont les indices de réfraction de l'aérosol et du milieu respectivement. Les conditions limites imposent les coefficients de la solution de l'onde diffusée :

$$\begin{aligned} a_N &= \frac{m\Psi_N(mx)\Psi'_N(x) - \Psi_N(x)\Psi'_N(mx)}{m\Psi_N(mx)\zeta'_N(x) - \zeta_N(x)\Psi'_N(mx)} \\ b_N &= \frac{\Psi_N(mx)\Psi'_N(x) - m\Psi_N(x)\Psi'_N(mx)}{\Psi_N(mx)\zeta'_N(x) - m\zeta_N(x)\Psi'_N(mx)} \end{aligned} \quad (1-9)$$

Où Ψ_N et ζ_N sont les fonctions de Ricatti-Bessel, les primes indiquent la dérivée par rapport à l'argument entre parenthèses. La section efficace d'extinction σ_{ext} peut alors s'exprimer en fonction des coefficients de diffusion a_N et b_N :

$$\sigma_{ext} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{N=1}^{\infty} (2N+1) \Re\{a_N + b_N\} \quad (1-10)$$

De même, pour la section efficace de diffusion σ_s :

$$\sigma_s = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{N=1}^{\infty} (2N+1) (|a_N|^2 + |b_N|^2) \quad (1-11)$$

La section efficace d'absorption se déduit par la différence des deux sections efficaces précédentes. Dans le cas d'aérosols distribués selon une granulométrie $n(r)$, le coefficient d'extinction μ_{ext} est donné par la relation suivante :

$$\mu_{ext} = \int_0^{\infty} \sigma_{ext} n(r) dr \quad (1-12)$$

De la même manière, il est possible de calculer les coefficients d'absorption μ_a et de diffusion μ_s pour connaître chaque contribution dans la transmission. Nous pouvons maintenant calculer l'atténuation d'un faisceau lumineux composé d'une longueur d'onde quelconque à travers les quatre types de brouillards définis précédemment.

La Figure 1-1 représente les distributions granulométriques des 4 types de brouillard^{[77]²}.

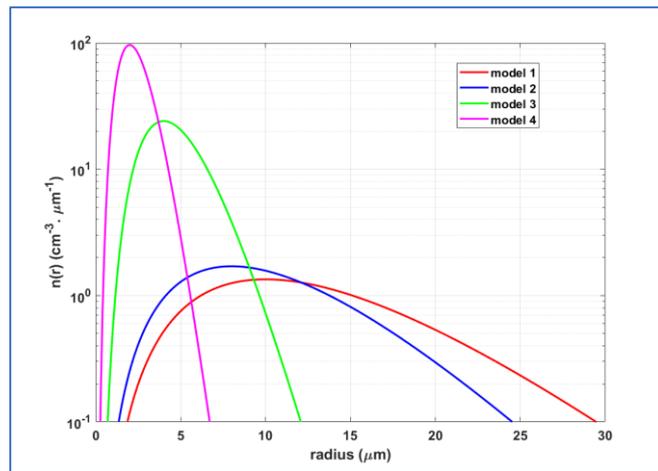


Figure 1-1 : distributions granulométriques des modèles de brouillard

Les modèles 1 et 2 correspondent à des brouillards denses ($V = 110$ m et 160 m) avec rayons de mode de 10 et $8 \mu\text{m}$ respectivement. Les modèles 3 et 4 correspondent à des brouillards modérés ($V = 200$ m et 330 m), avec des tailles de particules plus petites ($r_m = 4$ et $2 \mu\text{m}$). La Figure 1-2 présente les valeurs du coefficient d'extinction μ_{ext} selon les modèles de brouillard sur la gamme de longueurs d'onde de $0,25$ à $15 \mu\text{m}$.

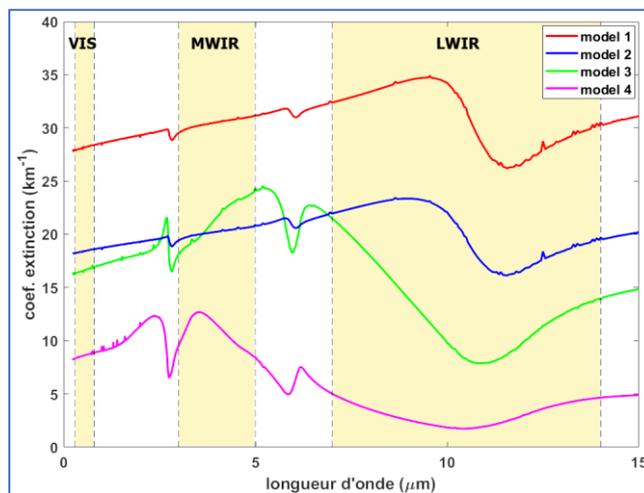


Figure 1-2 : coefficients d'extinction des modèles de brouillard

Quel que soit le type de brouillard, les courbes du coefficient d'extinction ont le même comportement : Du visible vers l'infrarouge, le coefficient d'extinction augmente tant que la longueur d'onde est inférieure au rayon de mode r_m . Ainsi, pour des systèmes d'imagerie en infrarouge proche, et en MWIR (Mid-Wave InfraRed ou bande II, entre 3 et $5 \mu\text{m}$), il n'y a pas de gain à attendre au niveau du contraste. En revanche, dès que la longueur d'onde est supérieure au rayon de mode, on constate une chute notable du coefficient d'extinction. Pour les modèles 1 et 2, la zone LWIR (Long-Wave

² Les références en rouge font partie de ma liste de production scientifique et sont listées à la fin de ce document.

InfraRed ou bande III, entre 7 et 14 μm), présente une atténuation minimale mais le gain total par rapport au visible reste faible. En revanche, concernant les modèles 3 et 4 correspondant à des brouillards légers ($V > 200 \text{ m}$), l'apport de l'infrarouge LWIR devient non négligeable. Le coefficient d'extinction est 2 à 3 fois plus faible dans la zone LWIR que dans le visible donc la distance de visibilité y est 2 à 3 fois plus grande. De plus, toute la gamme de longueur d'onde supérieure à 11 μm présente une atténuation inférieure au visible. Ainsi, « Voir à travers le brouillard avec une caméra thermique », est une assertion vraie mais tout dépend du type de brouillard auquel le système d'imagerie fait face. Pour les brouillards à petite granulométrie, les calculs montrent qu'il y a un réel bénéfice de l'infrarouge thermique par rapport au visible³. En revanche, cela devient moins vrai lorsque la granulométrie du brouillard augmente. De plus, le rayonnement infrarouge thermique possède un autre avantage sur le visible : les éléments de la scène peuvent être sources de rayonnement. Il n'y a alors aucun besoin d'éclairer la scène, elle est rayonnante par nature selon la température et l'émissivité du matériau. Et c'est un avantage essentiel lorsqu'il s'agit de propager l'information à travers un milieu diffusant tel que le brouillard. En effet, quand le photon visible a besoin de faire un trajet aller-retour depuis la source d'éclairage jusqu'au détecteur, le photon infrarouge, lui, part directement de l'objet vers le détecteur. Il gagne donc un trajet, autrement dit, il a deux fois plus de chance d'arriver au détecteur sans avoir été perturbé par le milieu diffusant. L'ensemble de ces modèles théoriques et simulations numériques sont maintenant à confronter avec la réalité. Aussi, de nombreuses expérimentations en tunnel de brouillard ont été mises en œuvre^{[33], [34], [42], [69]}. Nous allons décrire ci-après les principales et leurs résultats.

1.3 En pratique, dans une salle de brouillard

Après avoir décrit rapidement le tunnel de brouillard du Cerema de Clermont-Ferrand, nous verrons une comparaison directe entre visible et infrarouge thermique dans la détection du contraste d'un panneau de signalisation. Nous nous intéresserons ensuite à comparer les deux bandes infrarouges MWIR et LWIR avec différentes granulométries de brouillard.

La salle de brouillard (Figure 1-3) est divisée en deux parties, un tunnel et une serre. Le tunnel est un bâtiment qui permet d'effectuer des mesures de nuit. La serre, avec sa structure transparente, permet de recréer les conditions diurnes et peut être recouverte d'une bâche noire pour recréer les conditions de nuit. Un poste d'observation muni d'une vitre est accolé au tunnel. Le sol de ce dernier

³ Notons que ceci est connu depuis au moins 1948 ! « C'est seulement pour les brouillards ayant les gouttes les plus petites qu'apparaît l'avantage des rayons infrarouges. Il faut tenir compte de ces faits lorsque, pour la transmission d'un signal invisible, on a le choix entre l'ultraviolet et l'infrarouge. » Franz Blaha, Friedrich Blaha, *La diffusion de la lumière dans les brouillards*. J. Phys. Radium, 1948.

est constitué d'un enrobé drainant afin d'évacuer l'eau pulvérisée pendant les essais. La salle de brouillard mesure 30 mètres de long dont 15 mètres pour la serre.

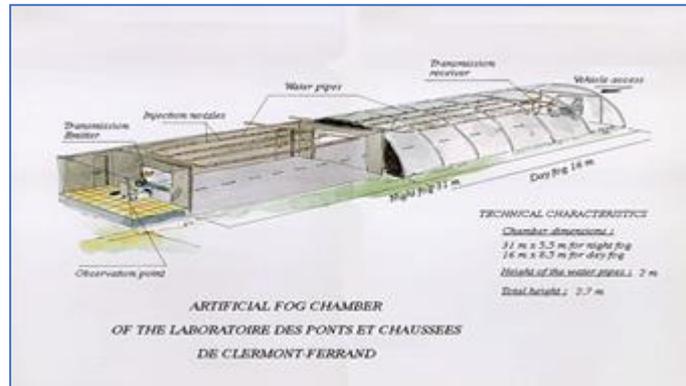


Figure 1-3 : Tunnel de brouillard du Cerema de Clermont-Ferrand

Le processus de création du brouillard artificiel consiste à pulvériser de l'eau sous pression à travers des diffuseurs, générant des microgouttelettes. Le tunnel est à saturation en 15 minutes, le brouillard atteint alors sa densité maximale (environ 5 m de visibilité météorologique). Il est possible de faire varier la taille des gouttelettes générées en changeant la nature de l'eau (du réseau ou déminéralisée). Des transmissiomètres permettent de mesurer la transmission T de l'atmosphère (à 1,20 m du sol), qui est le rapport du flux lumineux reçu Φ sur le flux lumineux Φ_0 émis par une source :

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\mu_{ext} \cdot d} \quad (1-13)$$

Avec d , la distance entre la source lumineuse et la mesure du flux. Un granulomètre (compteur optique de particules) permet également de déterminer les distributions en taille des gouttelettes d'eau ainsi que leur concentration pour des diamètres compris entre 0,4 et 40 μm .

1.4 Visible vs infrarouge thermique

Les travaux menés sur la vision infrarouge pour l'automobile se sont majoritairement concentrés sur la détection d'animaux ou de piétons^{[100]-[102]}. En effet, ceux-ci constituent des sources infrarouges thermiques et peuvent donc être détectés facilement par les capteurs LWIR. Il en est tout autre de la détection de la chaussée ou de la signalisation car celles-ci étant à température ambiante, elles n'émettent pas, ou du moins pas plus, de rayonnement que l'environnement. Il n'y a donc pas ou peu (selon les différentes émissivités) de contraste intrinsèque. A notre connaissance, peu de travaux de recherche sur les capteurs infrarouges se sont intéressés à leurs performances pour la perception de l'infrastructure routière. C'est donc sur la détection de la signalisation, dans des conditions nocturnes avec différents types de brouillard, que portent nos travaux, à l'aide de simulations numériques et d'expérimentations dans un tunnel de brouillard^{[36], [40]}. Pour cela, il faut tout d'abord

créer un contraste intrinsèque, c'est pourquoi nous avons utilisé dans nos premières expériences, une surface chauffante portée à 30°C puis un panneau de signalisation chauffé^[41].



Figure 1-4 : Scène avec trois panneaux de signalisation et une surface chauffante.

Une caméra infrarouge (FLIR S65 LWIR - détecteur non refroidi) est placée directement dans le tunnel de brouillard pour éviter la traversée de la vitre en verre du poste d'observation. Le système d'imagerie photométrique (un videoluminancemètre LMK de la société TechnoTeam) est situé dans le poste d'observation derrière la fenêtre. Pour les essais décrits ci-après, des panneaux (limitation de vitesse à 50 km/h, récupération prioritaire, travaux et cible chauffante) sont placés dans le tunnel de brouillard à 10 m du système de vision infrarouge (Figure 1-4). La distribution de la taille des gouttelettes d'eau est mesurée au cours de la dissipation du brouillard.

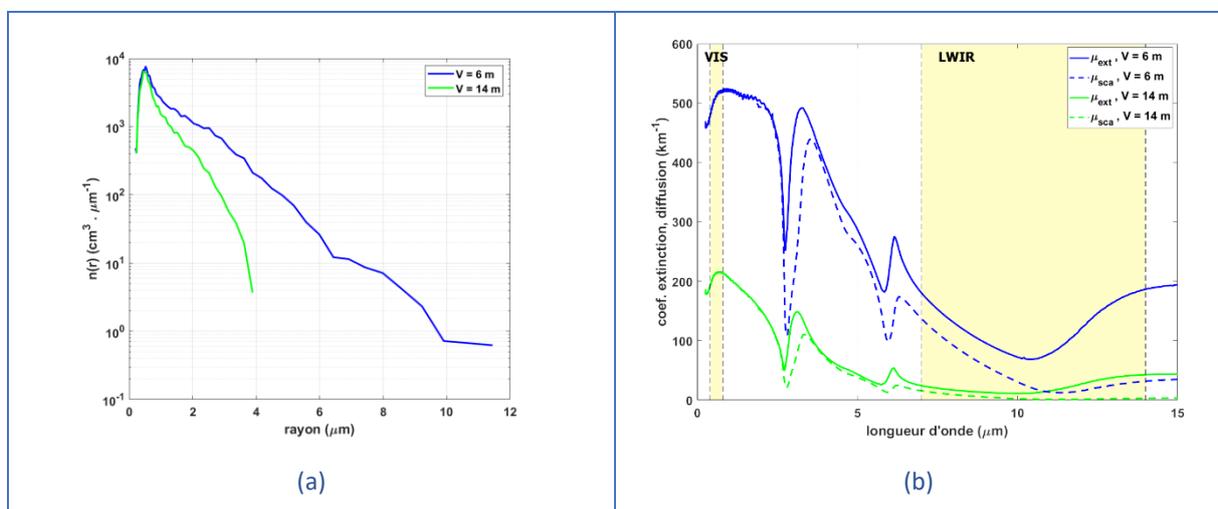


Figure 1-5 : distributions granulométriques (a) et coefficients d'extinction et de diffusion (b)

La Figure 1-5a présente les distributions de la taille des gouttelettes d'eau mesurées dans le tunnel de brouillard pour différentes distances de visibilité météorologique mesurées par le transmissiomètre. Nous sommes ici dans le cas le plus favorable pour l'infrarouge thermique, à savoir des gouttelettes majoritairement inférieures à 1 μm de rayon correspondant à un brouillard de type rayonnement. Les coefficients d'extinction et de diffusion sont calculés avec l'équation (1-12) et tracés dans la Figure 1-5b pour les deux distributions. Les courbes en pointillés représentent la contribution

de la diffusion à l'extinction totale. Dans le visible, les coefficients d'extinction et de diffusion sont confondus, alors qu'ils diffèrent dès que l'absorption n'est plus négligeable à partir de $3 \mu\text{m}$. L'extinction théorique (puisque ceci est issue de la théorie de Mie) étant inférieure dans la gamme thermique, nous devrions observer dans ces situations expérimentales, un gain de contraste important dans l'infrarouge par rapport au visible.

Pour comparer les mesures dans les deux gammes de longueurs d'onde, nous devons définir une méthodologie applicable pour chaque système d'imagerie^[69]. L'équation (1-13) est utilisée pour calculer le coefficient d'extinction. Φ_0 représente, dans ce cas, le signal sans brouillard ; d est alors la distance panneau – capteur. En utilisant l'équation (1-4), nous pouvons également définir une distance de visibilité expérimentale dans les domaines visible et infrarouge. Néanmoins, le signal n'est nécessairement pas le même dans chaque gamme et doit être spécifié : ce sera une zone d'un panneau dans le visible et une zone de la surface chauffante pour l'infrarouge. La Figure 1-6 présente la scène dans le domaine visible pour différentes densités de brouillard. Le signal Φ est choisi dans le panneau inférieur droit. Ainsi, dans chaque image, le signal Φ est mesuré dans la zone représentée sur la Figure 1-6a, pour en déduire la valeur du coefficient d'extinction et finalement la visibilité expérimentale.

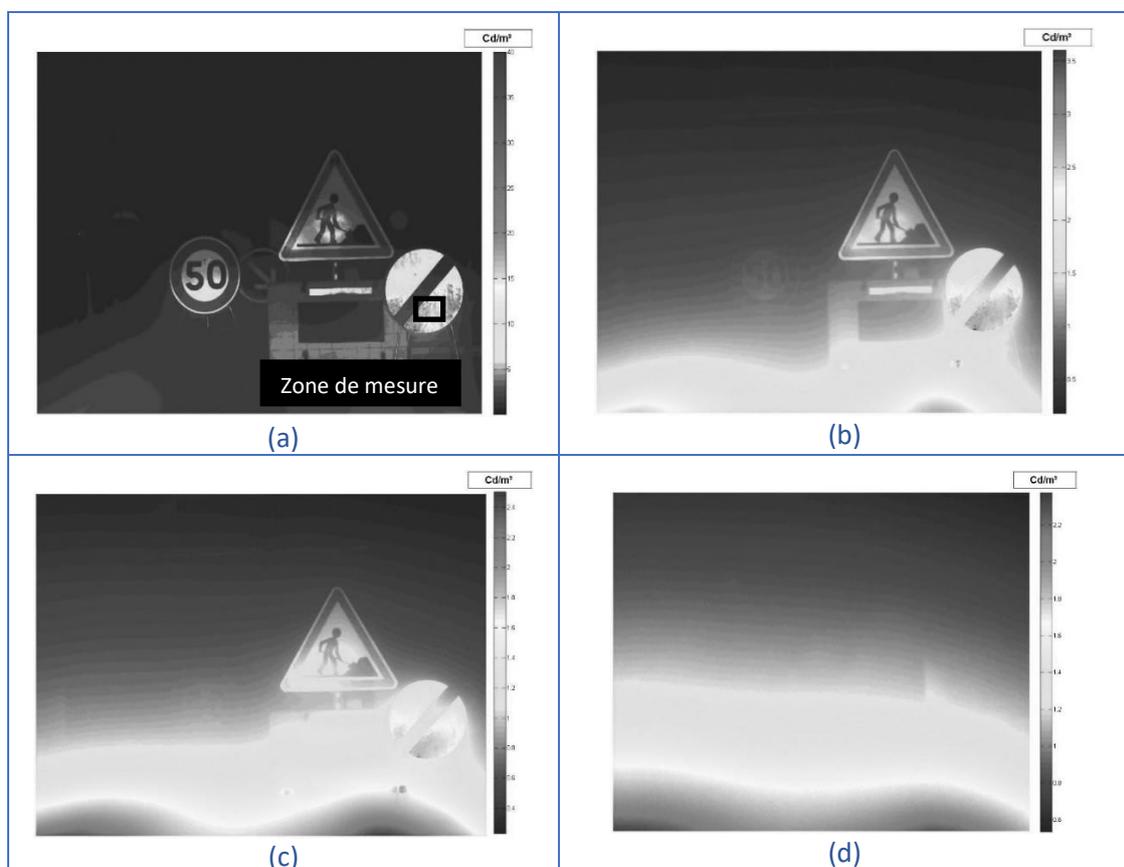


Figure 1-6 : (a) scène dans le domaine visible pour $V = 85 \text{ m}$; (b) $V = 12 \text{ m}$; (c) $V = 10 \text{ m}$; (d) $V = 5 \text{ m}$ mesurées par le transmissiomètre.

La Figure 1-7 donne la visibilité calculée dans les images, tracée en fonction de la visibilité mesurée par le transmissiomètre. Théoriquement, nous nous attendons à une fonction identité entre les deux visibilités, mais nous pouvons distinguer trois régions. La première, entre 5 et 20 m, où la visibilité mesurée dans l'image est surestimée par rapport au transmissiomètre : en effet, à cette densité de brouillard, la rétrodiffusion est prépondérante dans les images (la scène étant éclairée par des phares de voitures) et fait surestimer la valeur du signal issu du panneau alors qu'elle n'est pas présente dans la mesure du transmissiomètre. Pour la deuxième région, entre 20 et 33 m, les deux mesures sont en concordance. Et dans la troisième partie, au-delà de 33 m, les deux mesures diffèrent liées aux inhomogénéités du brouillard qui apparaissent au cours de la dissipation de ce dernier.

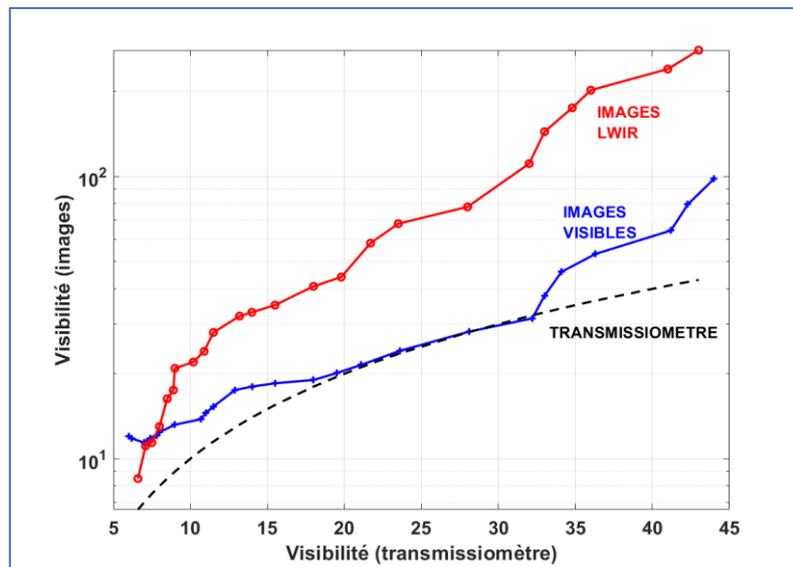


Figure 1-7 : Visibilités calculées à partir d'images visibles et LWIR.

Ensuite, cette visibilité mesurée dans le visible à partir d'images photométriques est comparée avec l'imageur infrarouge. Les Figure 1-8 présentent la scène dans le domaine LWIR pour différentes densités de brouillard. Le signal Φ est choisi sur la cible chauffée placée sous le panneau de chantier (Figure 1-8a).

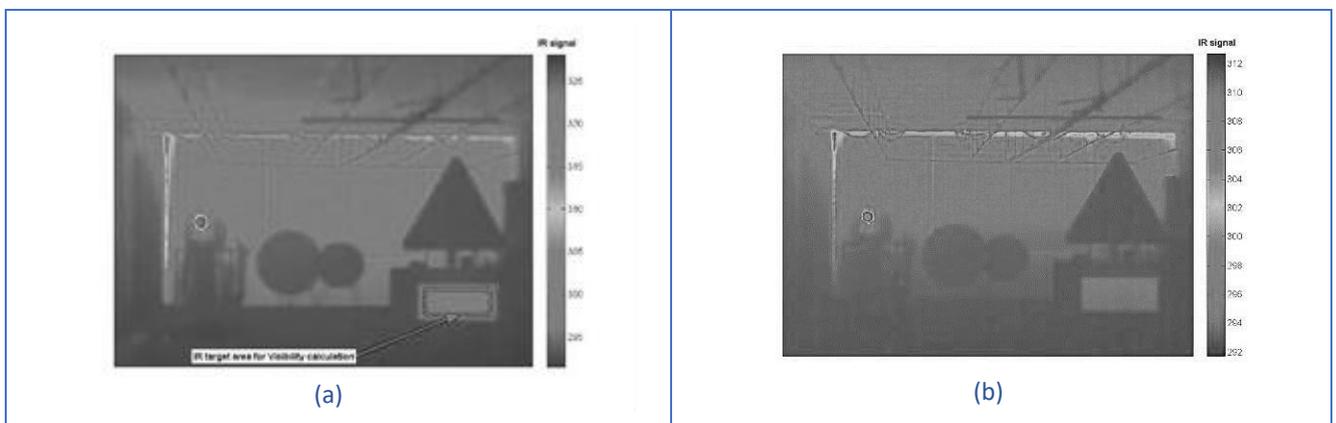


Figure 1-8 : (a) scène infrarouge pour une visibilité de $V = 85$ m; (b) $V = 12$ m mesurées par le transmissiomètre

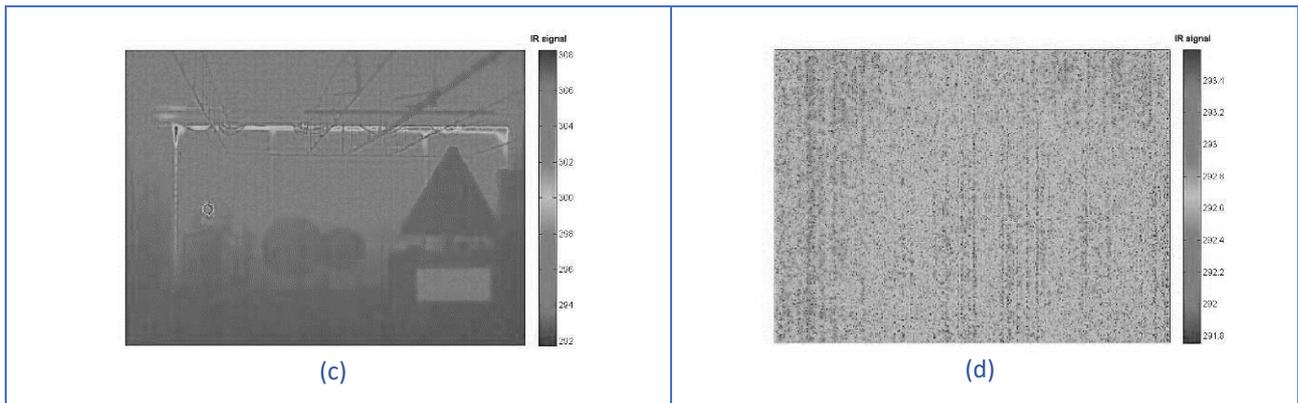


Figure 1-8 : (c) scène infrarouge pour une visibilité de $V = 10$ m; (d) $V = 5$ m mesurées par le transmissiomètre.

Les résultats obtenus sont reportés dans la Figure 1-7 en rouge. Une augmentation rapide de la distance de visibilité infrarouge est observée face à une évolution plus lente de la distance visibilité photopique. Pour la majorité des mesures, la visibilité équivalente dans le domaine LWIR est environ deux fois plus grande que dans le visible. Au vu des résultats expérimentaux obtenus pour ce type de brouillard à petites gouttelettes (rayon de mode autour de $0,5 \mu\text{m}$), on peut raisonnablement admettre qu'il est possible de doubler la visibilité en utilisant un système infrarouge LWIR à condition, et c'est assez désavantageux, d'avoir un contraste initial en température. C'est pourquoi, ces systèmes sont bien adaptés à la détection d'animaux ou de personnes mais beaucoup moins pour détecter l'infrastructure routière (tant que celle-ci n'est pas collaborative).

1.5 MWIR vs LWIR

L'objectif est ici de comparer deux capteurs infrarouges MWIR et LWIR, et de déterminer lequel permet de mieux détecter un contraste issu d'une infrastructure routière (ici des panneaux de signalisation). De nouveau, nous allons agir sur les propriétés de l'infrastructure pour la rendre coopérative^[41]. Celle-ci pouvant être autonome en utilisant l'énergie collectée au niveau de la route^[103]. Nous avons équipé un panneau routier ("chantier") d'une source chauffante radiative c.à.d. une lampe halogène de 1500 W. La Figure 1-9 montre les images dans le visible, en infrarouge MWIR et LWIR. On remarquera que l'infrarouge MWIR conserve l'information du panneau (dessin du travailleur) alors qu'en LWIR, le système n'est sensible qu'à la distribution de la température et au contraste du panneau par rapport au fond.

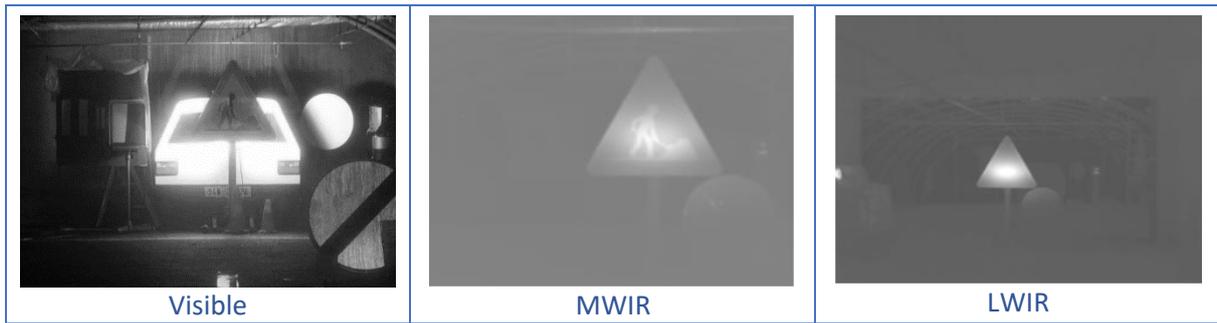


Figure 1-9 : scène dans les 3 domaines spectraux.

Deux granulométries de brouillard ont été testées. L'une, appelée granulométrie fine, a un rayon de mode inférieur à $1 \mu\text{m}$ alors que la seconde, dite grosse granulométrie, a un rayon de mode de $5 \mu\text{m}$. La Figure 1-10a présente ces deux granulométries ainsi que les coefficients d'extinction (Figure 1-10b) associés d'après l'équation (1-12). Pour la fine granulométrie (courbe rouge), les deux bandes infrarouges subissent une atténuation plus faible que le visible, ce qui laisse présager un gain substantiel. Pour la grosse granulométrie en revanche, la bande MWIR n'est pas avantagée par rapport au visible puisque l'extinction y est même supérieure. La bande LWIR devrait apporter un gain de visibilité par rapport au visible mais dans une bien moindre mesure que pour la fine granulométrie.

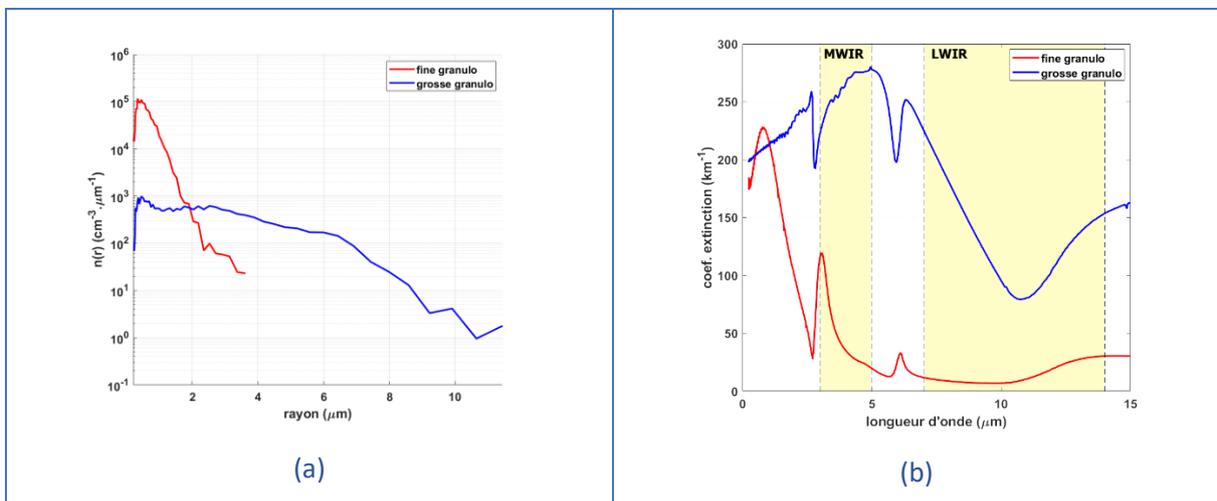


Figure 1-10 : granulométrie et coefficients d'extinction associés.

Pour évaluer la transmission du signal et l'évolution du contraste du panneau, nous avons suivi la même méthodologie que précédemment. Des zones d'intérêt ont été définies dans les images puis évaluées au cours de la dissipation du brouillard pour aboutir à une visibilité infrarouge équivalente.

La Figure 1-11 présente l'évolution de la distance de visibilité équivalente pour les deux bandes infrarouges.

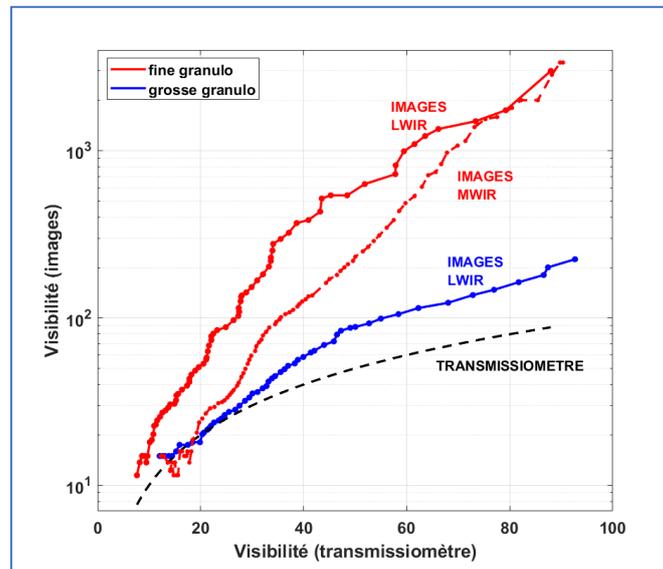


Figure 1-11 : Distances de visibilité équivalentes dans l'infrarouge

Pour la bande LWIR, on observe bien la différence d'atténuation du signal entre les deux granulométries, la granulométrie fine étant largement avantageuse pour la propagation du signal. Le gain apporté par l'infrarouge LWIR dans des brouillards dont le rayon de mode est supérieur à 5 μm est limité et n'apparaît que pour des brouillards peu denses (distance de visibilité au-delà de 30 m). Pour la bande MWIR, le gain par rapport au visible est nul lorsque le brouillard est très dense (distance de visibilité inférieure à 20 m). Il devient positif pour des distances de visibilité supérieures à 20m mais dans une moindre mesure que pour la bande LWIR. Cette bande a cependant l'avantage de conserver un certain contraste sur le message du panneau. Pour la grosse granulométrie, les mesures ont été inexploitable en MWIR en raison d'une protection insuffisante du capteur contre l'eau en suspension dans le tunnel. Ces essais en tunnel de brouillard ont confirmé les résultats des modèles théoriques et ont montré que les systèmes infrarouges peuvent apporter un gain dans la détection du contraste d'une infrastructure routière coopérative en présence de milieu diffusant. Ces modèles ont permis d'apporter des corrections dans les mesures thermiques réalisées in situ^[31]. En revanche, cela nécessite de disposer de cibles thermiques actives permettant de générer un contraste intrinsèque dans le domaine infrarouge et c'est aujourd'hui encore, une grosse contrainte pour ce genre de technologie. Nous avons également évalué dans la référence [30], l'apport de la bande LWIR dans le cadre d'une détection de panneau classique (non chauffé) et avons montré que le bénéfice est alors relativement faible.

1.6 La vision active LWIR

En vision active (c.à.d. en éclairant la scène), le problème réside dans l'éblouissement du dispositif imageur par la lumière rétrodiffusée^[42]. Au regard des calculs et expériences menés au cours de ce chapitre, aucun compromis intéressant ne ressort pour la gamme du visible et du proche infrarouge. Dans l'infrarouge, la meilleure combinaison entre rétrodiffusion et absorption, semble être dans la bande III autour de 11 μm (et dans des bandes supérieures à 25 μm mais ces technologies, dites Térhertz, sont toujours en gestation et très onéreuses). En utilisant la vision infrarouge active, il est possible de détecter des objets ayant un contraste intrinsèque nul. Dans ce cas, il est nécessaire que le coefficient de réflexion des objets soit relativement élevé dans cette gamme de longueur d'onde. C'est en général le cas pour les panneaux de signalisation, les glissières métalliques, ou les catadioptriques. Les lasers CO_2 émettant à 10,6 μm sont de bons candidats pour illuminer la scène. Nous avons donc testé cette configuration dans le tunnel de brouillard (Figure 1-12a). Le cercle bleu localise l'émission du transmissiomètre, le rectangle vert localise la plaque portée à 30 °C, située à 10 m de la caméra et le triangle jaune localise le panneau 'chantier', situé à 25 m de la caméra. Le fond de la scène et le panneau sont à une température de l'ordre de 27 °C. La source lumineuse utilisée est un laser CO_2 (Coherent-Diamond C-30A) dont la puissance est ajustable entre 1 et 30 W. Une lentille de focale 25 mm permet d'élargir la taille du faisceau à environ 1 m de diamètre à 30 m afin d'illuminer l'ensemble du panneau. Le détecteur est une caméra thermique (FLIR A320) de 320 x 240 pixels de micro bolomètres non refroidis.

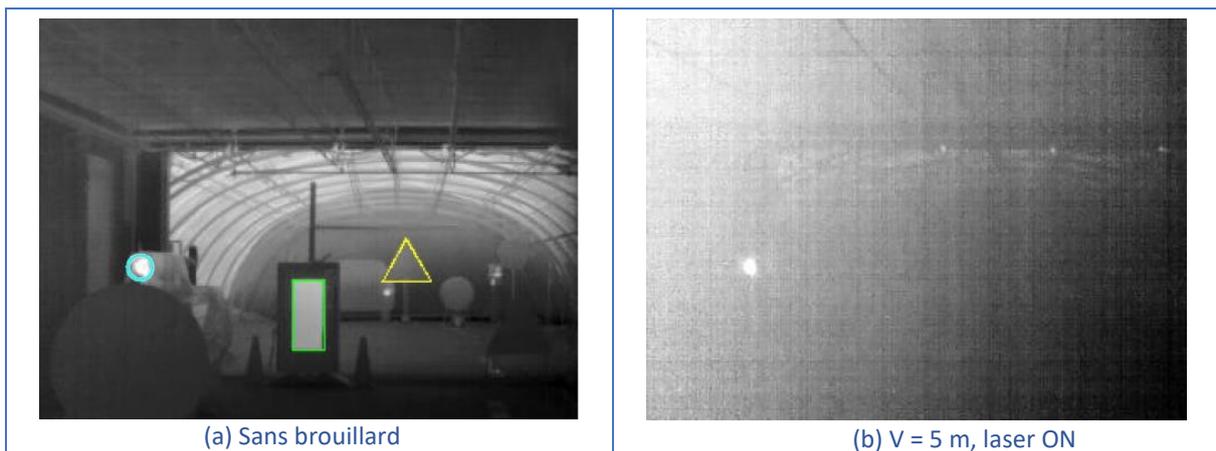


Figure 1-12 : Résultats en imagerie active LWIR (a) sans brouillard, (b) pour V = 5 m

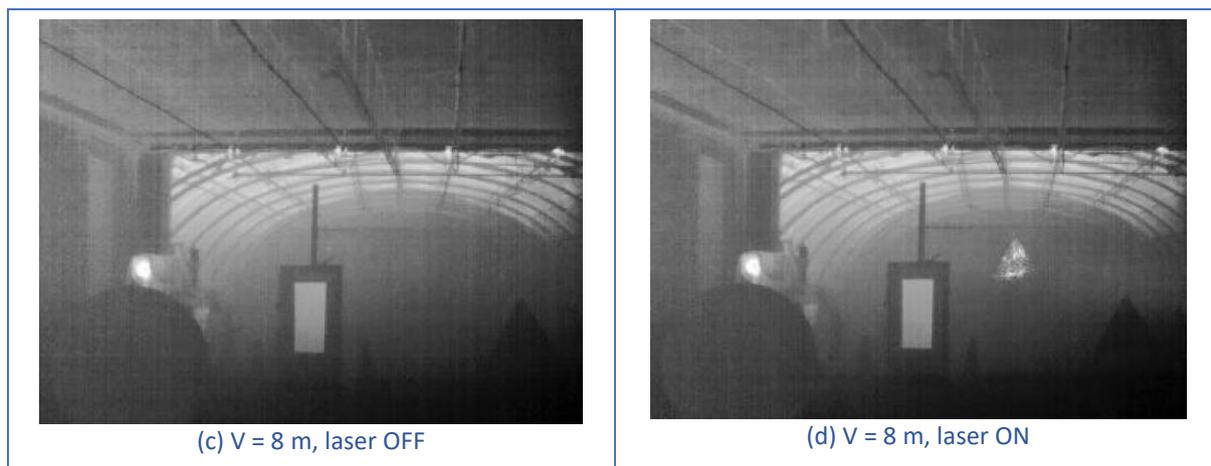


Figure 1-12 : Résultats en imagerie active LWIR pour $V = 8$ m.

Les premières images montrent que la caméra thermique n'est pas éblouie par la rétrodiffusion, même en présence d'un brouillard très dense (Figure 1-12b, $V = 5$ m). On ne distingue aucune trace du faisceau laser dans l'image. Pour une distance de visibilité météorologique de 8 m, deux images ont été enregistrées. Lorsque la source laser est éteinte (Figure 1-12c), seuls les objets ayant un contraste thermique non nul sont visibles. Dès que la source laser est allumée (Figure 1-12d), la caméra détecte le panneau jusqu'à saturer le détecteur montrant qualitativement l'efficacité du dispositif. Nous avons calculé la distance de visibilité équivalente avec la même procédure que précédemment et ce dispositif de vision infrarouge actif permet d'atteindre un gain d'un facteur 15 à 40 sur la distance de visibilité. Cette expérimentation a été à la base du brevet^[55] déposé avec un équipementier aéronautique.

1.7 Conclusion

Sur la base de la théorie de Mie, les calculs des coefficients d'absorption et de diffusion ont été développés en utilisant les données disponibles dans la littérature ainsi que des données expérimentales de distribution de taille des gouttelettes d'eau. Dans le visible, la rétrodiffusion est le phénomène le plus limitant dans la détection des contrastes. Mais cette prédominance de la rétrodiffusion diminue avec l'augmentation de la taille des gouttelettes d'eau (lors du passage du brouillard de rayonnement au brouillard d'advection). Les expériences menées dans le tunnel de brouillard en conditions nocturnes ont permis de comparer les distances de visibilité dans le domaine du visible et des deux bandes infrarouges MWIR et LWIR. Pour le brouillard de rayonnement, l'amélioration de la visibilité dans la gamme LWIR prédite par la théorie a été observée. Cependant, cela nécessite la présence d'un contraste infrarouge intrinsèque coûteux en énergie. C'est pourquoi nous allons maintenant nous intéresser à des techniques d'imagerie permettant de trier les photons et de s'affranchir, autant que faire se peut, de la diffusion.

Références

- [87] « Voir à travers le brouillard et la pluie avec une caméra thermique », https://www.flirmedia.com/MMC/CVS/Tech_Notes/TN_0001_FR.pdf. Consulté le: 4 mai 2023.
- [88] M. Hess, P. Koepke, et I. Schult, « Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC », *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 79, no 5, p. 831-844, mai 1998, doi: 10.1175/1520-0477(1998).
- [89] F. X. Kneizys, E. Shettle, L. W. Abreu, et J. H. Chetwynd, « User guide to LOWTRAN 7 ». AIR FORCE GEOPHYSICS LABORATORY, 1988. Consulté le: 5 janvier 2023.
- [90] A. Berk, P. Conforti, R. Kennett, T. Perkins, F. Hawes, et J. van den Bosch, « MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code », SPIE Defense + Security, M. Velez-Reyes et F. A. Kruse, Éd., Baltimore, Maryland, USA, juin 2014, p. 90880H. doi: 10.1117/12.2050433.
- [91] J. G. Chetwynd, J. Wang, et G. P. Anderson, « FASCODE: An update and applications in atmospheric remote sensing », présenté à Optical spectroscopic techniques and instrumentation for atmospheric and space research, San Diego USA, 24 juillet 1994. Consulté le: 5 janvier 2023.
- [92] Y. Cojan, « Propagation du rayonnement dans l'atmosphère », fondamentaux de l'optique-42448210, Encyclopédie en ligne Techniques de l'Ingénieur, 1995. Consulté le: 10 janvier 2023.
- [93] E. P. Shettle et R. W. Fenn, « Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties ». Air Force Geophysics Laboratory, 1979.
- [94] W. E. K. Middleton et V. Twersky, « Vision Through the Atmosphere », *Phys. Today*, vol. 7, no 3, p. 21-21, mars 1954, doi: 10.1063/1.3061544.
- [95] C. F. Bohren et D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [96] G. Brasseur, *Physique et chimie de l'atmosphère moyenne*. Paris ; New York: Masson, 1982.
- [97] « Théorie de Mie ». <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Theorie-de-Mie.html>. Consulté le: 4 mai 2023.
- [98] H. C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*. Dover Publications, 2012.
- [99] C. Mätzler, « MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption ». Université de Bern, 2002.
- [100] Z. Li, K. Wang, L. Li, et F.-Y. Wang, « A Review on Vision-Based Pedestrian Detection for Intelligent Vehicles », in 2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Shanghai, China: IEEE, déc. 2006, p. 57-62. doi: 10.1109/ICVES.2006.371554.
- [101] A. Durand et al., « IRFPA modeling: examples and applications in SWIR and LWIR », *European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security*, R. G. Driggers et D. A. Huckridge, Éd., London, United Kingdom, déc. 2004, p. 304. doi: 10.1117/12.579358.
- [102] P. Marchal, D. Gavrilu, L. Letellier, M.-M. Meinecke, R. Morris, et M. Töns, « SAVE-U : An innovative sensor platform for Vulnerable Road User protection », *Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, 16 novembre 2003.
- [103] « La route de cinquième génération », IDDRIM et IFSTTAR, juin 2013. <https://www.idrrim.com/ressources/documents/3/1675,route-de-cinquieme-generation.pdf>. Consulté le: 4 mai 2023.

2 L'imagerie par rétro-injection laser : Comment trier les photons

Depuis des décennies, la vision à travers les milieux diffusants constitue une thématique de recherche importante notamment pour le diagnostic médical puisque les tissus biologiques font partie intégrante des milieux diffusants. Aujourd'hui, l'attrait de systèmes d'imagerie pour supplanter les techniques existantes comme l'IRM, la radiographie ou les ultrasons est justifié par le fait que ces méthodes optiques soient non invasives, non ionisantes, et offrent une bonne résolution à coût raisonnable.

La méthode d'imagerie laser LOFI (Laser Optical Feedback Imaging) est basée sur l'analyse de la dynamique d'un laser réinjecté par la lumière provenant d'une cible. Le faisceau émis par le laser est focalisé sur la cible. Seuls les photons réfléchis provenant de la cible sont réinjectés dans le laser et agissent sur la dynamique du laser. Il se produit alors, dans la cavité laser, une modulation de la fréquence optique. La détection de la réinjection provenant de la cible se fait sur cette modulation et donne accès à des mesures de type interférométrique. Cette technique a tout d'abord été développée au Laboratoire de Spectrométrie Physique de Grenoble^{[104], [105]} et l'objectif de cette collaboration est de développer un imageur LOFI compact et donc transportable pour réaliser des mesures sur le terrain dans des conditions de brouillard proches de celles rencontrées sur les routes. Nous verrons dans un premier temps, les différentes techniques optiques permettant de trier les photons. Nous focaliserons ensuite l'exposé sur la réinjection laser, tout d'abord avec une approche théorique sommaire, puis en testant en laboratoire puis sur le terrain, deux variantes de la technique LOFI.

2.1 Stratégies optiques pour la vision en milieu diffusant

On peut définir différents types de photons lors de la propagation de la lumière à travers un milieu diffusant (Figure 2-1).

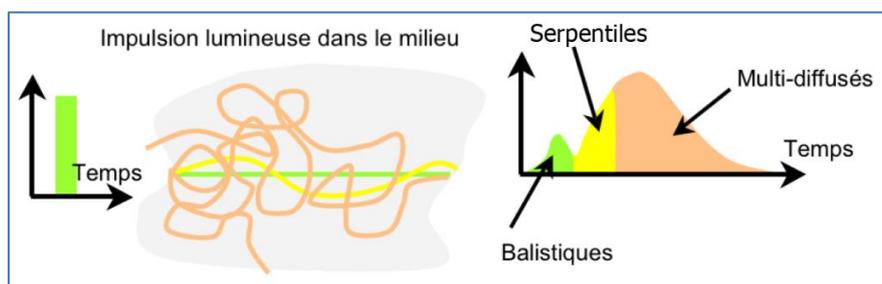


Figure 2-1 : Les différents types de photons liés à la propagation en milieu diffusant

En effet, nous verrons par la suite que les techniques d'imagerie optique sont classées en fonction des photons qu'elles utilisent. **Les photons balistiques** se propagent en ligne droite sans être diffusés dans le milieu. Ils contiennent l'information utile sur une éventuelle cible lors d'un trajet aller-retour. Malheureusement, ces photons balistiques sont très peu nombreux puisqu'ils subissent une

diminution exponentielle à la traversée du milieu (cf. l'équation 1-2 introduisant le coefficient d'extinction). **Les photons serpentiles** sont des photons peu diffusés. Autrement dit, ils ont une faible différence de marche par rapport au chemin parcouru par les photons balistiques. **Les photons diffusés** ont subi un changement de direction radical ou ont été multidiffusés. On distingue parmi eux, **les photons rétrodiffusés**, les plus gênants, puisqu'ils vont se propager dans la même direction que les photons porteurs de l'information utile. Les photons diffusés sont à l'origine du bruit et vont contribuer fortement à réduire le contraste. La solution idéale pour faire de l'imagerie à travers un milieu diffusant est donc de sélectionner uniquement les photons balistiques, et d'éliminer les photons diffusés.

2.1.1 Sélection spatiale : La microscopie confocale

La microscopie confocale permet de séparer les photons balistiques des autres photons, mais aussi de sélectionner une profondeur d'observation précise dans le milieu en éliminant la lumière qui provient de plans situés plus ou moins en profondeur^{[106], [107]}. La lumière est fortement focalisée dans un plan d'observation à l'aide d'un objectif de microscope. Ce même objectif permet aussi de faire l'image du point de focalisation sur le détecteur. Un diaphragme permet d'éliminer la lumière provenant des autres plans, proches du plan de focalisation, mais aussi une grande partie de la lumière diffusée. C'est une technique point-à-point qui nécessite un balayage du spot lumineux incident dans deux ou trois dimensions selon le type d'imagerie souhaitée.

2.1.2 Sélection temporelle : porte électronique

Les photons balistiques ou serpentiles font les trajets les plus courts à travers le milieu diffusant et ont, par la même occasion, les temps de traversée les plus brefs. C'est sur ce constat que se basent les techniques optiques de sélection temporelle de photons. Techniquement, pour ne détecter que les photons balistiques ou très peu diffusés, on réalise une porte temporelle (électroniquement) ne laissant passer que les premiers photons^{[108], [109]}. Cette porte étant déclenchée selon la distance à laquelle on veut détecter le signal. Plus l'épaisseur de milieu traversé est importante et plus il faut élargir la porte pour récolter du signal. Néanmoins, cette action se fait au détriment de la résolution spatiale. Un compromis est alors à trouver entre la résolution et le nombre de photons.

Ce genre de système a été développé pour des applications routières^{[110], [111]} sans pour autant faire preuve de son efficacité dans le brouillard (vraisemblablement en raison des puissances optiques nécessaires). L'avantage mis en avant est le fait de pouvoir imager plus loin que la portée des phares. Il existe aussi des applications à but militaire, notamment développées par l'institut militaire franco-allemand Saint-Louis^{[112], [113]}. Leur technique de sélection temporelle utilise une illumination laser impulsionnelle courte de l'ordre de 200 ns à une fréquence de 14 kHz pour une portée de 2 km. L'illuminateur a une puissance moyenne de 1,4 W. Cette impulsion est synchronisée avec une porte

électronique suivie d'un détecteur amplifié. Le temps d'ouverture est de l'ordre de la nanoseconde permettant de visualiser des tranches d'épaisseur de quelques mètres. Comme le montrent les images de la Figure 2-2, ce système est performant en présence de brouillard dense^{[69], [72]}. Cependant, étant données les puissances laser mises en jeu et le coût d'un tel dispositif, seules des applications militaires trouvent écho dans cette technique.



Figure 2-2 : Résultats obtenus par porte temporelle pour un panneau à 30 m dans le brouillard

2.1.3 Sélection par cohérence optique : Tomographie

La tomographie (racine grecque *tomê*, coupe, et ainsi, représentation en coupes) est une variante de la sélection temporelle en utilisant la propriété que seuls les photons balistiques conservent leur cohérence dans les milieux diffusants et peuvent interférer^[114]. En s'aidant de la faible longueur de cohérence d'une source lumineuse, il est possible d'effectuer un tri par recombinaison interférentielle entre les trains de photons évoluant dans le milieu diffusant et ceux issus d'un bras de référence. Il existe des systèmes de Tomographie Optique Cohérente (OCT en anglais) plein champ utilisant des caméras^{[115], [116]}. Cette méthode OCT a également été testée pour notre application dans le cadre de la thèse d'E. Belin^[83] mais ne sera pas développée ici.

2.1.4 Imagerie par rétro-injection laser

La technique LOFI (Laser Optical Feedback Imaging) a tout d'abord été développée au Laboratoire de Spectrométrie Physique de Grenoble^{[104], [105], [117]}. Elle est basée sur une détection cohérente utilisant la lumière rétro-injectée dans la cavité laser. Le champ intra-cavité joue le rôle de filtre spatial, de faisceau de référence et d'amplificateur optique. Comme la source et le récepteur sont confondus, le système est auto-aligné. L'onde qui revient dans la cavité laser crée une instabilité dans le champ intra-cavité. Ces instabilités ont longtemps été problématiques dans le développement des laser et on cherchait à s'en affranchir le plus possible en empêchant le retour de la lumière. Pour notre

application, au contraire, nous allons mettre à profit ces instabilités pour nous en servir comme détecteur. Pour appréhender le phénomène de rétro-injection laser et les mesures que l'on peut en tirer, nous développerons ici, sommairement, les équations de base des lasers tout d'abord en fonctionnement classique puis en régime de rétro-injection. Dans ce dernier cas, nous montrerons que le laser se comporte alors comme un détecteur puisque son intensité peut être reliée à la réflexion du faisceau sur un objet ainsi qu'à la distance séparant le laser et l'objet.

2.2 Théorie et équations des lasers

Les propriétés d'un laser peuvent être modifiées par une rétro-injection optique au sein de sa cavité. Parmi tous les lasers, certains sont particulièrement sensibles à la rétro injection. Ces laser sont définis par la condition $\gamma_c > \gamma_1$, qui sont respectivement le taux d'amortissement de la cavité et le taux d'amortissement de l'inversion de population. Les lasers solides (type microlaser) et semi-conducteurs (type diode laser) peuvent entrer dans cette catégorie. Lors du démarrage de ces lasers, il existe un régime d'oscillations qui s'établit avant de s'amortir et de rapidement atteindre un état stationnaire. Cependant, en fonctionnement continu, la moindre perturbation interne ou externe, va réexciter ces oscillations. Ce phénomène de réexcitation a posé de nombreux problèmes dans la plupart des utilisations de ces lasers, mais c'est précisément lui que nous allons exploiter pour faire de l'imagerie.

Le fonctionnement temporel d'un laser peut être décrit par deux paramètres : l'inversion de population $N(t)$ et le champ électrique $E(t)$ relié à l'observable intensité $I(t) = |E(t)|^2$. Ce fonctionnement peut être décrit par un système d'équations couplées dites de Lang-Kobayashi^[118].

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma_1(N_0 - N(t)) - BN(t)|E(t)|^2 \\ \frac{dE(t)e^{i\omega t}}{dt} = \left[i\omega_c + \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c) \right] E(t)e^{i\omega t} \end{cases} \quad (2-1)$$

Où $\gamma_1 N_0$ est le taux de pompage, ω_c la pulsation de résonance de la cavité, ω la pulsation optique du champ et B le coefficient d'Einstein. En décomposant le champ électrique en amplitude et en phase selon :

$$E(t)e^{i\omega t} = E_c(t)e^{i\varphi_c(t)}e^{i\omega t} \quad (2-2)$$

On obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma_1(N_0 - N(t)) - BN(t)|E_c(t)|^2 \\ \frac{dE_c(t)}{dt} = \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c)E_c(t) \\ \frac{d\varphi_c(t)}{dt} = \omega_c - \omega \end{cases} \quad (2-3)$$

Les solutions stationnaires de l'inversion de population et du champ électrique sont calculées directement. On obtient alors :

$$\begin{cases} N_S = \frac{\gamma_c}{B} \\ E_S^2 = E_{sat}^2(\eta - 1) \end{cases} \quad \text{avec} \quad E_{sat}^2 = \frac{\gamma_1}{B} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{BN_0}{\gamma_c} \quad (2-4)$$

Ce système donne l'intensité laser émise en fonction des paramètres caractéristiques de la cavité laser. Grâce à la théorie des perturbations, on peut exprimer les variations temporelles d'intensité laser $I(t)$ comme des fluctuations $\Delta I(t)$ autour de la valeur stationnaire I_S :

$$I(t) = I_S + \Delta I(t) = I_S + \Delta I_0(t) \exp\left(-\frac{\gamma_1 \eta t}{2}\right) \cos(\omega_r t + \theta) \quad (2-5)$$

Les conditions initiales définissent la phase θ et l'amplitude ΔI_0 . Les oscillations de l'intensité laser à la pulsation ω_r sont amorties de façon exponentielle au cours du temps avec un taux égal à $\frac{\gamma_1 \eta}{2}$. On accède, grâce à l'équation (2-5), à l'évolution de l'intensité du laser en fonction des paramètres caractéristiques de la cavité. La Figure 2-3 illustre l'allure de l'intensité laser au démarrage en fonction du temps, où l'on note la décroissance exponentielle de l'amplitude de modulation.

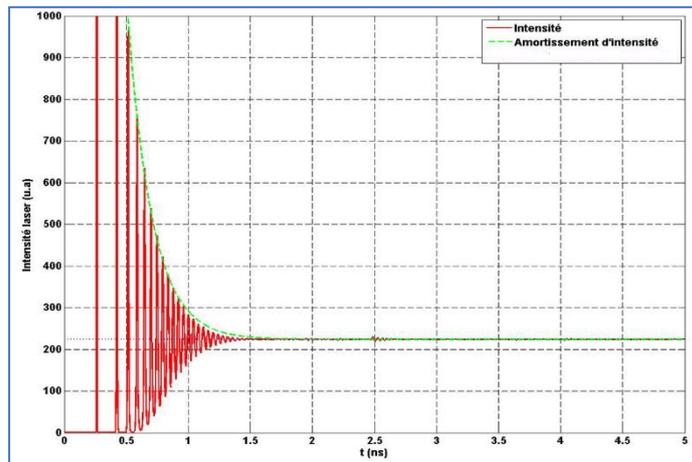


Figure 2-3 : Intensité au démarrage du laser (source : thèse d'E. Belin)

2.2.1 Influence de la rétro-injection

Considérons maintenant un laser pour lequel une partie de lumière émise réintègre la cavité. Cela correspond au couplage de la cavité avec une surface externe réfléchissant la lumière incidente. En introduisant la réflectivité de la cible R_{eff} reliée au taux d'amortissement de la cavité laser par :

$$\gamma_{ext} = \gamma_c \sqrt{R_{eff}} \quad (2-6)$$

Le système des équations de Lang-Kobayashi devient alors :

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma_1(N_0 - N(t)) - BN(t)|E(t)|^2 \\ \frac{dE(t)e^{i\omega t}}{dt} = \left[i\omega_c + \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c) \right] E(t)e^{i\omega t} + \gamma_{ext}E(t - \tau)e^{i\omega(t-\tau)} \end{cases} \quad (2-7)$$

Le terme en γ_{ext} étant le champ rétro-injecté comportant un retard temporel lié au temps de vol $\tau = 2d/c$, entre le laser et la cible séparés d'une distance d .

L'intensité laser en présence de réinjection est alors donnée par :

$$I(t) = 2\gamma_{ext}\gamma_c I_s \sqrt{\frac{\gamma_1^2 \eta^2 + \Omega^2}{(\Omega^2 - \omega_r^2)^2 + \gamma_1^2 \eta^2 \Omega^2}} \cos \left[\Omega t - (\omega + \Omega)\tau + \text{atan} \left(\frac{\Omega(\Omega^2 - \omega_r^2 + \gamma_1^2 \eta^2)}{\omega_r^2 \gamma_1 \eta} \right) \right] \quad (2-8)$$

L'évolution de l'intensité d'un laser soumis à la rétro-injection est présentée dans la Figure 2-4. Le temps de vol aller-retour est fixé à 6 ns soit une distance aller-retour de 1 m. Après stabilisation autour de la valeur stationnaire, la rétro-injection réexcite les oscillations pour tendre vers une nouvelle valeur stationnaire. Expérimentalement, on devrait donc observer une modulation de l'intensité dont l'amplitude reflète la dynamique du signal.

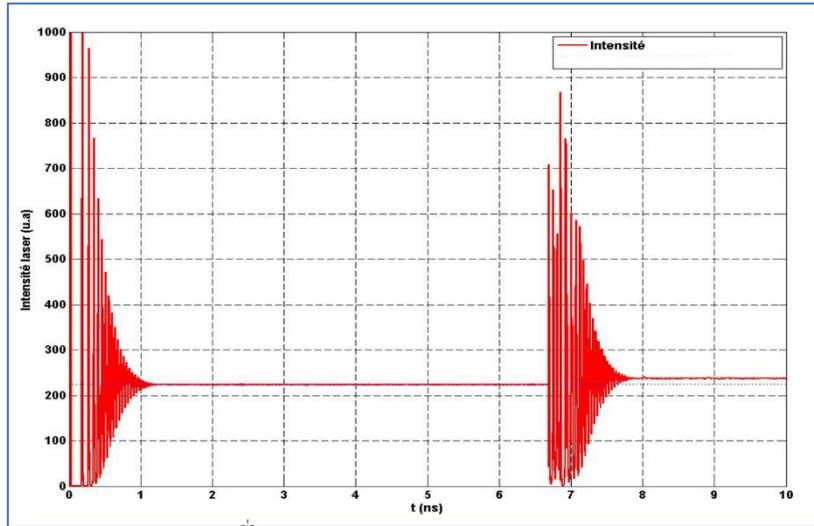


Figure 2-4 : Intensité d'un laser soumis à une rétro-injection (source : thèse d'E. Belin)

2.2.2 Influence de la rétro-injection avec décalage en pulsation

Il est également possible de décaler la pulsation optique du faisceau laser. On montre alors (les détails de calcul sont à retrouver dans la thèse d'E. Belin^[83]) que l'intensité du laser oscille à la pulsation de décalage et qu'il y a une résonance lorsque celle-ci approche la pulsation propre du laser ω_r . L'amplitude des oscillations est alors maximale, ce qui augmente la dynamique et la sensibilité du système. Des simulations numériques ont montré qu'on pouvait atteindre un facteur 100 dans les amplitudes de modulation pour un système dans cette configuration.

2.3 Expérimentations

Dans le dispositif d'imagerie par rétro-injection, la source laser représente l'élément essentiel du montage puisqu'elle joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur. Une source microlaser se compose d'une diode de pompe, d'un matériau (cristal ou verre) qui sert de milieu actif et d'une cavité résonante (miroirs déposés en couches minces ou séparés du cristal). Le milieu actif du matériau est pompé optiquement à l'aide d'une source de puissance contrôlée en température pour assurer une stabilité en longueur d'onde offrant un rendement optimal pour le matériau. Nous avons donc développé un système d'imagerie basé sur un verre (matrice de silice) codopé $\text{Yt}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ (ytterbium/erbium) émettant sur la raie de l'erbium à $1,55 \mu\text{m}$ pour une puissance de 48 mW. Cette longueur d'onde permet d'être dans le domaine de sécurité oculaire et les composants optiques sont bien meilleur marché du fait des applications dans les télécommunications. De plus, nous avons montré la possibilité d'accroître la sensibilité de ces laser lorsque la fréquence optique est décalée. Ceci a donné lieu à un second système. A travers ce chapitre, nous décrivons les deux configurations, les moyens d'acquisition associés et les résultats obtenus en laboratoire^{[7], [71], [74], [76], [78]} ainsi qu'en tunnel de brouillard^[63].

2.4 Système d'imagerie par rétro-injection laser sans décalage

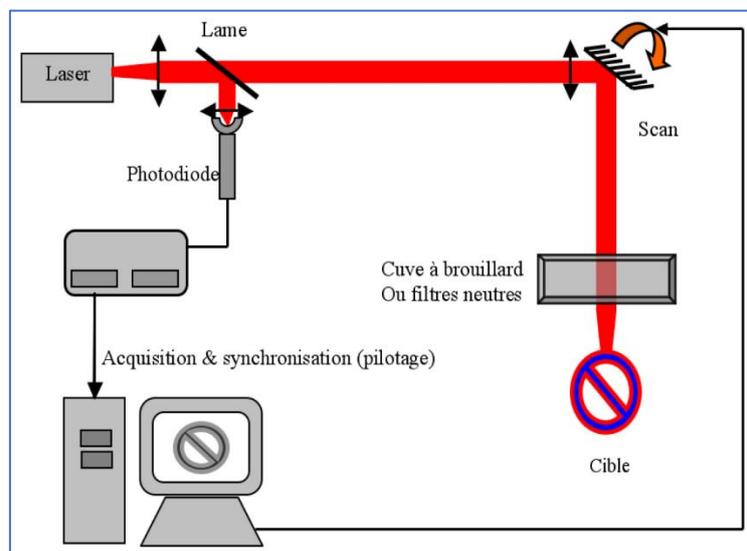


Figure 2-5 : Dispositif d'imagerie par rétro-injection (source : thèse d'E. Belin)

A l'aide d'un système de télescope optique, le faisceau d'un microlaser est focalisé sur l'objet à imager (Figure 2-5). En laboratoire, le faisceau est soit atténué à l'aide de filtres à densité optique variable simulant l'absorption du milieu, soit dirigé vers une cuve dans laquelle une production de gouttelettes crée un brouillard. Un système de balayage est mis en place pour réaliser des images. Ce système est constitué de deux miroirs motorisés perpendiculaires. Le choix de la cible à imager s'est porté sur un panneau de circulation routière de limitation de vitesse à 50 km/h. La texture du

revêtement rétro-réfléchissant et la présence des chiffres 5 et 0 non réfléchissants permettent de maximiser le contraste intrinsèque de l'objet à détecter. Une partie des photons émis puis réfléchis par la cible, est rétro-injectée dans la cavité laser et provoque des battements dans le champ intracavité. Une lame séparatrice sert à prélever une fraction de l'énergie de sortie vers une photodiode et un oscilloscope. Les miroirs motorisés et l'acquisition de l'intensité laser sont synchronisés par l'intermédiaire d'un ordinateur afin de pouvoir reconstituer une image. Le graphe de la Figure 2-6a représente le signal laser enregistré au cours d'un balayage. On distingue les différentes amplitudes de modulation correspondant à des taux de réinjection différents et donc à une réflectivité de la cible différente. Ces oscillations autour d'une valeur stationnaire caractérisent le comportement d'un microlaser soumis à la rétro-injection, corroborant nos simulations numériques. L'information utile se trouve dans l'amplitude de modulation du signal et un traitement simple d'écart-type sur un échantillon définit la valeur du pixel à afficher. La Figure 2-6b présente le résultat d'un balayage sur le panneau 50 réalisé en 5 secondes.

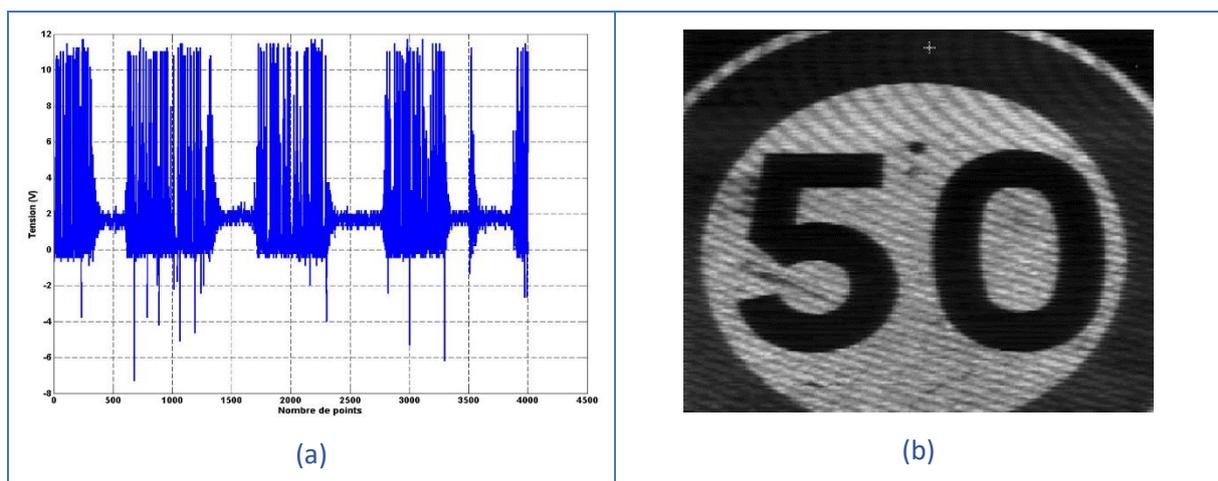


Figure 2-6 : signal enregistré au cours d'un balayage et image reconstituée après traitement

2.4.1 Performances du système d'imagerie

Nous pouvons quantifier les performances du système en mesurant le contraste entre les zones réfléchissantes et les zones absorbantes du panneau. Sur le trajet du faisceau laser, sont introduites des densités optiques croissantes et le contraste est mesuré dans chaque image. La décroissance du contraste est illustrée dans la Figure 2-7. L'image supérieure gauche est une image où le faisceau n'est pas atténué. Le contraste reste très bon jusqu'à une densité optique $DO = 2$. A ce stade, l'intensité laser a été atténuée d'un facteur 10^4 sur son trajet. La limite de sensibilité est atteinte pour une densité égale à $DO = 4$ soit une atténuation de 10^8 . L'image en bas à droite correspond à cette densité optique.

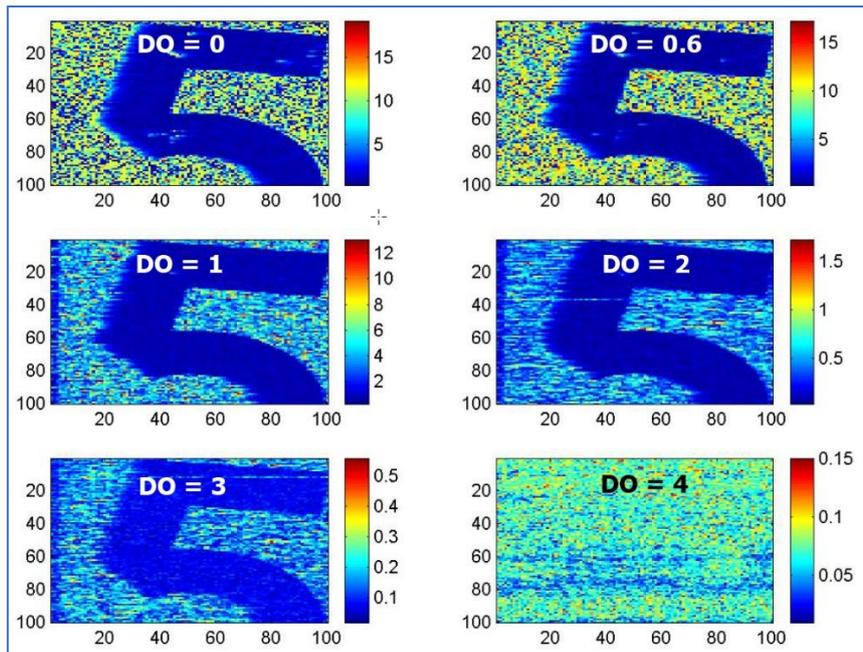


Figure 2-7 : Images obtenues à travers différents filtres neutres

La même expérience est menée dans une cuve à brouillard (Figure 2-8). Ce dernier est généré par un module à ultrason plongé dans l'eau qui produit des gouttelettes d'eau dont le rayon a été mesuré autour de $1.5 \mu\text{m}$. Il s'ensuit un brouillard d'épaisseur de quelques centimètres au-dessus de la surface. Brouillard que l'on peut étendre à toute la cuve à l'aide d'un ventilateur et que nous ferons traverser au faisceau du système d'imagerie.

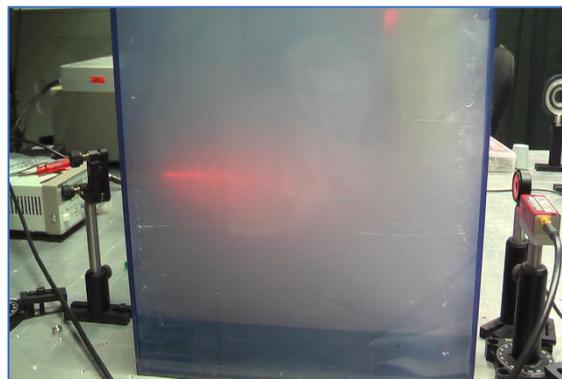


Figure 2-8 : cuve à brouillard

Nous quantifions la densité du brouillard, non pas par sa distance de visibilité réelle, car la propagation se faisant dans une maquette d'environ 1 mètre, celle-ci n'est pas représentative. Nous utilisons le rapport L/V , L étant la distance à la cible et V la distance de visibilité, traduisant la densité du brouillard. Pour accéder à cette mesure, nous utilisons le principe du transmissiomètre. Il s'agit d'un laser *He-Ne* placé à une extrémité de la cuve et un wattmètre positionné à l'autre extrémité. Connaissant l'intensité du flux incident I_0 et le flux émergent après traversée de la cuve I_T , on peut alors accéder au coefficient d'extinction (donc à la distance de visibilité V) par la relation :

$$I_T = I_0 e^{-\mu_{ext}L} = I_0 e^{-\frac{3L}{V}} \quad (2-9)$$

$$\text{Soit : } L/V = -\ln(I_T/I_0)/3 \quad (2-10)$$

Expérimentalement, nos brouillards produits dans la cuve, ont des rapports L/V variant entre 0 et 2. Selon la définition de la distance de visibilité, son contraste est réduit à 5 % de sa valeur initiale. Ainsi un rapport L/V supérieur à la valeur 1 caractérisera un brouillard dense au-delà de ce seuil de perception.

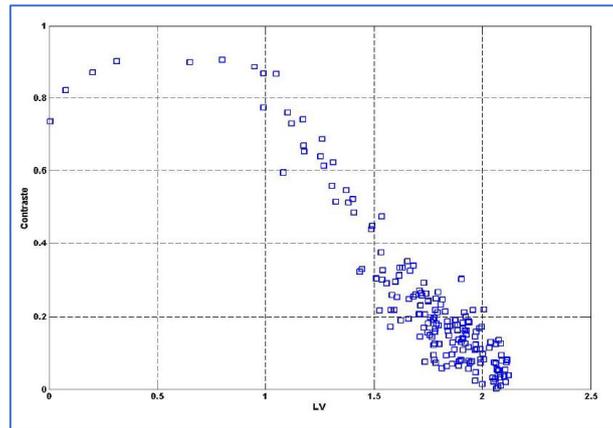


Figure 2-9 : Contraste en fonction de la densité de brouillard

Le contraste mesuré dans la Figure 2-9 est supérieur à 0,7 jusqu'à $L/V = 1$ avec une tendance à augmenter du fait d'une saturation sur les premières images. Puis le contraste décroît pour atteindre une valeur nulle lorsque $L/V = 2$. On s'attend donc à pouvoir imaginer des panneaux dans des brouillards très denses, et ce sont effectivement ceux qui peuvent être générés dans le tunnel de brouillard.

2.4.2 Essais in situ

Le système imageur est placé dans le poste de pilotage du tunnel. Le chemin optique entre la sortie du laser et le panneau situé dans la salle de brouillard est de 10 m. La puissance optique à la sortie du télescope est de 24 mW et de 18mW après le double vitrage de la fenêtre du poste de pilotage. Le brouillard est produit avec la granulométrie fine. La Figure 2-10 présente l'évolution des images en fonction de la visibilité pendant la saturation du tunnel puis lors de sa dissipation. La visibilité associée n'est mesurée qu'à partir du début de la dissipation.

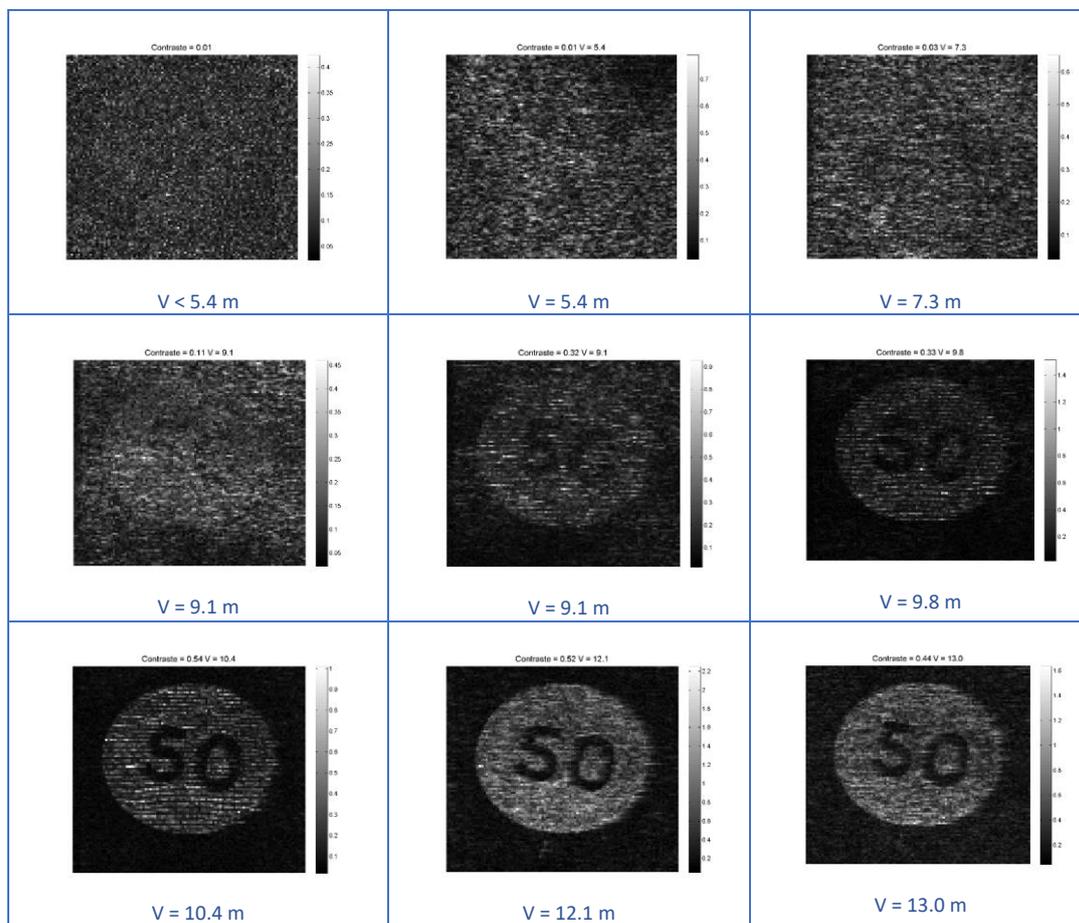


Figure 2-10 : Evolution des images au cours d'une saturation – dissipation

Une fois le brouillard en dissipation, le panneau est de nouveau détecté par le système à partir d'une visibilité météorologique de 9.1 m. Ceci correspond à un rapport L/V tout juste supérieur à 1 alors que les expérimentations en cuve donnaient une limite de sensibilité entre 1.5 et 2. Plusieurs paramètres peuvent expliquer cette différence. La perte de puissance liée au vitrage qui atténue à l'aller mais aussi, et c'est plus problématique, au retour. Malheureusement il est hors de question de mettre le système imageur directement dans le tunnel car toutes les optiques sont apparentes et il n'est absolument pas étanche. Un autre paramètre est la focalisation du faisceau qui est moindre à 10 mètres qu'à 1 mètre lors de nos essais en cuve. Cette méthode étant une méthode point par point, son efficacité est également liée à la taille du faisceau focalisé, grandissante avec la distance de la cible. Malgré tout, cette expérimentation a permis de démontrer la portabilité du système d'imagerie qui jusqu'à maintenant était resté au stade de laboratoire. Constitué d'un banc optique, d'un pied photo pour le système de balayage, d'un oscilloscope pour l'acquisition et d'un ordinateur pour le pilotage, le système d'imagerie est capable de réaliser des images de panneaux situés à une dizaine de mètres en deux secondes. Cependant, malgré des essais en changeant différents paramètres (focalisation,

puissance), la sensibilité n'a pu être améliorée. Nous allons donc tenter d'augmenter les performances du système en utilisant le décalage en fréquence optique.

2.5 Système d'imagerie par rétro-injection laser avec décalage

Le montage utilisé est celui décrit dans la Figure 2-11. Théoriquement, ce montage offre une dynamique plus importante que le montage étudié précédemment. En contrepartie, le montage optique est beaucoup plus complexe à optimiser et a été développé en collaboration avec l'équipe du Laboratoire de Spectrométrie Physique de Grenoble^[63].

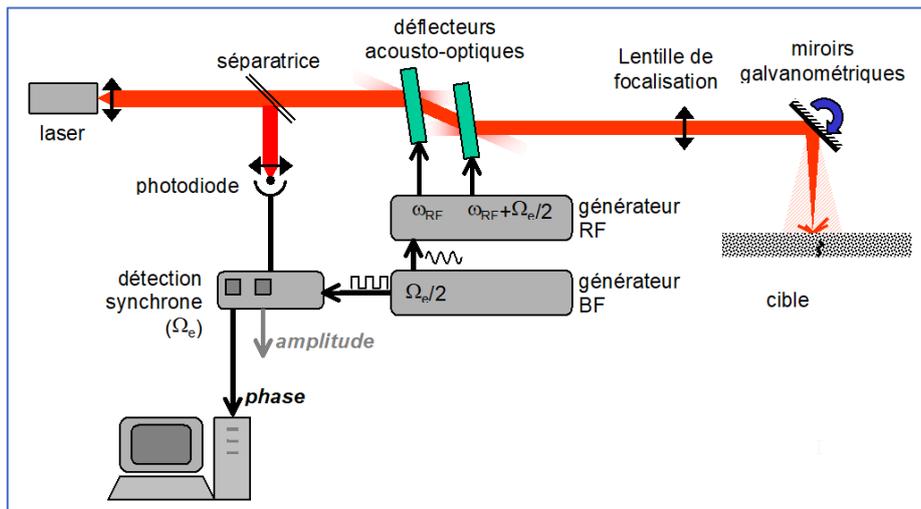


Figure 2-11 : Dispositif d'imagerie par rétro-injection décalée en fréquence (source : thèse d'E. Belin)

2.5.1 Essais in situ

Dans cette expérimentation, le panneau est situé à 15 m du système imageur. Les résultats présentés dans la Figure 2-12 sont les meilleurs résultats que nous ayons pu obtenir lors de cette campagne de mesure.

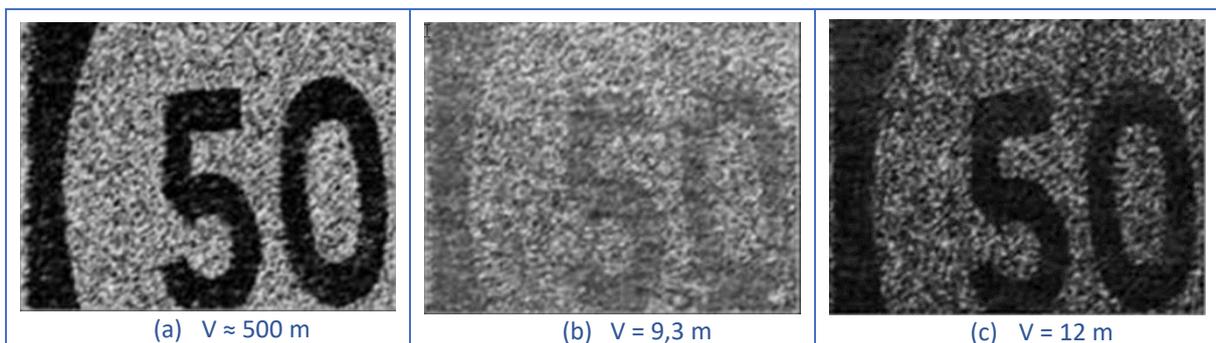


Figure 2-12 : (a) image sans brouillard (b) $V = 9,3\text{ m}$ (c) $V = 12\text{ m}$.

La densité de brouillard la plus élevée pour laquelle le dispositif LOFI a détecté la cible correspond à une visibilité de 9,3 mètres soit un rapport $L/V = 1,6$. Ce résultat est relativement loin des performances espérées. Les mesures effectuées dans le tunnel ont permis de montrer que le dispositif LOFI transportable permet d'effectuer des images de cible à travers un brouillard de moyenne densité.

Ces mesures ont mis en évidence un certain nombre de problèmes, autant au niveau du dispositif optique, qu'au niveau du balayage. Lors d'une série de mesures, les conditions de mesure varient en permanence (atténuation et diffusion de la lumière), avec une dynamique très importante. Par exemple, on passe d'une visibilité de 7m à 100m en environ 5 minutes pour une grosse granulométrie, et de 5m à 20m pour une granulométrie fine. Optiquement, cela correspond à une variation d'atténuation optique de l'ordre de 70 dB en environ 5 minutes. Et le protocole de mesure, nécessitant d'optimiser le décalage en fréquence continuellement, n'est pas adapté à des conditions de mesure présentant une telle dynamique. L'ajout de multiples optiques favorise également les échos parasites du dispositif optique et limite fortement la sensibilité de l'imageur. Enfin, le système de balayage induit aussi un décalage en fréquence par effet Doppler et semble diminuer aussi fortement la sensibilité du système. Cette dernière remarque confirme des essais faits en laboratoire avec des filtres neutres qui avaient abouti à une limite de sensibilité à $L/V=1,35$ ^[83].

2.6 Discussion

Lors de cette étude, les différents éléments du dispositif LOFI ont pu être assemblés de manière compacte pour le rendre transportable et réaliser des mesures sur le terrain dans des conditions de brouillard réel. Nous avons étudié deux modes de fonctionnement : rétro-injection avec et sans décalage en fréquence optique dans un microlaser. Dans les deux cas, le système s'avère plus performant que l'œil mais les performances atteintes ne sont pas celles théoriquement possibles avec la technique LOFI. Ces limitations sont loin d'être insurmontables et laissent entrevoir la possibilité d'améliorer considérablement les performances de notre imageur LOFI transportable. Une autre voie d'amélioration (illusoire ?) du système serait de pouvoir générer le phénomène de réinjection en 2 dimensions, soit de façon intra cavité ou bien par multiplexage de cavités afin d'obtenir un imageur plein champ et non plus point par point. D'autre part, de nombreux systèmes, notamment les véhicules autonomes, utilisent aujourd'hui des LIDAR parmi leurs multiples capteurs. Ces dispositifs, basés sur la mesure de temps de vol, s'avèrent en général performants mais sont très rapidement limités dès lors que les conditions météorologiques se dégradent. On pourrait aussi imaginer à l'avenir des LIDAR utilisant le phénomène de réinjection laser qui les rendrait quasi-insensibles au brouillard.

Références

- [104] R. Day, E. Lacot, F. Stoeckel, et B. Berge, « Three-dimensional sensing based on a dynamically focused laser optical feedback imaging technique », *Appl. Opt.*, vol. 40, no 12, p. 1921, avr. 2001, doi: 10.1364/AO.40.001921.
- [105] E. Lacot, R. Day, J. Pinel, et F. Stoeckel, « Laser relaxation-oscillation frequency imaging », *Opt. Lett.*, vol. 26, no 19, p. 1483, oct. 2001, doi: 10.1364/OL.26.001483.
- [106] T. Wilson, *Confocal microscopy*. London: Academic Press, 1990.

- [107] J. M. Schmitt, A. Knüttel, et M. Yadlowsky, « Confocal microscopy in turbid media », *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no 8, p. 2226, août 1994, doi: 10.1364/JOSAA.11.002226.
- [108] F. Christnacher, Y. Lutz, et D. Monnin, « Systèmes d'imagerie active portables et embarquables dans différents vecteurs d'observation. », *OPTRO 2005*, Paris, 2005.
- [109] F. Christnacher, D. Monnin, M. Laurenzis, Y. Lutz, et A. Matwyschuk, « Imagerie active : la maturité des systèmes ouvre de vastes perspectives », *Photoniques*, no 55, p. 44-51, sept. 2011, doi: 10.1051/photon/20115544.
- [110] O. David, N. S. Kopeika, et B. Weizer, « Range gated active night vision system for automobiles », *Appl. Opt.*, vol. 45, no 28, p. 7248, oct. 2006, doi: 10.1364/AO.45.007248.
- [111] Y. Grauer et E. Sonn, « Active gated imaging for automotive safety applications », présenté à *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, R. P. Loce et E. Saber, Éd., San Francisco, California, United States, mars 2015, p. 94070F. doi: 10.1117/12.2078169.
- [112] Y. Lutz et F. Christnacher, « Laser diode illuminator for night vision on-board a 155-mm artillery shell », présenté à *AeroSense 2003*, W. E. Thompson et P. H. Merritt, Éd., Orlando, FL, sept. 2003, p. 185. doi: 10.1117/12.513110.
- [113] D. Monnin, A. L. Schneider, F. Christnacher, et Y. Lutz, « A 3D Outdoor Scene Scanner Based on a Night-Vision Range-Gated Active Imaging System », in *Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06)*, Chapel Hill, NC, USA: IEEE, juin 2006, p. 938-945. doi: 10.1109/3DPVT.2006.8.
- [114] D. Huang et al., « Optical Coherence Tomography », *Science*, vol. 254, no 5035, p. 1178-1181, nov. 1991, doi: 10.1126/science.1957169.
- [115] E. Beaufrepaire, A. C. Boccara, M. Lebec, L. Blanchot, et H. Saint-Jalmes, « Full-field optical coherence microscopy », *Opt. Lett.*, vol. 23, no 4, p. 244, févr. 1998, doi: 10.1364/OL.23.000244.
- [116] A. Dubois, L. Vabre, A.-C. Boccara, et E. Beaufrepaire, « High-resolution full-field optical coherence tomography with a Linnik microscope », *Appl. Opt.*, vol. 41, no 4, p. 805, févr. 2002, doi: 10.1364/AO.41.000805.
- [117] R. Day, « Une nouvelle technique d'imagerie laser basée sur la réinjection décalée en fréquence : Laser Optical Feedback Imaging (LOFI) », Thèse Université de Grenoble 1, 2000.
- [118] R. Lang et K. Kobayashi, « External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties », *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 16, no 3, p. 347-355, mars 1980, doi: 10.1109/JQE.1980.1070479.

3 L'imagerie polarimétrique : comment créer du contraste

Nous allons utiliser l'imagerie polarimétrique afin de créer un contraste intrinsèque là où il n'y en a pas classiquement. Le contraste repose sur une différence de propriétés de réflexion dans le visible ou bien de température ou d'émissivité dans l'infrarouge. Dans les deux cas, l'analyse faite par le détecteur repose sur l'intensité du signal reçu. La polarimétrie utilise, quant à elle, une autre propriété du rayonnement électromagnétique : sa polarisation qui peut être porteuse d'une information sur la nature du matériau dont elle provient.

3.1 Introduction

Beaucoup d'insectes, tels que les abeilles ou les fourmis sont capables de s'orienter en utilisant la polarisation de la lumière du ciel, leurs yeux possédant des propriétés de biréfringence⁴. En revanche, l'œil humain est insensible à la polarisation. Il en va de même avec les capteurs d'intensité lumineuse utilisés en imagerie (généralement des caméras). Le but de cette technique d'imagerie est d'utiliser les propriétés polarimétriques (biréfringence, dépolarisation, ...) d'un objet dans le but d'obtenir des informations et des contrastes supplémentaires dans les images formées. La mise en œuvre de systèmes imageurs est relativement récente puisque les premiers dispositifs du type 'caméra polarimétrique' datent des années 1990^{[119]–[122]}. Pourtant, l'utilisation de tels instruments permet de rendre beaucoup plus efficaces certaines tâches visuelles comme la segmentation^{[123], [124]} (partition de l'image en régions telles que chaque région soit composée d'un seul matériau) ou la classification de matériaux^[125].

Afin d'utiliser la polarimétrie pour des applications d'imagerie, nous développerons un système portable permettant de réaliser des mesures en condition d'éclairage naturel. Deux techniques de mesure seront étudiées : La première est une méthode inverse donnant accès aux composantes de polarisations linéaires^[73]. La seconde est une méthode directe qui permet de retrouver l'état de polarisation complet^[70]. Nous rappellerons tout d'abord quelques bases théoriques sur la polarisation et sur la réflexion des ondes électromagnétiques sur les matériaux métalliques et diélectriques. La seconde partie s'intéressera au principe de mesure du polarimètre développé, sa mise en œuvre puis une application en lumière naturelle^[66].

⁴ La biréfringence est une propriété qu'ont certains matériaux transparents vis-à-vis de la lumière. Leur effet principal est de diviser en deux, un rayon lumineux qui les pénètre. La biréfringence, encore appelée double réfraction, s'explique par l'existence de deux indices de réfraction différents selon la polarisation de la lumière. (www.techno-science.net)

3.2 Rappels sur la polarisation

La polarisation est une propriété des ondes électromagnétiques décrivant la direction dans laquelle vibre le champ électrique de l'onde au cours de sa propagation. On parle de polarisation rectiligne lorsque le champ électrique conserve la même direction au cours du temps. Dans ce cas, on repère cette direction par l'angle θ que fait l'axe de vibration avec l'axe horizontal. Le cas le plus général des ondes polarisées est la polarisation elliptique définie par l'angle θ et l'ellipticité ε (Figure 3-1).

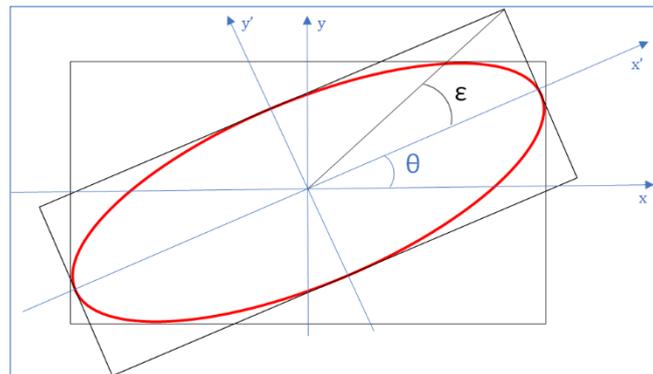


Figure 3-1 : Représentation d'une polarisation elliptique

Afin de représenter les différents états de polarisation de la lumière, on utilise les paramètres de Stokes S_0, S_1, S_2, S_3 qui sont définis par :

$$\begin{aligned} S_0 &= I_H + I_V \\ S_1 &= I_H - I_V \\ S_2 &= I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ S_3 &= I_D - I_G \end{aligned} \quad (3-1)$$

Où I représente l'intensité lumineuse et les indices désignent les axes de polarisation horizontal, vertical, à $\pm 45^\circ$ ainsi que les polarisations circulaires droite et gauche. L'angle θ se déduit des paramètres S_1 et S_2 :

$$\tan(2\theta) = S_2/S_1 \quad (3-2)$$

Cependant la lumière n'est pas toujours totalement polarisée, on parle alors de lumière partiellement polarisée ou non polarisée. Pour caractériser ce taux de polarisation, on définit le degré de polarisation ρ (qui varie de 0 pour une lumière non polarisée à 1 pour une lumière totalement polarisée) :

$$\rho = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}/S_0 \quad (3-3)$$

L'ellipticité ε dépend du paramètre S_3 et du degré de polarisation par la relation :

$$\sin(2\varepsilon) = S_3/\rho \quad (3-4)$$

À noter que pour une lumière totalement non polarisée, on a $S_1 = S_2 = S_3 = 0$.

3.3 Formalisme de Mueller

Le formalisme de Mueller^[126] permet de modéliser les phénomènes de polarisation induits par des systèmes optiques sur une onde lumineuse. Ainsi, un milieu sera représenté par sa matrice de Mueller de dimension 4 x 4. Considérons un système optique caractérisé par sa matrice de Mueller M, le vecteur de Stokes S caractérisant l'état de polarisation d'une onde à l'entrée et S' le vecteur de Stokes caractérisant l'état de polarisation de la lumière à la sortie du système optique. Alors il existe la relation linéaire suivante :

$$S' = M \cdot S \quad (3-5)$$

3.3.1 Polariseur linéaire

Un polariseur linéaire ou rectiligne est un composant optique qui polarise toute onde incidente selon un axe privilégié. Les cristaux biréfringents sont taillés ou agencés de manière à obtenir deux rayons sortants polarisés linéairement suivant deux directions différentes. Certains cristaux peuvent être également dichroïques. Cette propriété caractérise les matériaux possédant différents coefficients d'absorption pour les rayons polarisés selon différentes orientations. Les feuilles plastiques polarisantes, comme les Polaroids, appliquent ce principe : elles sont constituées d'une suspension de très petits cristaux dichroïques dans une matière plastique transparente, orientés selon une seule direction. La matrice de Mueller d'un polariseur linéaire orienté selon un angle α est donnée par :

$$M_p(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \cos 2\alpha \cdot \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \cdot \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

3.3.2 Retardateurs purs : les lames à retard et retardateurs à cristaux liquides

Les retardateurs purs sont des éléments déphasant une onde incidente linéairement polarisée. Il existe des lames à retard biréfringente : la lame quart-d'onde apportant un déphasage $\phi = \pi/2$, ou la lame demi-onde correspondant à un déphasage $\phi = \pi$. Les retardateurs à cristaux liquides sont également utilisés et peuvent être considérés comme des lames à retard variable. La matrice de Mueller d'un retardateur pur de retard δ et orienté avec un angle ψ est donnée par :

$$M_{ret}(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c^2 + s^2 \cos \delta & s \cdot c(1 - \cos \delta) & -s \cdot \sin \delta \\ 0 & s \cdot c(1 - \cos \delta) & s^2 + c^2 \cos \delta & c \cdot \sin \delta \\ 0 & s \cdot \sin \delta & -c \cdot \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \begin{cases} c = \cos 2\psi \\ s = \sin 2\psi \end{cases} \quad (3-7)$$

3.4 Réflexion d'une onde sur une surface

Les interactions entre une onde lumineuse et une surface sont décrites par les équations de Maxwell. Un modèle de réflexion est déterminé en résolvant ces dernières, et en respectant les conditions de continuité imposées par la surface, sur les champs électrique et magnétique. Les relations donnant l'angle de l'onde réfractée ou transmise θ_t et de l'onde réfléchie θ_r , en fonction de l'angle d'incidence θ_i , pour une surface séparant deux milieux d'indices respectifs n_1 et n_2 sont données par la loi de Snell-Descartes :

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_r \\ n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t \end{cases} \quad (3-8)$$

Les relations de Fresnel établissent les ratios entre l'amplitude de l'onde incidente et l'amplitude de l'onde réfléchie, suivant les projections orthogonales et parallèles au plan d'incidence. En notant A_{\perp} et A_{\parallel} les amplitudes de l'onde incidente, et R_{\perp} , R_{\parallel} les amplitudes de l'onde réfléchie, nous avons :

$$\begin{cases} f_{\perp} = \frac{R_{\perp}}{A_{\perp}} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \\ f_{\parallel} = \frac{R_{\parallel}}{A_{\parallel}} = -\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \end{cases} \quad (3-9)$$

La matrice de Mueller d'une surface réfléchissante est donnée par le produit des matrices de Mueller d'un polariseur et d'un retardateur pur.

$$\begin{aligned} M_{refl} &= M_p(F_{\perp}, F_{\parallel}) \cdot M_{ret}(\delta, 0) \\ F_{\perp} &= |f_{\perp}|^2, F_{\parallel} = |f_{\parallel}|^2, \delta = \arg(f_{\parallel} - f_{\perp}). \end{aligned} \quad (3-10)$$

En effectuant le produit, nous obtenons :

$$M_{refl} = \begin{bmatrix} F_{\perp} + F_{\parallel} & F_{\perp} - F_{\parallel} & 0 & 0 \\ F_{\perp} - F_{\parallel} & F_{\perp} + F_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{F_{\perp}F_{\parallel}}\cos\delta & 2\sqrt{F_{\perp}F_{\parallel}}\sin\delta \\ 0 & 0 & -2\sqrt{F_{\perp}F_{\parallel}}\sin\delta & 2\sqrt{F_{\perp}F_{\parallel}}\cos\delta \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

Pour distinguer un objet diélectrique d'un objet métallique, on utilise le ratio de polarisation de Fresnel défini par :

$$R_F = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}} \quad (3-12)$$

En négligeant les réflexions diffuses qui ne sont pas polarisées, on montre que :

$$R_F = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}} = \frac{(1+\rho)}{(1-\rho)} \quad (3-13)$$

Où ρ est le degré de polarisation. Comme les coefficients de Fresnel dépendent de l'angle d'incidence, et de l'indice de réfraction du matériau, le ratio de Fresnel dépend également de ces paramètres. La courbe présentée sur la Figure 3-2 représente le ratio de polarisation de Fresnel tracé en fonction de l'angle d'incidence pour un matériau diélectrique et un matériau métallique. Du fait de leur indice complexe, la plupart des matériaux métalliques ont un ratio de Fresnel très inférieur à ceux des matériaux diélectriques. Ainsi, la segmentation d'objets métalliques ou diélectriques sur des images est simplement effectuée en calculant le ratio de Fresnel et en appliquant un seuil. D'après l'équation (3-13), le ratio de Fresnel est obtenu à partir du degré de polarisation. Pour que cette méthode soit efficace, il faut que les objets soient suffisamment réfléchissants, et que l'éclairage soit placé de manière à ce que l'angle d'incidence soit compris entre 30° et 80°.

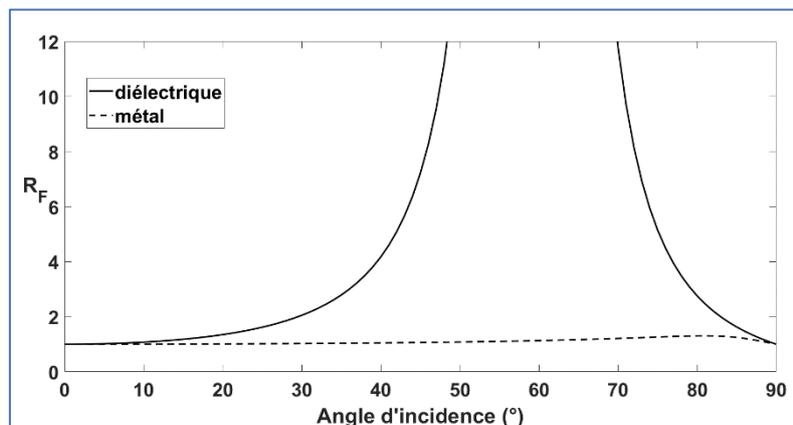


Figure 3-2 : Ratio de Fresnel pour un matériau diélectrique ($n = 1,7$) et un métal de type aluminium ($n = 0,82 + 5,99i$)

Il est important de noter que ce système utilise un éclairage non polarisé, et souffre par conséquence de deux limitations : il est nécessaire que l'angle d'incidence soit compris entre 30° et 80° et les réflexions diffuses doivent être négligeables. Pour corriger ces deux lacunes, on peut employer une lumière linéairement polarisée. Celle-ci est réfléchi elliptiquement polarisée sur un métal, alors qu'elle reste polarisée linéairement, après réflexion sur un matériau diélectrique. Pour distinguer la nature des objets, le système doit donc être sensible au déphasage de la composante polarisée (cas de la méthode directe présentée ci-après).

3.4.1 Étude de la réflexion spéculaire

Soit S_{inc} le vecteur de Stokes de l'onde incidente parfaitement non polarisée d'intensité I_0 , et S_{ref} le vecteur de Stokes de l'onde lumineuse réfléchi par une surface parfaitement spéculaire. La matrice de Mueller M_{refl} de la réflexion permet d'établir une relation entre S_{ref} et S_{inc} :

$$S_{ref} = M_{refl} \cdot S_{inc} = M_{refl} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{I_0}{2} \cdot \begin{bmatrix} F_{\perp} + F_{\parallel} \\ F_{\perp} - F_{\parallel} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

L'état de polarisation de l'onde réfléchi dépend directement des coefficients de réflexion de Fresnel F_{\parallel} et F_{\perp} . Par conséquent, il dépend de l'indice de réfraction de la surface, et de l'angle d'incidence. La Figure 3-3 présente le tracé des courbes de Fresnel en fonction de l'angle d'incidence. Nous remarquons, et pouvons démontrer, que l'inégalité suivante est vérifiée pour tout indice de réfraction et pour tout angle d'incidence : $F_{\parallel} \leq F_{\perp}$.

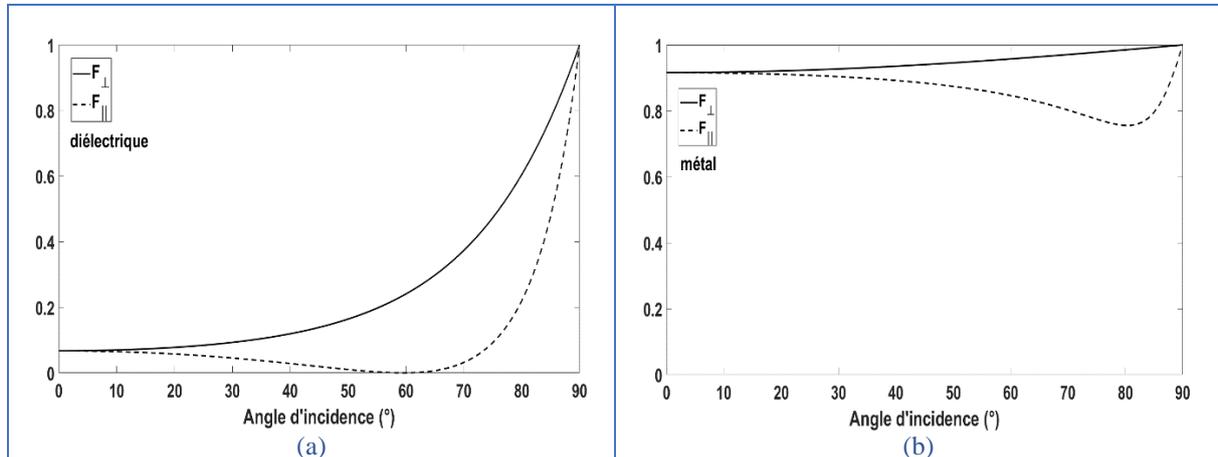


Figure 3-3 : Courbes des coefficients de Fresnel pour des matériaux de type : (a) diélectrique, (b) métallique

On en déduit que :

$$\rho = \left| \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}} \right| = \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}} \quad (3-15)$$

L'intensité lumineuse I de l'onde réfléchi est donnée par :

$$I = \frac{I_0}{2} \cdot (F_{\perp} + F_{\parallel}) \quad (3-16)$$

De plus, l'onde est partiellement linéairement polarisée, car l'ellipticité définie par l'équation (3-4) est nulle (terme S_3 nul). Dans ce cas, l'angle de polarisation devient :

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{|F_{\perp} - F_{\parallel}|} \right) = \frac{1}{2} \arccos(1) = 0 \quad (3-17)$$

Nous en déduisons que la lumière réfléchi est partiellement linéairement polarisée, orthogonalement au plan d'incidence (cf. Figure 3-4).

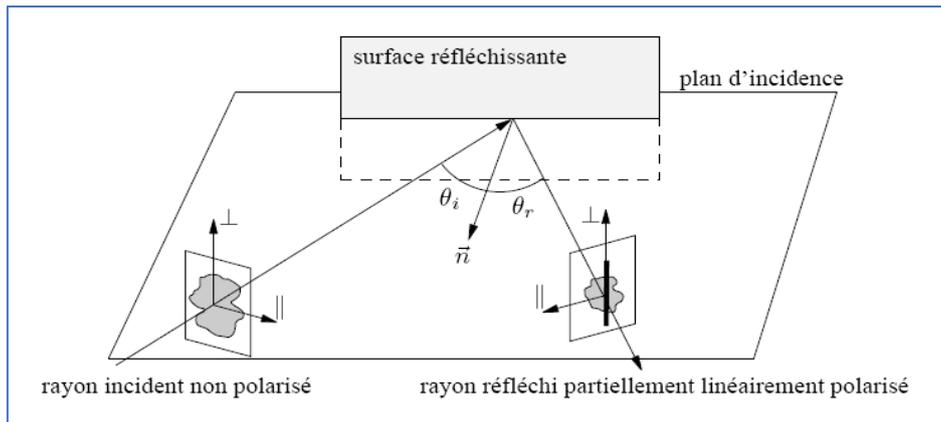


Figure 3-4 : Réflexion d'une onde non polarisée sur une surface réfléchissante

3.4.2 Relations entre les paramètres de polarisation et les normales

Afin d'établir une relation entre les paramètres de polarisation et les normales en tout point de la surface, un modèle de projection orthographique doit être appliqué. Dans le cas de la Figure 3-5, tous les rayons réfléchis spéculairement par l'objet sont parallèles à l'axe z. La normale en tout point de la surface s'écrit alors en fonction des angles θ_r et ϕ selon :

$$\vec{n} = \begin{vmatrix} p = \tan\theta_r \cos\phi \\ q = \tan\theta_r \sin\phi \\ 1 \end{vmatrix} \quad (3-18)$$

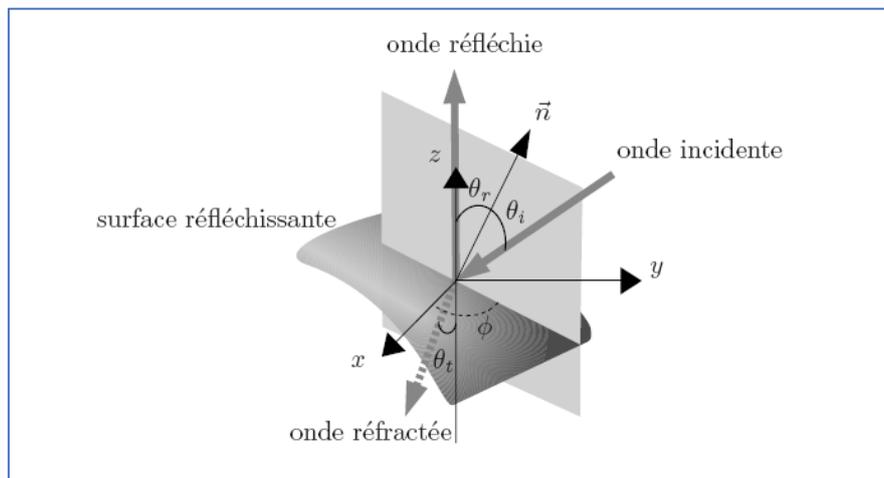


Figure 3-5 : Réflexion d'une onde non polarisée sur une surface parfaitement réfléchissante

Les coefficients de réflexion de Fresnel indiquent, d'une part, que l'angle de polarisation φ est lié à l'angle ϕ :

$$\phi = \varphi \pm \frac{\pi}{2} \quad (3-19)$$

Pour déterminer la normale, il y a une ambiguïté pour la détermination de l'angle ϕ , l'angle de polarisation φ étant défini modulo π . D'autre part, le degré de polarisation ρ est lié à l'angle de réflexion θ_r :

$$\rho(\theta_r) = 2\sin\theta_r \tan\theta_r \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_r}}{(n^2 - 2\sin^2\theta_r + \tan^2\theta_r)} \quad (3-20)$$

La fonction n'étant pas bijective, il existe également une ambiguïté concernant la détermination de l'angle θ_r en fonction du degré de polarisation. En effet, pour un degré de polarisation θ_r donné, deux valeurs sont candidates $\theta_1 < \theta_{lim}$ et $\theta_2 > \theta_{lim}$. L'angle θ_{lim} correspond à l'angle de Brewster. Par ailleurs, dans la mesure où la relation fait intervenir l'indice de réfraction, celui-ci doit être connu ou estimé.

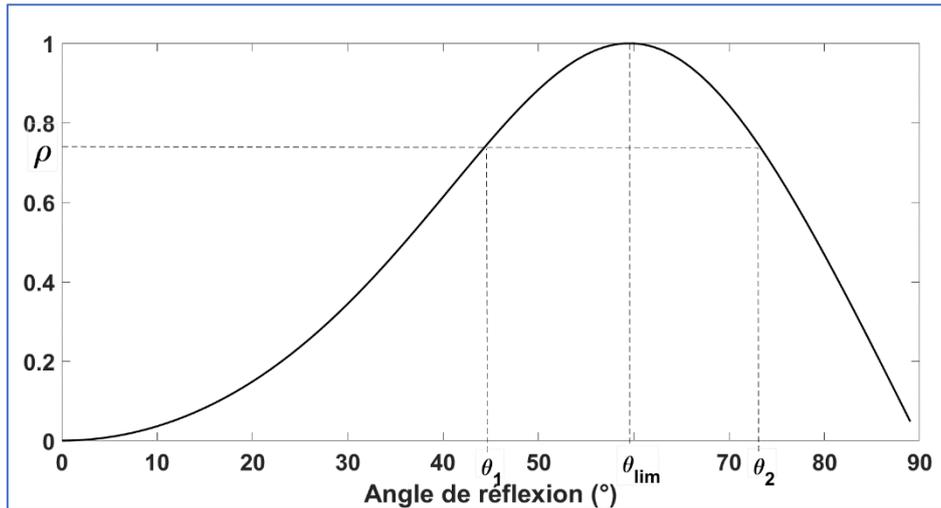


Figure 3-6 : Degré de polarisation pour une surface de type diélectrique ($n = 1, 7$)

3.5 Développement du système

La méthode de mesure développée ici permet de mesurer les paramètres S_0 , S_1 , S_2 correspondants aux caractéristiques linéaires de la polarisation. Autrement dit, nous nous intéressons uniquement à l'angle φ et au degré de polarisation ρ de l'onde. Le polarimètre (Figure 3-7) est constitué d'une lame quart-d'onde orientée à 0° , d'un retardateur variable orienté à 45° et d'un filtre polariseur linéaire orienté à 0° .

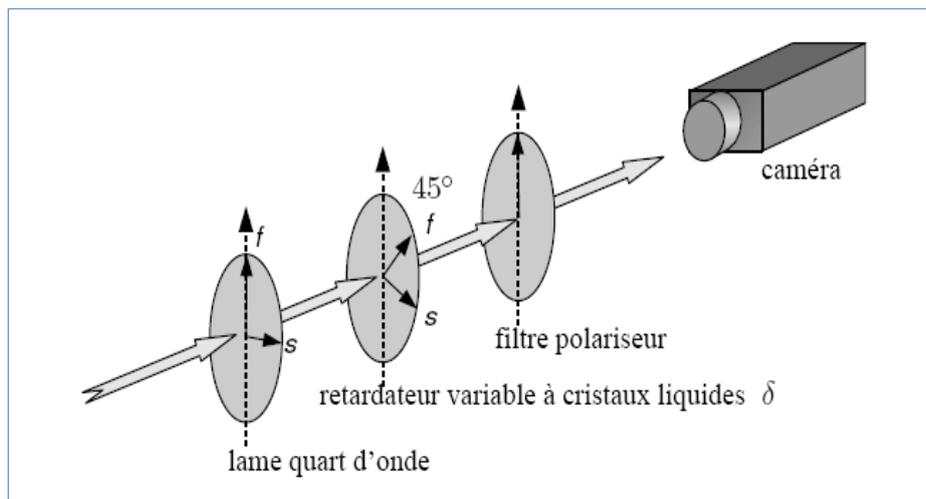


Figure 3-7 : Éléments constitutifs du polarimètre

En notant M_1 , M_2 et M_3 les matrices de Mueller associées aux différents composants, nous avons :

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, M_2(\delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & 0 & -\sin\delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin\delta & 0 & \cos\delta \end{bmatrix}, M_3 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

Où δ est le retard électriquement pilotable du retardateur à cristaux liquides. La matrice de Mueller du montage équivalent est donc donnée par :

$$M(\delta) = M_3 \cdot M_2(\delta) \cdot M_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos\delta & \sin\delta & 0 \\ 1 & \cos\delta & \sin\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

On en déduit que l'intensité lumineuse I_m vue par la caméra est égale à :

$$I_m(\delta) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos\delta + S_2 \sin\delta) \quad (3-23)$$

En effectuant n acquisitions avec un retard différent, nous pouvons écrire le système d'équations linéaires suivant pour un pixel donné :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{m1} = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos\delta_1 + S_2 \sin\delta_1) \\ I_{m2} = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos\delta_2 + S_2 \sin\delta_2) \\ \vdots \\ I_{mn} = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos\delta_n + S_2 \sin\delta_n) \end{array} \right\} \quad (3-24)$$

On pose :

$$y = [I_{m1}, I_{m2}, \dots, I_{mn}] \quad (3-25)$$

$$x = [s_0, s_1, s_2]$$

On peut écrire le système sous la forme $y = M \cdot x$ avec M définie par :

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos\delta_1 & \sin\delta_1 \\ 1 & \cos\delta_2 & \sin\delta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\delta_n & \sin\delta_n \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

La solution du système linéaire s'obtient par la méthode des moindres carrés :

$$x = (M^t M)^{-1} M^t \cdot y = H \cdot y \quad (3-27)$$

Avec H la matrice de dimension $n \times 3$ qui caractérise complètement le polarimètre. Après une phase d'étalonnage^[70], nous avons alors réalisé des images d'une scène qui se compose d'une pièce métallique et d'une autre en plastique (diélectrique). Ces matériaux sont éclairés avec un angle d'incidence à 45° par une lumière polarisée rectiligne verticale. Après réflexion sur chacun des

matériaux, l'état de polarisation diffère selon la nature du matériau et nous avons du contraste qui apparaît dans le degré de polarisation (Figure 3-8b) alors que le contraste est initialement très faible en intensité (Figure 3-8a).

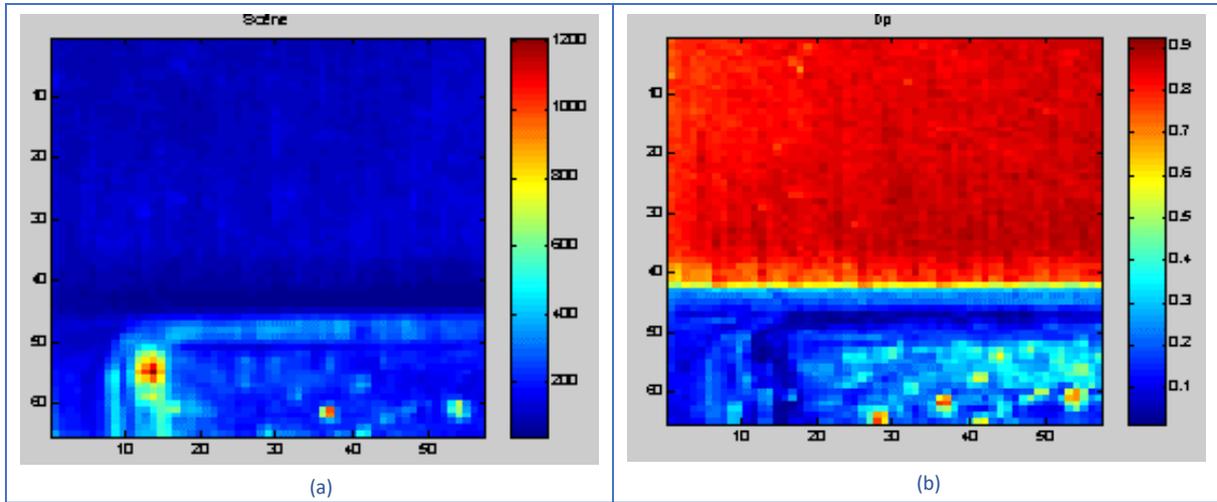


Figure 3-8 : images en intensité (a) et en degré de polarisation (b)

Le degré de polarisation de la partie diélectrique est largement inférieur à celui de la partie métallique. C'est-à-dire que le diélectrique a un plus grand pouvoir dépolarisant que le métal. Ce style d'image permet de différencier aisément des matériaux de nature différente, cependant l'interprétation de ces images n'est pas aisée dans des conditions non contrôlées du fait des nombreux paramètres qui entrent en jeu dans la propagation de la lumière (angle d'éclairage, angle de la prise de vue, longueur d'onde, nature des matériaux). Cette méthode donne aussi accès aux orientations des objets dans la scène moyennant quelques connaissances a priori^[70] mais nécessite l'acquisition de multiples images puis de résoudre le système d'équations. Une seconde méthode plus rapide a été développée en analysant directement l'état de polarisation complet de l'onde incidente.

3.6 Méthode directe

Le principe de la méthode directe consiste à mesurer directement les 6 intensités lumineuses $I_H, I_V, I_{+45}, I_{-45}, I_D, I_G$ apparaissant dans les paramètres de Stokes :

$$\begin{aligned}
 S_0 &= I_H + I_V \\
 S_1 &= I_H - I_V \\
 S_2 &= I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\
 S_3 &= I_D - I_G
 \end{aligned}
 \tag{3-28}$$

Afin de limiter le temps d'acquisition des 6 images, on dispose deux caméras à la sortie d'un cube séparateur de polarisation, ce qui permet d'acquérir simultanément 2 images dans des polarisations croisées. Dans cette configuration initiale, on dispose d'un analyseur de polarisations horizontale et verticale donnant accès aux paramètres S_0 et S_1 . Pour obtenir les intensités à $\pm 45^\circ$, on dispose en avant du cube séparateur une lame demi-onde orientée à $\pi/8$ par rapport à l'horizontal. Enfin pour disposer

d'un analyseur circulaire, on place devant le cube séparateur une lame quart-d'onde orientée à $\pi/4$ par rapport à l'horizontal. Afin d'automatiser la prise d'images, les lames d'onde sont remplacées par des retardateurs variables synchronisés avec les prises de vue. L'acquisition des 6 intensités se fait en trois temps :

- Prise d'images avec les 2 retardateurs réglés avec des déphasages nuls (I_H et I_V).
- Prise d'images avec le 1^{er} retardateur à déphasage nul et le 2nd avec un déphasage correspondant à $\lambda/2$ (I_{+45} et I_{-45}).
- Prise d'images avec le 1^{er} retardateur avec un déphasage correspondant à $\lambda/4$ et le 2nd avec un déphasage nul (I_D et I_G).

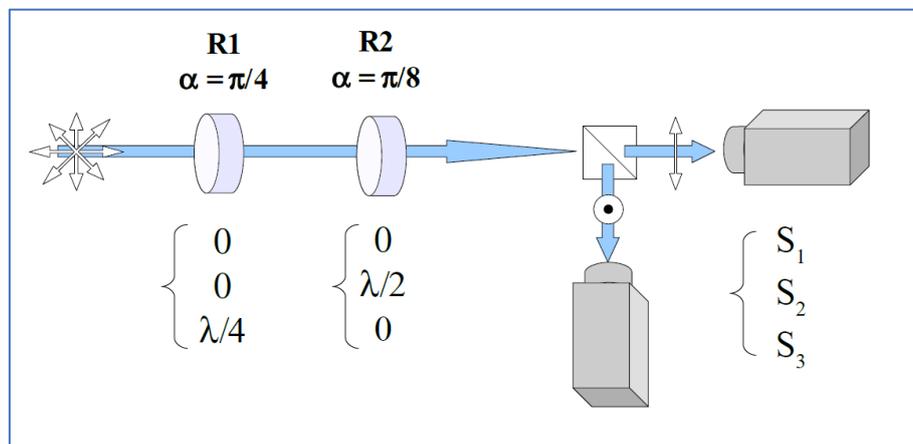


Figure 3-9 : dispositif imageur polarimétrique

De nouveau, après une phase d'étalonnage, de recalage des images en laboratoire^[70], les images du système en conditions extérieures donnent les résultats suivants. Pour une pièce métallique, la Figure 3-10 présente 6 images : L'image S_0 correspondant à l'image en intensité vue par la caméra, les composantes S_1, S_2, S_3 , le degré de polarisation ρ et l'angle de polarisation φ .

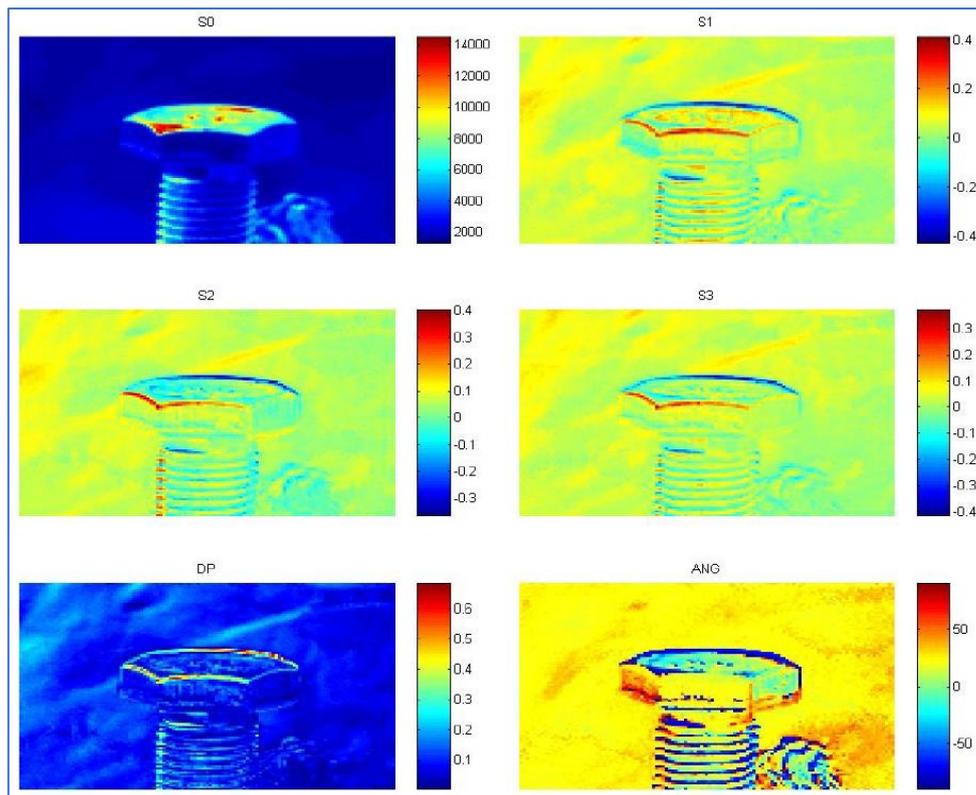


Figure 3-10 : images polarimétriques d'une pièce métallique

Il est possible de retrouver les orientations de la pièce. Ces informations sont portées par l'angle de polarisation (en bas à droite) selon la relation (3-19). L'angle est codé par la couleur de chaque facette. L'image permet de distinguer les 3 orientations séparées chacune de 60° . La face supérieure ressort aussi mais avec la même couleur que l'une des facettes du fait de l'indétermination sur le plan d'incidence. Un second exemple est présenté dans la Figure 3-11 où l'objet est un écrou en plastique. Il se confond avec la terre en image d'intensité. L'analyse polarimétrique permet d'obtenir un excellent contraste sur la composante S_1 (combinaison des polarisations horizontale et verticale), ceci est dû au fait que le matériau est lisse et donc très spéculaire alors que la terre se comporte plutôt comme un matériau diffusant. Ce contraste pourrait aussi se retrouver sur le degré de polarisation ou sur l'angle avec des palettes de couleur bien choisies.

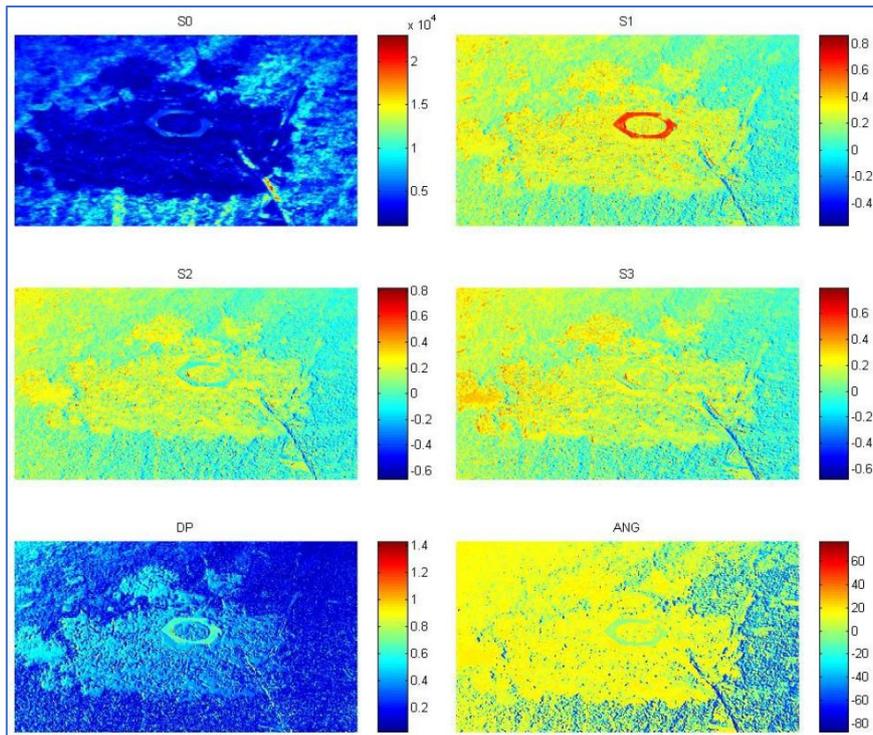


Figure 3-11 : images polarimétriques d'une pièce en plastique

3.7 Discussion

Nous avons donc démontré la possibilité de créer un contraste intrinsèque à un objet en utilisant les propriétés de polarisation de la lumière. L'imagerie polarimétrique a été utilisée ici pour retrouver des informations inaccessible par des images d'intensité. D'autres expérimentations de mesures polarimétriques embarquées dans un véhicule ont montré la possibilité de faire ressortir des objets (signalisation verticale, horizontale, véhicules) (Figure 3-12) en conditions nocturnes avec un éclairage polarisé^[66], et également en conditions diurnes^[70], mais des questions restent en suspens notamment sur l'influence de la météo et de la position du soleil. En effet, par beau temps, la lumière naturelle peut être polarisée jusqu'à 20 %.



Figure 3-12 : images polarimétriques nocturnes

D'autre part, cette technique d'imagerie a aussi été appliquée pour estimer la texture de surfaces de chaussée^[67]. En effet, la théorie des microfacettes et la modélisation de la réflectance par un modèle de BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) nous a permis d'estimer la rugosité de surfaces de chaussée à partir de prises d'images.

Dans le domaine de la photométrie routière, qui fait l'objet du dernier chapitre, très peu de travaux existent sur les BRDF de chaussée et encore moins en considérant la polarisation. Aujourd'hui, le système d'acquisition peut être grandement simplifié car il existe des caméras intégrant l'analyse polarimétrique au niveau du pixel. Et avec le développement des nouvelles sources à LED (potentiellement polarisables), on peut imaginer utiliser la composante de polarisation qui est atténuée après réflexion, pour limiter l'éblouissement sur les chaussées mouillées. Il n'est pas à exclure que la polarisation pourrait aussi jouer un rôle dans des systèmes d'éclairage adaptatifs.

Références

- [119] L. B. Wolff, T. A. Mancini, P. Pouliquen, et A. G. Andreou, « Liquid crystal polarization camera », *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 13, no 2, p. 195-203, avr. 1997, doi: 10.1109/70.563642.
- [120] L. B. Wolff, « Applications of polarization camera technology », *IEEE Expert*, vol. 10, no 5, p. 30-38, oct. 1995, doi: 10.1109/64.464928.
- [121] H.-P. Povel, « Imaging Stokes polarimetry with piezoelectric modulators and charge-coupled-device image sensors », *Opt. Eng.*, vol. 34, no 7, p. 1870, juill. 1995, doi: 10.1117/12.200596.
- [122] L. B. Wolff, « Surface Orientation From Two Camera Stereo With Polarizers », présenté à 1989 Symposium on Visual Communications, Image Processing, and Intelligent Robotics Systems, D. J. Svetkoff, Éd., Philadelphia, PA, United States, avr. 1990, p. 287. doi: 10.1117/12.969861.
- [123] J. Zallat, C. Collet, et Y. Takakura, « Clustering of polarization-encoded images », *Appl. Opt.*, vol. 43, no 2, p. 283, janv. 2004, doi: 10.1364/AO.43.000283.
- [124] F. Goudail et P. Réfrégier, « Target segmentation in active polarimetric images by use of statistical active contours », *Appl. Opt.*, vol. 41, no 5, p. 874, févr. 2002, doi: 10.1364/AO.41.000874.
- [125] B. Liang, A. M. Wallace, et E. Trucco, « Visual classification of materials using the Stokes vector », présenté à Industrial Lasers and Inspection (EUROPTO Series), E. A. Marszalec et E. Trucco, Éd., Munich, Germany, sept. 1999, p. 224-233. doi: 10.1117/12.364328.
- [126] S. Huard, *Polarisation de la lumière*. Ed. Masson, 1994.

4 L'imagerie dynamique à grande dynamique : comment mesurer toutes les gammes de luminance en roulant

La photométrie routière est l'activité historique de l'équipe Eclairage & Lumière. Elle consiste à étalonner des caméras en luminance et chrominance pour mesurer des grandeurs liées à la vision humaine. Ces images sont ensuite à la base de traitements modélisant le fonctionnement du système visuel humain. Mais la technologie des caméras n'a pas encore égalé les capacités de l'œil dans tous les domaines, notamment en ce qui concerne la dynamique (rapport du plus grand signal mesurable sur le plus petit). Or, pour modéliser et reproduire les limites de fonctionnement du système visuel, comme l'éblouissement par exemple, il est nécessaire d'avoir accès à toutes les luminances générées par la scène ^[25]. L'œil humain possède une plage dynamique remarquable qui lui permet de détecter de petites variations de contraste et d'interpréter des scènes dans des conditions d'éclairage difficiles. Il est capable de répondre sur 6 unités logarithmiques instantanément (et 14 unités en s'adaptant !) quand les meilleures caméras actuelles atteignent péniblement 5 unités. Les scènes réelles sont constituées de luminances variant sur une très grande gamme : de 10^{-3} cd/m² de nuit sur une chaussée jusqu'à plus de 10^6 cd/m² dans les sources lumineuses. Cette plage dépasse considérablement les capacités d'un capteur de caméra et une technique pour reproduire cette échelle de luminances est d'utiliser plusieurs images exposées différemment pour en construire une seule, une image HDR (High Dynamic Range) contenant l'ensemble de la dynamique des images dites LDR (Low Dynamic Range). Mais la prise d'images LDR séquentielles dans le temps n'est pas compatible avec nos applications routières qui nécessitent un système d'imagerie embarqué dans un véhicule. Le développement de systèmes d'imagerie dédiés à la mesure de luminance et leur utilisation pour des applications routières ont fait l'objet de nombreux travaux ces 25 dernières années, notamment au sein du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées ^{[28], [32], [35], [37], [127], [128]} mais aucun d'eux n'est dédié à l'acquisition HDR en dynamique. Nous avons donc développé un système d'acquisition HDR composé de quatre caméras synchrones (Figure 4-1) pour contourner le problème de la prise d'images en séquence.



Figure 4-1 : Système HDR à 4 caméras

La première étape du développement est consacrée aux processus de calibration des caméras. Il s'agira de les transformer en moyen de mesure photométrique grâce à un étalonnage idoine. Ensuite, la calibration géométrique permettra d' « aligner » les images pour faciliter la construction des images HDR^[27].

4.1 Calibration photométrique

Nous avons réalisé en 2016 une veille technologique sur quelques caméras industrielles en conduisant des tests en laboratoire. Un modèle a été sélectionné (Mako G234C, Capteur Sony IMX249, CMOS 12bit couleur, 1936x1216) selon le critère du meilleur rapport signal sur bruit pour des temps d'intégration courts correspondant à nos paramètres de mesure. La caméra fournit une image couleur grâce à une mosaïque de Bayer et est équipée d'un filtre infrarouge coupant les longueurs d'onde auxquelles le système visuel humain n'est pas sensible. La courbe d'efficacité lumineuse $V(\lambda)$ peut être approchée en combinant les réponses des canaux R, G et B^[37], ^[129], ^[130] en supposant qu'il existe une transformation linéaire entre l'espace RGB associé à la caméra et l'espace CIE XYZ 1931. Dans nos travaux précédents^[37], la combinaison linéaire était déterminée en minimisant l'erreur quadratique moyenne. Des travaux plus récents^[84] ont montré que les résultats sont bien meilleurs (voir Figure 4-2) en optimisant l'indice général d'adaptation à $V(\lambda)$ (noté f_1' et exprimé en %^[131]). La combinaison linéaire permettant d'adapter spectralement nos caméras est alors :

$$s(\lambda) = 0,0680 R(\lambda) + 1,1487 G(\lambda) - 1,3406 B(\lambda) \quad (4-1)$$

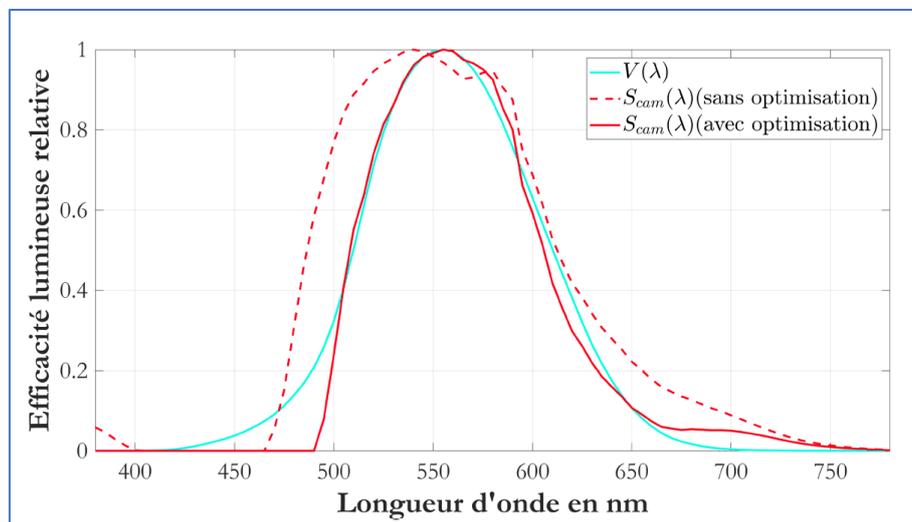


Figure 4-2 : adaptation spectrale avec et sans optimisation de f_1' (source : Thèse de F. Greffier)

Une fois l'adaptation spectrale réalisée, il faut associer à la caméra des fonctions permettant de convertir les valeurs des pixels en valeurs de luminance. Cette étape est réalisée en laboratoire devant une source de luminance étalon^[127], ^[128]. Le processus consiste à déterminer des fonctions de conversion qui dépendent de l'ensemble des réglages susceptibles de faire varier l'exposition à la lumière du capteur (focale, ouverture, temps d'exposition, gain)^[27]. Ainsi, une fonction est déterminée

pour chaque jeu de paramètres en faisant varier la luminance de l'étalon et en retenant le niveau de gris enregistré par la caméra. La contrainte d'un système embarqué à bord d'un véhicule nous oblige à fixer le temps d'exposition sur chaque caméra à 10 ms, afin d'éviter de parcourir une distance trop grande pendant l'acquisition. Ayant un temps d'exposition fixe et identique, chaque caméra produira le même flou de bougé et la correspondance des images LDR en sera améliorée. La mesure de faibles niveaux de luminance oblige, pour compenser le temps d'exposition court, à ouvrir l'objectif au maximum ($N = 1.4$), du moins pour la caméra dédiée aux faibles luminances. Cette configuration n'étant pas suffisante pour mesurer des luminances inférieures à 1 cd/m^2 , le gain de cette même caméra (notée Cam1) est fixé à 20 dB. Il est fixé à 0 dB pour les autres caméras. Reste à régler les ouvertures des 3 autres caméras. Dans une première version du système, la variation d'exposition de chaque caméra se faisait via une ouverture différente mais ceci présente l'inconvénient de ne pas disposer de la même profondeur de champ dans les différentes images et d'avoir des figures de diffraction différentes pour les sources lumineuses. Nous avons donc finalement opté pour des filtres neutres atténuant l'intensité lumineuse incidente. Le tableau 4-1 présente les paramètres d'exposition des quatre caméras.

Tableau 4-1 : paramètres des 4 caméras

Caméra	Temps d'expo	Ouverture	Gain	Filtre
Cam1	10 ms	1.4	20dB	-
Cam2	10 ms	1.4	0dB	ND 0.6
Cam3	10 ms	1.4	0dB	ND 2
Cam4	10 ms	1.4	0dB	ND 3

Avant d'identifier les fonctions de conversion en luminance, il est nécessaire de tenir compte du bruit d'obscurité des caméras et du vignettage dû aux optiques. Pour le premier, il faut caractériser les niveaux de gris d'images acquises dans l'obscurité (dites 'dark'). Ce bruit ayant une distribution aléatoire, les images dark sont fabriquées en pratique à partir d'une trentaine d'images. Quant au vignettage, il est caractérisé en éclairant uniformément la pupille d'entrée de l'objectif (d'où le nom de 'flat-field') et est également construit à partir d'une trentaine d'images. Ainsi, une image corrigée de ces deux effets se construit à partir de l'image brute telle que :

$$Image_{corrigée} = (Image_{brute} - dark) / flat_field \quad (4-2)$$

On notera que le flat-field est aussi corrigé de son dark et normalisé avec un maximum à 1 pour conserver des niveaux comparables aux images brutes. Une fois que tous les paramètres des caméras ont été fixés, chaque caméra est ensuite étalonnée à l'aide d'une sphère intégrante délivrant des luminances de 0 à $20\,000 \text{ cd/m}^2$. La Figure 4-3 présente les étalonnages photométriques des quatre

caméras. Des fonctions linéaires sont approximées entre une valeur minimale pix_{min} , définie à partir de l'écart-type du bruit d'obscurité, et une valeur maximale pix_{max} liée à la saturation, toutes deux représentées par les lignes verticales de la Figure 4-3 :

$$\begin{cases} pix_{min} = 3 \sigma(dark) \\ pix_{max} = 4095 - dark - pix_{min} \end{cases} \quad (4-3)$$

Ces limites seront utilisées pour définir les pixels sous-exposés et sur-exposés dans l'algorithme de construction HDR. La calibration photométrique conduit finalement à une gamme de mesure du système allant de 0,02 cd/m² à 400 000 cd/m².

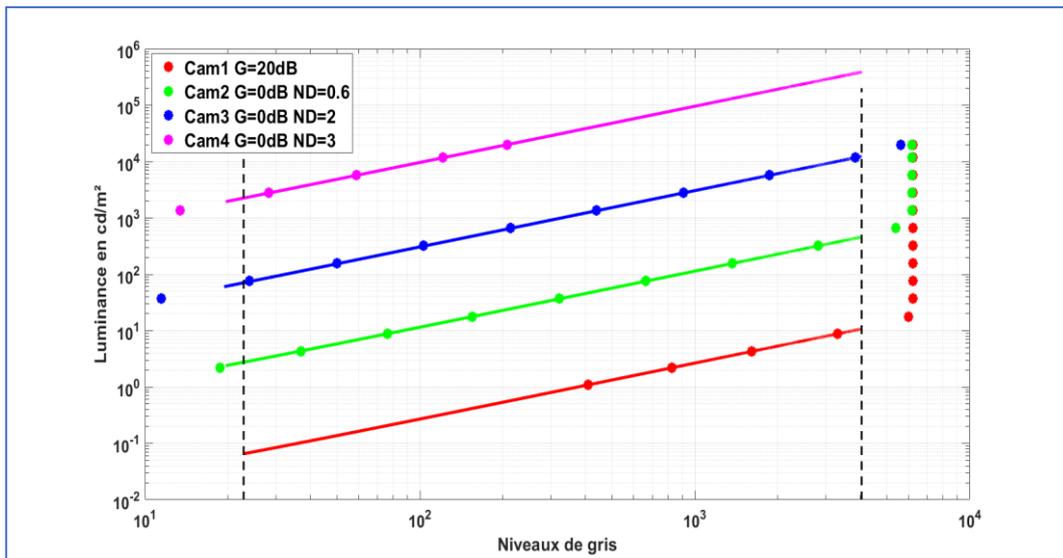


Figure 4-3 : étalonnage photométrique des 4 caméras

4.2 Calibration géométrique

Notre système peut s'apparenter à un double système stéréoscopique, et nous allons utiliser des outils d'imagerie stéréo pour caractériser les paramètres géométriques des caméras. Une caméra peut entièrement être modélisée à l'aide de paramètres internes appelés paramètres intrinsèques et les positions relatives des caméras peuvent être décrites à l'aide de paramètres extrinsèques. La calibration géométrique d'une caméra consiste à estimer des paramètres physiques liés à l'objectif et au capteur d'une caméra (paramètres intrinsèques, distorsion) ainsi que des paramètres liés à la prise de vue (paramètres extrinsèques). La calibration géométrique repose sur la modélisation mathématique d'un appareil photo. Le modèle le plus simple est celui du sténopé, du grec *stenos* (étroit) et *ôps* (œil), qui reproduit le fonctionnement des premières caméras (du mot latin signifiant *chambre*, sous-entendue *noire*) sans objectif, dotées d'une seule petite ouverture. Un système d'imagerie décrit par un modèle à sténopé nécessite de connaître les paramètres suivants : sa distance focale (exprimée en mm ou en nombre de pixels), la taille de ses pixels (en mm ou en pixels/mm) et les coordonnées du centre optique (en pixels). Comment détermine-t-on ces paramètres ? Il faut d'un

côté, un modèle mathématique, faisant intervenir ces paramètres et de l'autre, des images d'un objet de taille connue (souvent un damier permettant d'avoir de multiples points de mesure). Le modèle est basé sur les deux transformations mathématiques successives reproduisant d'une part la conjugaison optique puis la discrétisation de l'image en pixels. La conjugaison optique peut se représenter par une matrice qui relie les points du monde *objet* aux points du monde *image* telle que si un point M a pour coordonnées (X_M, Y_M, Z_M) dans le monde *objet*, la relation de Thalès avec la distance focale f , donne pour les coordonnées du point *image* m : $\begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix}$. On a alors, pour la conjugaison optique :

$$\begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} \quad (4-4)$$

La seconde transformation est la discrétisation en pixels qui peut se modéliser par la matrice :

$$\begin{pmatrix} u_m \\ v_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\delta_u & 0 & u_0 \\ 0 & 1/\delta_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4-5)$$

Où δ_u, δ_v sont les tailles des pixels dans les dimensions horizontale et verticale ; u_0, v_0 sont les coordonnées du centre optique dans l'image exprimées en pixels.

La combinaison des deux transformations précédentes donne :

$$\begin{pmatrix} u_m \\ v_m \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} \quad \text{avec } K = \begin{pmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

Où $f_u = f/\delta_u, f_v = f/\delta_v$ sont les focales équivalentes (horizontale et verticale) exprimées en pixels.

Les paramètres de la matrice K sont appelés les paramètres intrinsèques de la caméra et permettent, une fois déterminés, de modéliser sa prise d'image. Faire une prise de vue consiste à disposer la caméra dans une certaine position par rapport à l'objet. Cette position est décrite par les paramètres extrinsèques de la caméra composés d'une rotation et d'une translation. La Figure 4-4 explicite cette description.

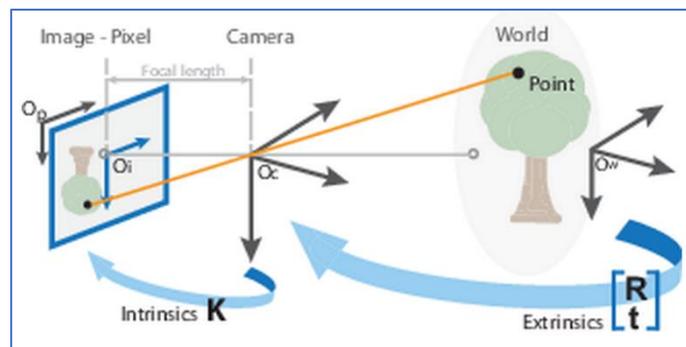


Figure 4-4 : paramètres extrinsèques et intrinsèques (source : documentation Matlab)

Dans ce schéma, O_c est le repère de la caméra, O_w le repère du monde, O_p le repère de l'image. Les points du monde sont exprimés dans le repère de la caméra en utilisant les paramètres extrinsèques. Ils représentent une transformation rigide du système de coordonnées du monde 3D au système de coordonnées de la caméra. Les coordonnées dans le repère caméra sont transformées dans le plan de l'image en utilisant les paramètres intrinsèques. Ils représentent une transformation projective des coordonnées de la caméra 3D vers les coordonnées de l'image 2D. Tous ces paramètres peuvent être calculés à partir d'images et de bibliothèques de calibration de caméra, en général basées sur la méthode de Zhang^[132]. Une série d'images d'un damier est réalisée. Connaissant les dimensions des carrés, chaque point de l'image correspond à un point du monde. Il y a alors autant d'équations que de points détectés dans la Figure 4-5 et les paramètres peuvent être estimés en résolvant un système d'équations linéaire.

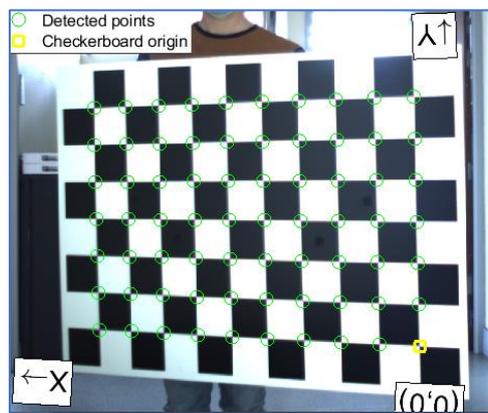


Figure 4-5 : Détection des carrés du damier

L'estimation des paramètres intrinsèques des caméras est présentée dans le tableau 4-2. Avec des pixels de $5,86 \mu\text{m}$, la distance focale (12,5 mm) théorique est de 2133 pixels et les coordonnées des points principaux sont 968 et 608. Il est à noter que l'incertitude sur la position du capteur est donnée à $\pm 150 \mu\text{m}$ soit environ ± 30 pixels, expliquant les résultats présentés dans le tableau 4-2.

Tableau 4-2 – paramètres intrinsèques des caméras

	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4
Distance focale $[f_u, f_v]$ (pixels)	[2161, 2162]	[2155, 2156]	[2164, 2165]	[2156, 2157]
Centre optique $[u_0, v_0]$ (pixels)	[962, 627]	[960, 637]	[954, 640]	[980, 621]

4.3 Calibration stéréoscopique

Considérons deux caméras dans un montage stéréoscopique, et deux images (une pour chaque caméra) du damier prises simultanément. Les paramètres intrinsèques et extrinsèques de chaque caméra sont calculés à l'étape précédente pour le même objet, dans la même position. Il est possible d'en déduire la position relative des deux caméras et une transformation permettant de passer d'un repère à l'autre, définie par une rotation R et une translation T . Les coordonnées X_1 d'un point dans le repère de la première caméra et X_2 dans le repère de la deuxième caméra sont reliées les unes aux autres par la transformation rigide : $X_2 = RX_1 + T$. Les objectifs photographiques ont un diamètre extérieur de 45 mm et les caméras sont placées côte à côte. On s'attend donc à une translation T de cet ordre de grandeur (voir tableau 4-3 en gras) et des rotations minimales.

Tableau 4-3 – positions relatives des caméras

	Cam1/Cam2	Cam3/Cam4	Cam1/Cam3	Cam2/Cam4
[rx, ry, rz] (mrad)	[2.4,4.3,0.7]	[0.3,-1.6,1.5]	[-4.4,11.2,-0.5]	[6.8,4.7,0.2]
[Tx, Ty, Tz] (mm)	[-46.2,0.1,0.8]	[-46.3,-0.5,-1.1]	[0.5,-45.4,3.3]	[0.3,-46.1,0.9]

Dans le cas idéal où les caméras sont identiques, les plans images confondus et les axes optiques parallèles, alors un point de l'espace est à la même hauteur sur les deux images. La recherche de correspondance (pour construire l'image HDR) entre les deux images est ainsi simplifiée. Mais ces conditions impliquent que le centre du capteur passe forcément par l'axe optique (et nous avons constaté que ce n'est pas le cas) et la perpendiculaire à cette surface en ce point doit être l'axe optique. De plus, en prolongeant le plan du premier capteur, on doit retrouver l'autre capteur vérifiant les mêmes conditions. Mécaniquement, ces éléments sont impossibles à réaliser. C'est pourquoi on utilise une méthode de rectification afin de se ramener au cas idéal. Ainsi, dans une image rectifiée, un point de l'image gauche est situé sur une droite dans l'image droite. L'étape de calibration stéréoscopique est tout d'abord appliquée dans la dimension horizontale pour obtenir des images rectifiées par rapport aux lignes horizontales. Ensuite, à partir de ces images rectifiées, la même étape est répétée dans la dimension verticale pour aboutir à des images doublement rectifiées. Ce processus spécifique permet de retrouver une source ponctuelle d'une image dans les trois autres images à l'intérieur d'un cercle de vingt pixels de rayon correspondant à un champ de vision de $0,5^\circ$. C'est un point clé pour construire nos images HDR.

4.4 Reconstruction HDR

Ayant fait le choix de quatre caméras synchrones juxtaposées, le principe de reconstruction HDR est plus complexe qu'avec un système mono-caméra. En effet, les quatre caméras ont chacune

un point de vue légèrement différent et les images ne sont donc pas directement superposables. Nous avons donc développé une méthode de construction HDR prenant en compte la spécificité de notre système. Si l'on considère un quadruplet d'images (IMG_1 à IMG_4), la première étape consiste à appliquer la double rectification précédente (celle-ci est perceptible sur les bords des images de la Figure 4-6) pour faciliter la correspondance des pixels. L'image présentant le maximum de pixels bien exposés est définie comme l'image principale. A partir de cette dernière, une image logique est construite avec tous les pixels saturés (supérieurs à pix_{max}) et plus ou moins dilatée en fonction de l'excentricité dans l'image. Cela permet de prendre en compte la perspective de la scène et la taille apparente de l'objet saturé. L'algorithme remplace ces zones saturées par des zones mesurées dans les autres images où la mesure est valide. L'exemple suivant (Figure 4-6) traite d'un feu de signalisation pour tramway (cercle rouge saturé dans IMG_1). La construction d'une image HDR couleur repose sur la même méthodologie que pour obtenir une image HDR en luminance, en étalonnant cette fois chaque canal de couleur séparément.



Figure 4-6 : quadruplet d'images synchrones acquises par le système

Une boîte englobante est ensuite définie autour de chaque zone dans IMG_1 et IMG_2 (verte et rose dans la Figure 4-7a) et est utilisée pour trouver la transformation morphologique (translation + rotation) permettant de les superposer (Figure 4-7b). Une fois recalées, les luminances des pixels peuvent être remplacées dans l'image principale pour obtenir une image HDR complète bien exposée

(Figure 4-8). Ce processus est répété avec la caméra suivante si la zone sélectionnée contient des pixels saturés restants.



Figure 4-7 : Zones extraites dans IMG_1 (vert) et IMG_2 (rose) avant (a) et après recalage (b).



Figure 4-8 : Image HDR reconstruite

4.5 Système mono point de vue

La relative complexité et le temps de calcul de l'algorithme de reconstruction HDR nous ont conduit à imaginer un système dans lequel les 4 caméras auraient le même point de vue. Pour cela, il faut 'transporter' l'image réalisée par l'objectif vers 4 capteurs judicieusement disposés. En utilisant un objectif secondaire, l'image formée par le premier objectif (point A' dans la Figure 4-9) peut être reproduite au point A'' , laissant assez d'espace pour y incorporer des lames semi-réfléchissantes (Figure 4-10).

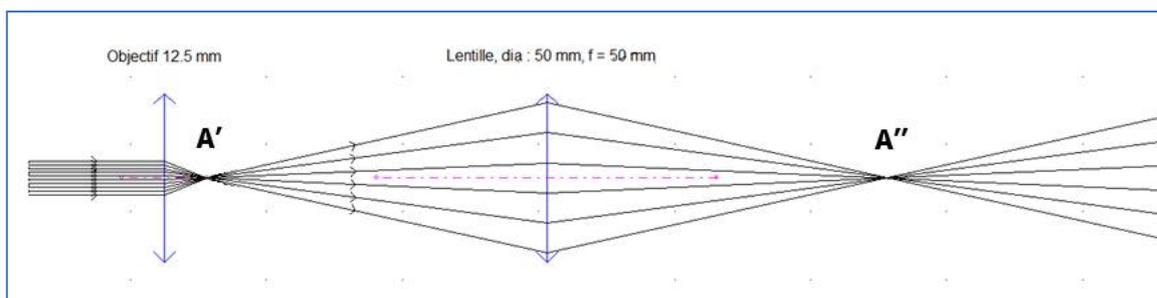


Figure 4-9 : Report d'une image A' en A'' grâce à un objectif secondaire

Ces lames permettent de dupliquer l'image vers des chemins différents. De plus, en utilisant des lames à taux de transmission et réflexion différents (92/8 ici), l'intensité initiale peut être répartie différemment selon les images secondaires. Dans l'exemple de la Figure 4-10, les 3 images secondaires se répartissent l'énergie comme suit : 92% pour l'image 1 ayant subi une transmission à travers une lame, 7.4% pour l'image 2 ayant subi une réflexion et une transmission, et 0.6% pour l'image 3 ayant subi deux réflexions.

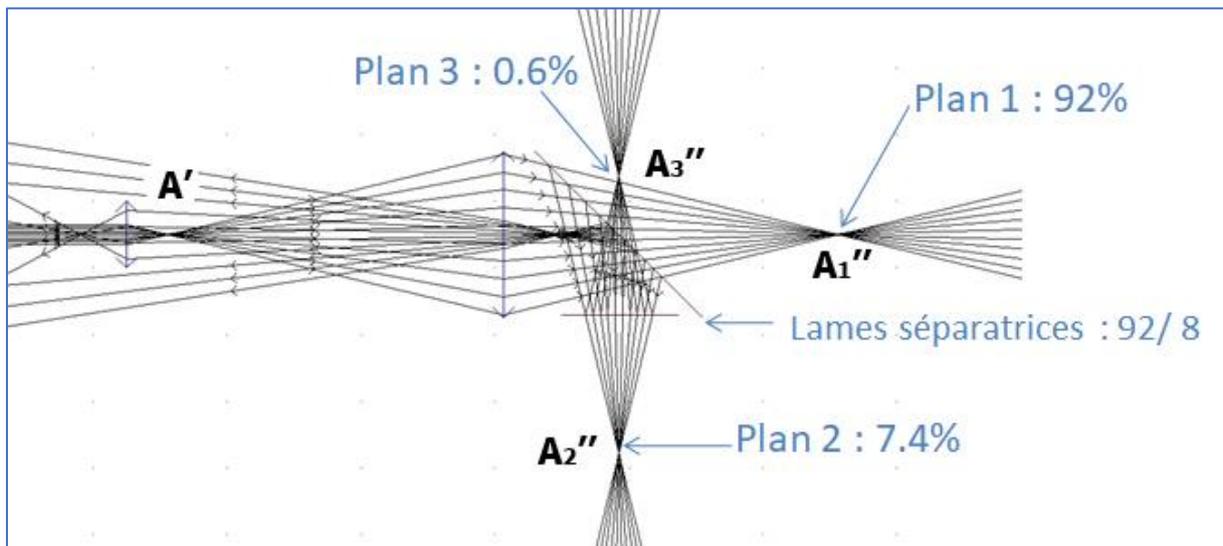


Figure 4-10 : Report d'une image A' en A_1'' , A_2'' et A_3'' à l'aide de lames semi-transparentes

Il est possible de mettre à profit les lames séparatrices pour générer les différentes images nécessaires à l'imagerie HDR et dans le même temps, d'en moduler l'intensité pour conserver des temps d'exposition identiques sur les capteurs. Le système développé est basé sur 4 caméras disposées selon la Figure 4-11.

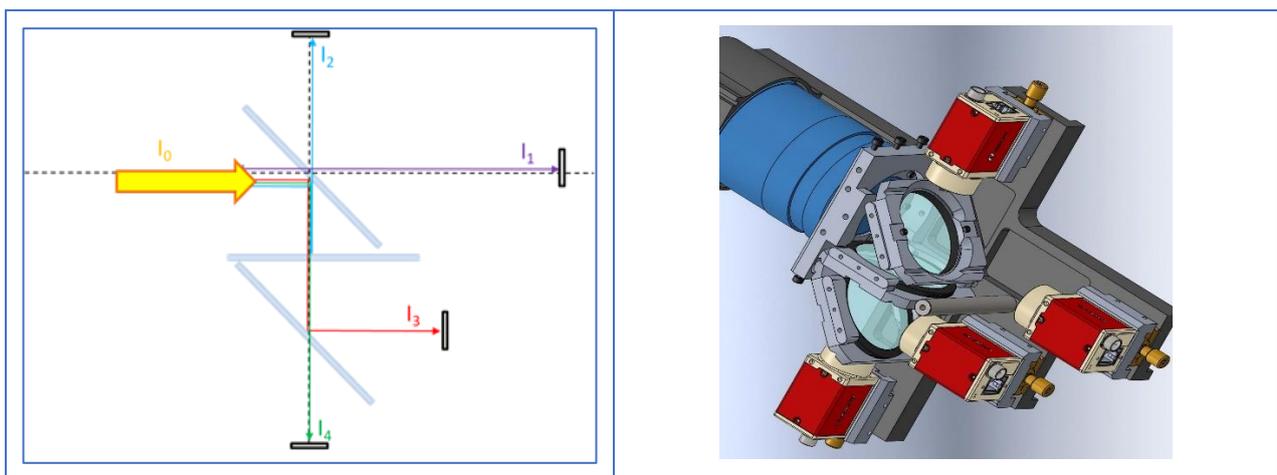


Figure 4-11 : Disposition des lames et des capteurs

L'image formée par l'objectif primaire est inversée (comme toute image issue d'une lentille convergente). Celle-ci est reprise par l'objectif secondaire pour former une image droite au niveau des capteurs. Or, une caméra est conçue pour restituer de façon droite une image inversée exactement

comme le fait notre cerveau. Ainsi sur la Figure 4-12, présentant une vue extérieure d'un parking, l'image 1 ayant juste subi une transmission de lame séparatrice est inversée. Les images 2 et 3, ayant subi 2 réflexions et une transmission sont inversées. L'image 4 ayant subi 2 transmissions et une réflexion est inversée haut-bas mais non inversée droite-gauche (la réflexion à 45° ayant uniquement changé cette direction).

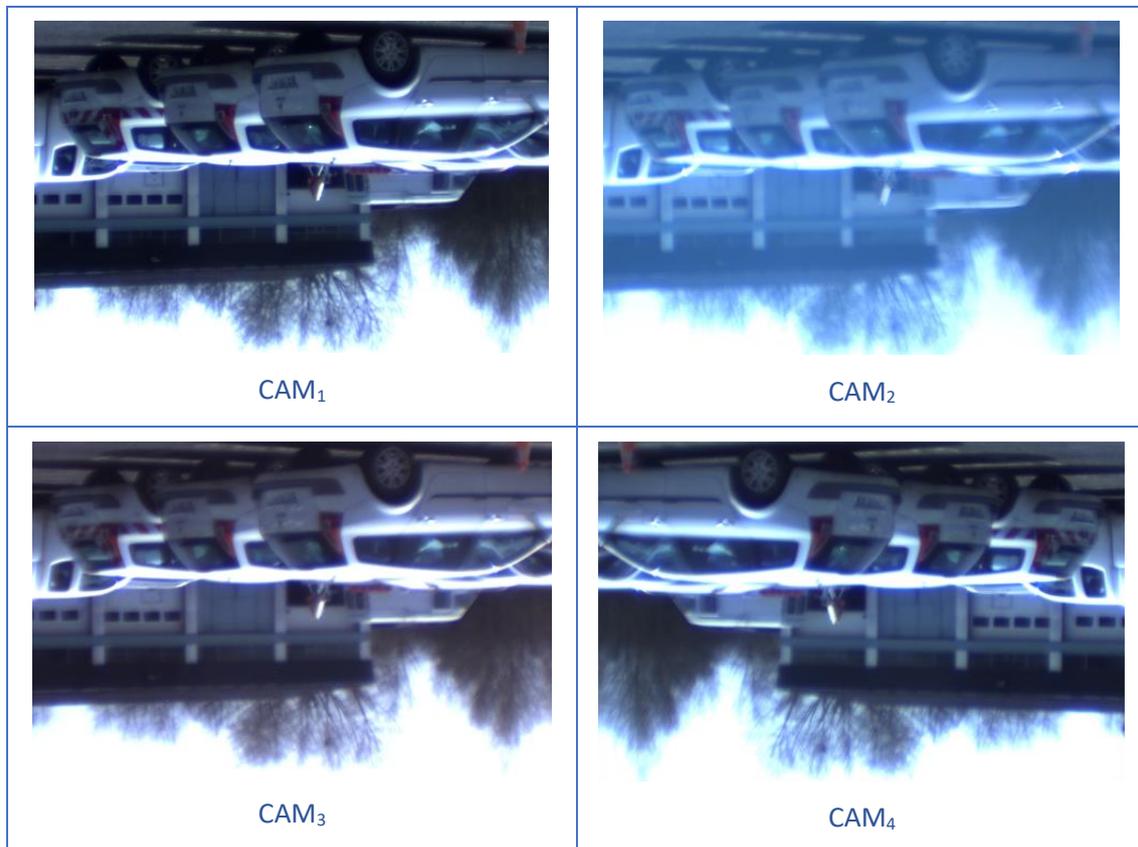


Figure 4-12 : Images brutes issues des 4 capteurs mise en correspondance

Afin de pouvoir superposer les images pixel à pixel, il est nécessaire de les retourner et de les recadrer. Pour connaître les coordonnées des pixels correspondants, les images sont zoomées sur un détail commun et les coordonnées sont relevées dans chaque image. Il est alors possible de recadrer chacune des images dans les bonnes proportions pour obtenir 4 images superposables. La Figure 4-13 représente la superposition de 3 images (CAM₁, CAM₄ et CAM₂) : couche rouge, l'image 1, couche verte, l'image 4, et couche bleue, l'image 2.



Figure 4-13 : Superposition des images CAM₁, CAM₄ et CAM₂

Le fait d'avoir le même point de vue permet donc une superposition des images pixel à pixel sans calculer de transformation locale pour remplacer les valeurs des pixels lors de la reconstruction HDR. On note en revanche une difficulté à réaliser des images parfaitement nettes. En effet, les transmissions et réflexions successives altèrent le front d'onde initial et se traduisent par un stigmatisme plus ou moins visible selon la focale utilisée pour l'objectif primaire.

L'intensité lumineuse entrant par l'objectif primaire est répartie selon quatre chemins optiques après transmission (T) ou réflexion (R) sur des lames séparatrices 92/8 (T = 92 % et R = 8 %). Soit I_0 l'intensité en entrée du système d'imagerie, le rayon 1 (cf. Figure 4-11) subit une transmission et a donc une intensité $I_1 = 0,92 I_0$. Le rayon 4 subit une réflexion et deux transmissions : $I_4 = 0,07 I_0$. Les rayons 2 et 3 subissent deux réflexions et une transmission : $I_2 = I_3 = 0,006 I_0$. Les temps d'exposition sont fixés à 10 ms et on ajoute un filtre neutre ND=0,6 à la caméra 3 du dernier étage pour ne pas avoir la même sensibilité que la caméra 2. Après un premier étalonnage, les gains sont ajustés pour répartir au mieux les dynamiques des 4 caméras (Figure 4-14).

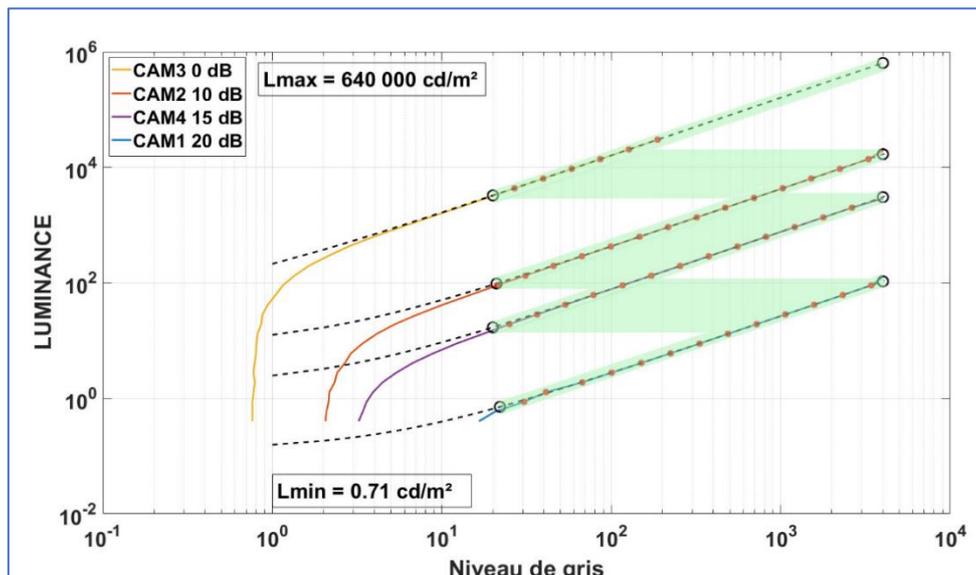


Figure 4-14 : Etalonnage photométrique des 4 capteurs

La caméra 1 a un gain fixé à 20dB pour conserver une luminance minimale mesurable inférieure à 1 cd/m². Pour construire une image HDR, l'algorithme de Reinhard^[133] est utilisé. Le principe de cet algorithme repose sur la contribution des pixels bien exposés dans toutes les images. Ainsi lorsque deux courbes d'étalonnage se recouvrent, les pixels de chacune des images correspondantes sont mutualisés (bandes vertes dans la Figure 4-14).

Deux inconvénients majeurs font que ce matériel est resté au stade du développement : Le manque de sensibilité et l'encombrement. Pour le premier, une luminance minimale mesurable de 0.7 cd/m² est trop grande pour des applications en éclairage nocturne. On estime que 0.1 cd/m² est le minimum requis. Une étude a été menée en augmentant le gain mais ce n'est pas la bonne solution car la linéarité du capteur se dégrade alors dans les faibles niveaux de gris. L'autre solution serait d'augmenter le temps d'exposition dans une limite compatible avec la vitesse de déplacement du véhicule. L'encombrement en revanche ne peut être changé et reste le défaut majeur du système.

4.6 Discussion

Notre système « Cyclope HDR » est aujourd'hui l'outil de référence pour réaliser nos recherches et nos expertises en éclairage. Dans le domaine de la photométrie routière, ce système est aujourd'hui le seul, à notre connaissance, à pouvoir réaliser des prises de vue HDR en dynamique. Son principal inconvénient tient dans le fait de gérer 4 caméras et d'avoir un dispositif relativement encombrant. Comment faire mieux ? En miniaturisant le système. Une voie possible serait d'utiliser une caméra à réponse logarithmique permettant d'augmenter la dynamique aux dépens de la résolution photométrique. Mais ce genre de caméra a encore l'inconvénient de fonctionner en rolling shutter c.à.d. sans exposition globale du capteur et cela reste problématique pour les applications en mouvement. Le développement des smartphones a permis de démocratiser les mini-caméras qui y sont intégrées. A l'aide de ces dernières, on peut donc imaginer un système beaucoup plus compact. Le seul bémol reste la synchronisation de plus de deux caméras qui n'est pas possible actuellement avec ces technologies. Une autre voie plus satisfaisante serait de décliner le mode HDR tel qu'il existe pour la couleur : utiliser une mosaïque de 4 filtres sur le même capteur et accéder ainsi à 4 prises de vues simultanées avec le même point de vue et des sensibilités différentes. Cette technique est décrite dans un brevet^[134] datant des années 2000, mais aucune caméra sur le marché ne la possède. Elle semblerait réservée à certains smartphones. Mais c'est pourquoi nous gardons un œil attentif sur les dernières avancées en termes de capteurs de smartphones et d'applications même si l'inconvénient majeur reste le pilotage desdits capteurs et l'accès plus ou moins aisé aux données brutes.

Références

- [127] C. Brusque et R. Hubert, « La métrologie de la luminance par caméra CCD Étalonnage et qualification du système MELUSINE », Bull. Lab. Ponts Chaussées, vol. 205, p. 39-47, 1996.
- [128] F. Fournela, « VISODYN, système d'acquisition et de traitement de scènes routières nocturnes. », Bull. Lab. Ponts Chaussées, vol. 207, p. 17-30, 1997.
- [129] C. Cauwerts, S. Jost, et B. Deroisy, « Calibration of high dynamic range images for applied color and lighting research », J. Opt. Soc. Am. A, vol. 36, no 11, p. C130, nov. 2019, doi: 10.1364/JOSAA.36.00C130.
- [130] S. Tominaga, S. Nishi, et R. Ohtera, « Measurement and Estimation of Spectral Sensitivity Functions for Mobile Phone Cameras », Sensors, vol. 21, no 15, p. 4985, juill. 2021, doi: 10.3390/s21154985.
- [131] « ISO/CIE 19476 :2014 - Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters (Norme). », International Organization for Standardization., 2014.
- [132] Z. Zhang, « A flexible new technique for camera calibration », IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 22, no 11, p. 1330-1334, nov. 2000, doi: 10.1109/34.888718.
- [133] E. Reinhard, Éd., High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting, 2nd ed. in The Morgan Kaufmann series in computer graphics. Burlington, MA: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2010.
- [134] Mitsunaga, Tomoo, Nayar, et Shree, « Apparatus and method for high dynamic range imaging using spatially varying exposures », 20040239798 10/886746, 2 décembre 2004.

5 L'éblouissement : comment évaluer la perte de contraste

L'imagerie HDR dynamique a ouvert de nouveaux potentiels pour caractériser les conditions de visibilité offertes aux usagers. Quantifier le contraste nécessite de savoir ce que l'œil voit et comment les informations sont interprétées. 'Savoir ce que l'œil voit' consiste à mesurer la scène avec un système d'imagerie ayant les mêmes caractéristiques que l'œil, ce qui fut l'objet du chapitre précédent. 'Savoir comment les informations sont interprétées' nécessite d'avoir des modèles de la vision humaine. Ces derniers vont chercher à reproduire les capacités du système visuel humain à détecter des contrastes, des formes, des couleurs. Pour les situations routières, nous allons notamment nous intéresser à quantifier les limites de fonctionnement du système visuel. Notamment l'éblouissement qui engendre une dégradation de la performance visuelle par une perte de contraste. Ce chapitre va, en premier lieu, présenter un modèle d'éblouissement statique qui tente de quantifier la perte de performance de l'œil en présence de sources lumineuses éblouissantes. Puis nous développerons une approche dynamique en modélisant l'adaptation visuelle, c'est-à-dire la capacité de l'œil à s'ajuster à la luminosité ambiante.

5.1 Eblouissement d'incapacité

L'éblouissement dégrade la performance visuelle. On parle donc d'éblouissement d'incapacité dû aux sources d'éclairage situées dans le champ de vision. En fonction de leur intensité et de leur excentricité, ces sources génèrent par diffusion dans les milieux oculaires, un voile lumineux (ou luminance de voile équivalente L_v) qui se superpose aux luminances présentes dans la scène observée, réduisant les contrastes. La luminance de voile L_v peut se calculer à partir d'une image HDR en luminance. Nous avons présenté des mesures de luminance de voile en conditions diurnes (Figure 5- 1) lors de la 28ème session de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)^[29] en nous inspirant des travaux de Porsch *et al.*^[135].

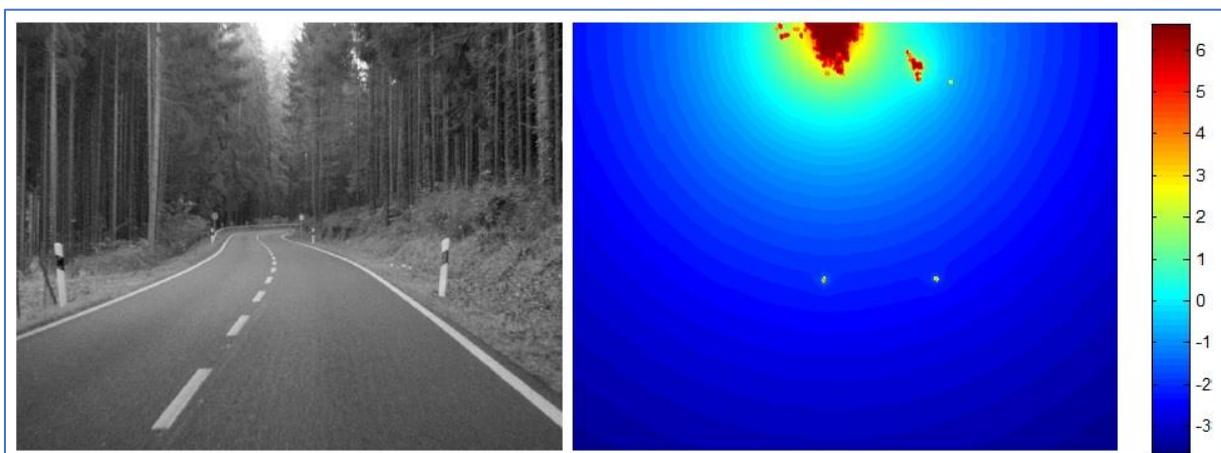


Figure 5-1: Image diurne en luminance et luminance de voile due au ciel

La luminance de voile d'une scène peut se décomposer comme la somme des luminances de voile de chacune des sources éblouissantes :

$$L_v = \sum_{k=1}^{N_s} L_{v_k} \quad (5-1)$$

Où L_{v_k} est la luminance de voile due à la k -ième source éblouissante. L_{v_k} peut être obtenue à partir de l'éclairement E_k sur la rétine et θ_k l'excentricité de la source par rapport à la direction du regard :

$$L_{v_k} = \begin{cases} E_k \left(\frac{10}{\theta_k^3} + \frac{5}{\theta_k^2} \left(1 + \left(\frac{A}{62,5} \right)^4 \right) \right) & \text{si } 0,1^\circ \leq \theta_k \leq 1,5^\circ \\ 9,86 \frac{E_k}{\theta_k^2} \left(1 + \left(\frac{A}{66,4} \right)^4 \right) & \text{si } 1,5^\circ < \theta_k \leq 60^\circ \end{cases} \quad (5-2)$$

Où A est l'âge de l'observateur. L'éclairement sur le pixel (i, j) est calculé à partir de la luminance de ce même pixel :

$$E_{ij} = L_{ij} \Omega_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (5-3)$$

Où Ω_{ij} est l'angle solide associé au pixel (i, j) et θ_{ij} est l'excentricité du pixel par rapport à la direction du regard dans l'image. Ω_{ij} ne dépend que des caractéristiques du système d'imagerie :

$$\Omega_{ij} = (e^2 \cos^3 \phi_{ij}) / f^2 \quad (5-4)$$

Avec e la taille du pixel, f la focale de l'objectif et ϕ_{ij} l'excentricité du pixel (i, j) par rapport au centre optique du système.

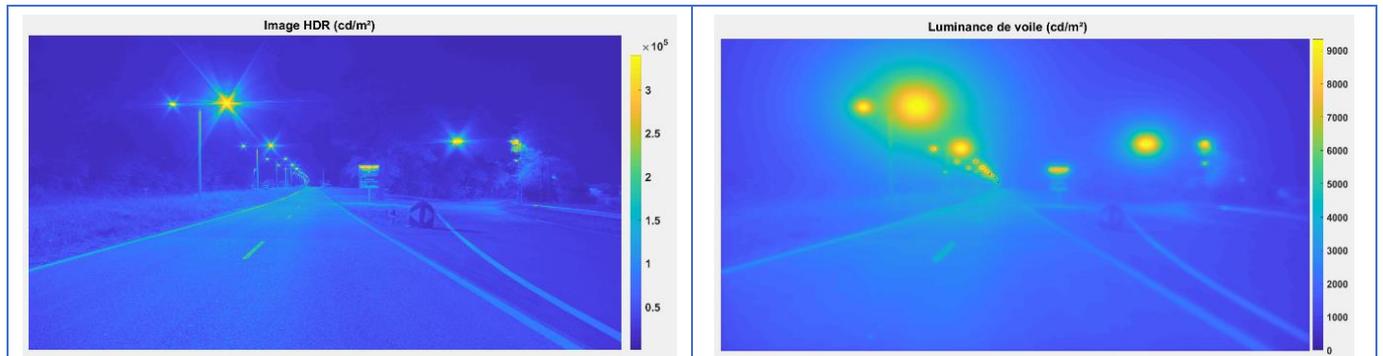


Figure 5-2 : image HDR et luminance de voile

En considérant chaque pixel comme un point de regard, la luminance de voile peut être calculée pour toutes les directions du regard couvertes par le champ de vision du système d'imagerie (Figure 5-2). Pour un point de regard particulier, on considérera tous les autres pixels comme des sources lumineuses. Cette méthodologie nécessite des temps de calcul importants pour obtenir l'image de luminance de voile (8 jours sur CPU) et cette fonction a donc été parallélisée pour obtenir des temps de calcul raisonnables (6 minutes sur GPU).

La baisse de performance de détection des contrastes est modélisé par le Threshold Increment f_{TI} (augmentation du seuil)^[136] qui représente le pourcentage de contraste supplémentaire nécessaire pour détecter une cible, du fait de la luminance de voile générée dans l'œil par une source éblouissante. C'est pour effectuer cette mesure particulière que nous travaillons avec des images HDR en luminance. En 2017, nous avons, pour la première fois, fourni une image de f_{TI} sous éclairage public^[27] (Figure 5-3). f_{TI} se modélise par l'expression suivante :

$$f_{TI} = \begin{cases} 65 \frac{L_v}{L_{moy}^{0,8}} & \text{si } 0,05 \leq L_{moy} \leq 5 \text{ cd/m}^2 \\ 95 \frac{L_v}{L_{moy}^{1,05}} & \text{si } L_{moy} > 5 \text{ cd/m}^2 \end{cases} \quad (5-5)$$

L_{moy} est la luminance moyenne de la chaussée, considérée comme la luminance d'adaptation.

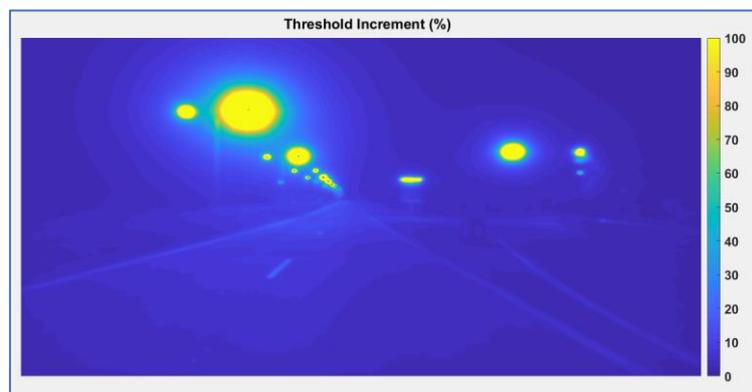


Figure 5-3 : Mesure du Threshold Increment en conditions nocturnes

L'image de f_{TI} nous permet donc d'accéder à une mesure en dynamique du Threshold Increment et de pouvoir la comparer aux seuils normatifs (compris entre 10 et 20 selon les classes d'éclairage). Ce modèle a été développé historiquement pour des conditions statiques. On peut alors légitimement se demander si un tel modèle est toujours valide pour traiter des images acquises au cours du déplacement. D'autres situations dynamiques méritent aussi d'être traitées : les alternances soleil/ombre ou les entrées/sorties de tunnel. Pour ces cas spécifiques, nous avons cherché un modèle prenant en compte l'aspect dynamique de la vision humaine.

5.2 Adaptation visuelle

L'adaptation visuelle est le fait d'adapter la sensibilité en fonction des conditions d'illumination de la scène observée pour optimiser les réponses des cellules rétiniennes. Selon la nature du changement de luminosité, le système visuel humain a besoin de quelques secondes à plusieurs minutes pour s'adapter et fonctionner de façon optimale pour détecter les contrastes. Malgré la grande aptitude d'adaptation de la vision humaine, les quatorze unités logarithmiques de luminances accessibles visuellement ne peuvent l'être simultanément. Wandell^[137] avance que les cônes et les bâtonnets sont capables de générer une réponse avec une dynamique d'entrée d'environ six unités

logarithmiques. L'expérimentation fondatrice de cette thématique a été sollicitée par les Ponts et Chaussées du Luxembourg pour laquelle la problématique était d'estimer la gêne par éblouissement au cours d'un parcours sinueux et boisé. Un certain nombre d'accidents avaient eu lieu sur cet itinéraire, sans pouvoir mettre en cause ni l'adhérence, ni les caractéristiques géométriques de la route. Ces situations nous ont suggéré une problématique rejoignant les enjeux d'éclairage en entrée et sortie de tunnel et, pour en rendre compte, il fallait mesurer toutes les luminances présentes dans le champ de vision. Nous nous sommes alors appuyés sur l'imagerie HDR et les nombreux travaux qui existent dans le domaine^[133]. Cela nous a permis de proposer une solution de diagnostic mêlant imagerie HDR et modélisation de l'adaptation visuelle en situation dynamique. Nous avons présenté les résultats de cette étude dans un rapport de recherche^[59] puis lors de la 28ème session de la CIE^[29]. Ils ont ensuite été déclinés dans ce qui constitue maintenant une de nos problématiques de recherche^{[25], [27]}. Nous avons utilisé pour cela, les fonctions proposées par Pattanaik *et al.*^[138] qui s'est inspiré des travaux de Hunt^[139] pour simuler l'adaptation aux variations de luminance. L'apport principal de Pattanaik est d'y avoir ajouté les aspects dynamiques de l'adaptation visuelle. La modélisation peut, dans un premier temps, être abordée d'un point de vue statique, c'est-à-dire sans considération temporelle en partant du principe que le système visuel est complètement adapté, au mieux de ses capacités. Les réponses des cônes et des bâtonnets ne dépendent alors que de la luminance d'adaptation et elles peuvent être modélisées par des fonctions sigmoïdes^{[137]-[139]}:

$$R(L) = B \frac{L^n}{L^n + \sigma^n} \quad (5-6)$$

Où $R(L)$ est la réponse physiologique d'un cône ou d'un bâtonnet à une luminance L . B et σ sont des variables qui dépendent de l'état d'adaptation. n est un paramètre de contrôle de la sensibilité de la réponse $R(L)$. Hunt propose $n = 0,73$ pour rendre compte de la contribution de la pupille dans l'adaptation visuelle. Les réponses des cônes et des bâtonnets suivent l'équation (5-6) indépendamment l'une de l'autre. Elles sont fonction de la luminance d'adaptation des cônes $L_{a,c}$, de celle des bâtonnets $L_{a,b}$ et de leur gamme de sensibilité à la lumière. Cela conduit à des expressions différentes pour obtenir les valeurs de B et σ selon le type de photorécepteur étudié.

$$B_c = \frac{2.10^6}{2.10^6 + L_{a,c}} \quad (5-7)$$

$$\sigma_c = \frac{12,9223 L_{a,c}}{k^4 L_{a,c} + 0,171(1-k^4)^2 L_{a,c}^{1/3}} \text{ avec } k = \frac{1}{1+5L_{a,c}} \quad (5-8)$$

$$B_b = \frac{0,04}{0,04 + L_{a,b}} \quad (5-9)$$

$$\sigma_b = \frac{2,5874 L_{a,b}}{19000 j^2 L_{a,b} + 0,26151(1-j^2)^4 L_{a,b}^{1/6}} \text{ avec } j = \frac{1}{1+5.10^5 L_{a,b}} \quad (5-10)$$

La Figure 5-4 propose des courbes de réponse des cônes et des bâtonnets obtenues pour différentes luminances d'adaptation.

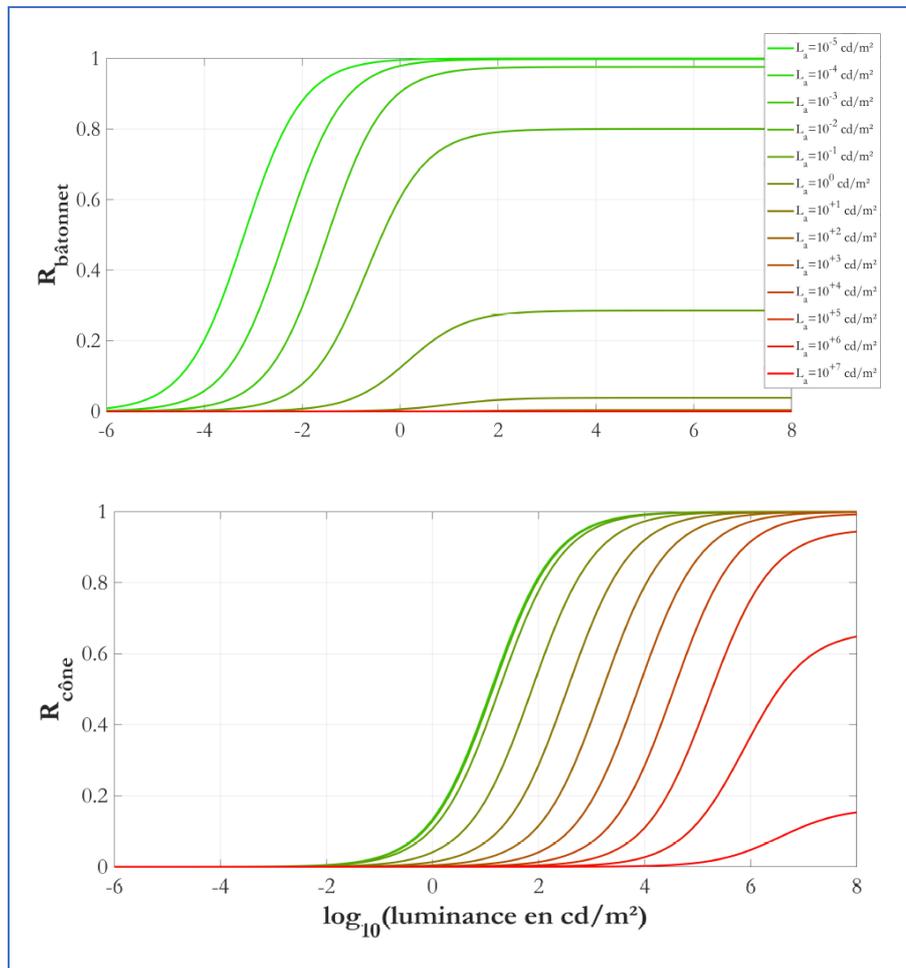


Figure 5-4 : Réponses des cônes et des bâtonnets selon les luminances d'adaptation (source : Thèse de F.Greffier)

Pour traiter l'aspect dynamique de l'adaptation visuelle, Pattanaik propose de discrétiser les processus temporels en considérant que l'adaptation visuelle à un instant (t) dépend des luminances moyennes de la scène observée et de l'état d'adaptation à l'instant ($t-1$). Les luminances d'adaptation deviennent alors des données dynamiques qui évoluent grâce à un filtre exponentiel discret de pas temporel T (les équations complètes sont à retrouver dans la thèse de F. Greffier^[84]). La Figure 5-5 illustre ces aspects dynamiques de l'adaptation visuelle. Elle présente, d'une part, l'évolution de la réponse d'un bâtonnet initialement adapté à sa limite haute (5 cd/m^2) lorsqu'il est exposé à une luminance faible (10^{-5} cd/m^2). Et d'autre part, la réponse d'un cône initialement adapté à sa limite basse ($0,005 \text{ cd/m}^2$) lorsqu'il est exposé à une luminance forte (10^6 cd/m^2). Les courbes sont un calcul d'écart relatif entre la réponse dynamique et la réponse statique prise pour référence. Ce modèle reproduit la capacité d'adaptation plus rapide des cônes à une lumière forte (quelques minutes) que celle des bâtonnets à l'obscurité (une trentaine de minutes). Cela suggère que dans le domaine de la

visibilité routière, le passage d'un environnement très lumineux à un environnement sombre sera potentiellement plus problématique.

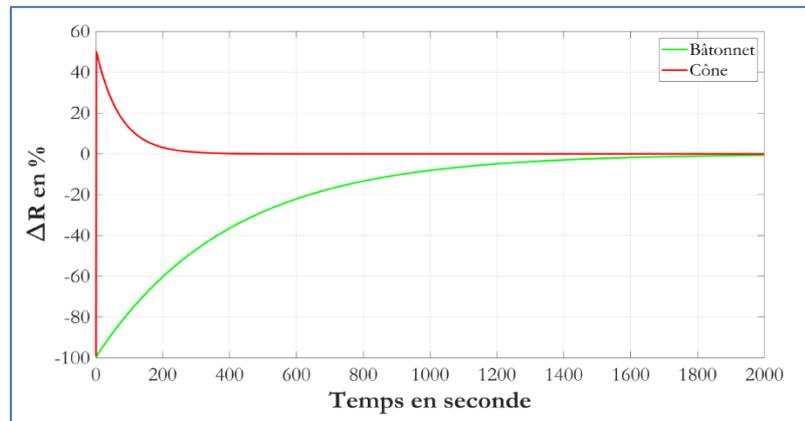


Figure 5-5 : Temps d'adaptation des cônes et des bâtonnets (source : Thèse de F.Greffier)

Pattanaik cherchant à mettre au point un opérateur de rendu réaliste d'images HDR, il propose que le seuil d'affichage maximal soit la réponse à cinq fois la luminance d'adaptation $R(5La)$. Le seuil d'affichage minimal est fixé à $1/32$ de la luminance maximale affichable, soit $R(5La/32)$. Au-delà de ces seuils, Pattanaik suppose que les cellules rétinienne sont, soit saturées, soit sous-exposées, et les luminances associées sont respectivement affichées en blanc et en noir. Nous nous sommes inspirés de ces deux valeurs pour définir, dans nos images en luminance, quels pixels correspondent à des cellules rétinienne saturées ou sous-exposées. Nous avons donc employé ces seuils dans nos travaux en conditions diurnes^[29] (Figure 5-6a). Les zones colorisées en bleu et en rouge en sortie de modèle correspondent respectivement aux pixels où les réponses des cellules rétinienne sont en-dessous et au-dessus des seuils. La luminance d'adaptation a été estimée comme la moyenne de toutes les luminances de l'image.



Figure 5-6 : (a) Adaptation visuelle en conditions diurnes, (b) Echelle de risque d'éblouissement

Nous avons également proposé une échelle de risque d'éblouissement (Figure 5-6b). Une fois calculées les zones de saturation et sous-exposition rétinienne, nous définissons un taux de saturation

en comptant la surface des pixels saturés à l'intérieur d'un cercle de 2° de rayon (vision centrale) projeté sur la chaussée. Le cercle est centré sur le point de regard. Dans le cas de cette route sinueuse, nous avons situé ce point au point de fuite de la route. L'échelle de risque d'éblouissement est alors construite comme suit : son étendue est [-3, +3], une valeur négative indique des pixels sous-exposés dans la zone de regard et une valeur positive correspond à des pixels saturés. Comme le montre la Figure 5-6b, un risque d'éblouissement de +1 correspond à un nombre de pixels saturés compris entre 12,5% et 25% de la surface du cercle. Une zone saturée entre 25% et 50% conduit à un risque de +2. Au-delà de 50% de pixels saturés, le risque d'éblouissement est maximal et égal à +3. Cette échelle de risque a été représentée sur l'ensemble du parcours de 25 km de long.

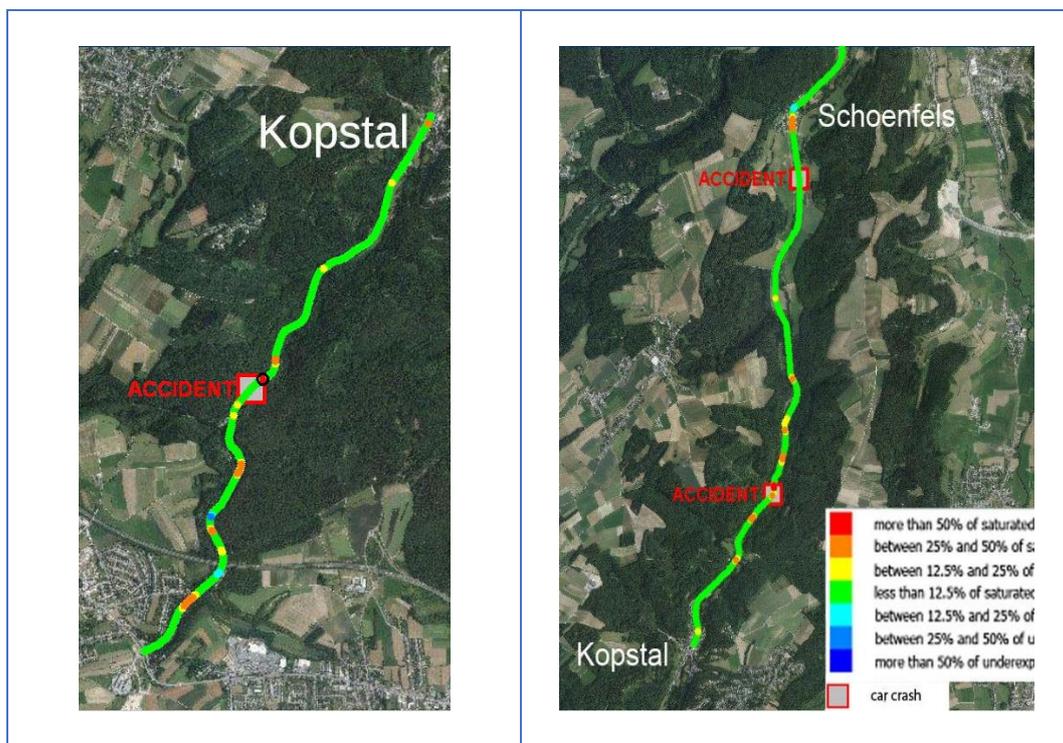


Figure 5-7 : Echelle de risque d'éblouissement et accidents

Ce type de résultat peut être directement comparé aux lieux d'accidents et nous avons constaté que deux scènes d'accident (carrés sur la Figure 5-7) correspondent à un risque maximal d'éblouissement, ce qui confirme, à ces endroits, la corrélation accident-incapacité visuelle. Malheureusement, il n'y a pas beaucoup d'alternatives pour répondre à ce genre de problème. Eteindre le soleil ou couper la forêt n'étant pas des solutions envisageables, le seul moyen est de donner plus de temps à l'œil pour s'adapter à la situation et cela se traduit par une diminution de la vitesse autorisée.

Ce modèle a également été appliqué dans des conditions nocturnes^[27] (Figure 5-8), pour identifier, de manière globale dans une image, les zones pouvant générer des problèmes de visibilité.



Figure 5-8 : Modélisation de l'adaptation visuelle en conditions nocturnes.

Pour aller au-delà de cette approche qualitative, nous étudions la possibilité de raccrocher les sorties de ce modèle à celles bien établies du Threshold Increment. Ainsi, lors de la 29^{ème} session de la CIE, nous avons présenté une comparaison entre l'évolution du TI et une métrique de saturation rétinienne^[25].

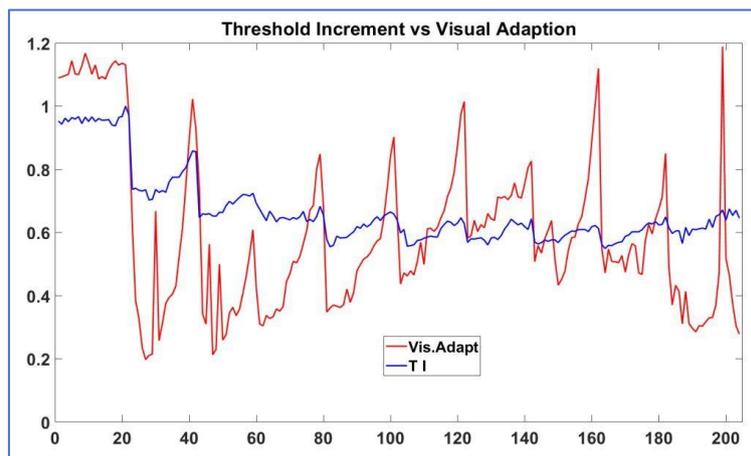


Figure 5-9 : Evolution du TI et du modèle d'adaptation visuelle en nocturne

Pour permettre une comparaison avec les calculs de TI, la luminance d'adaptation a été définie de façon identique pour les deux modèles comme la luminance moyenne de l'image. La Figure 5-9 présente les résultats des deux modèles le long du même boulevard sous éclairage routier. La courbe TI (en bleu) est normalisée par rapport à son maximum. La courbe d'adaptation visuelle (en rouge) correspond au pourcentage de photorécepteurs surexposés par rapport aux bien exposés. La courbe d'adaptation visuelle suit la même évolution que la courbe TI mais est plus sensible au passage des sources en dehors du champ de vision. Malgré des méthodologies d'évaluation nettement différentes, on observe des évolutions similaires de ces deux indicateurs. Ce qui suggère que la modélisation de l'adaptation visuelle est porteuse d'informations sur l'éblouissement d'incapacité. Mais pour le modèle d'adaptation visuelle, aucune excentricité par rapport au point de regard n'est prise en compte. Est-ce pertinent avec un modèle d'éblouissement ? Un pourcentage de photorécepteurs

surexposés n'est qu'une donnée relative et doit être mise à l'échelle par rapport à la perception de l'éblouissement.

5.3 Conclusion

Les modèles de vision humaine cherchent à reproduire les capacités du système visuel humain à détecter des contrastes, des formes, des couleurs. Pour les situations routières, nous nous sommes intéressés à quantifier les limites de fonctionnement du système visuel. Nous avons tout d'abord utilisé un modèle d'éblouissement statique, publié par la CIE. C'est notamment pour effectuer cette mesure particulière que nous travaillons avec des images HDR en luminance. La méthodologie permet d'accéder à une mesure en dynamique du Threshold Increment. En revanche, ce modèle a été développé historiquement pour des conditions statiques. Nous pouvons alors légitimement nous demander si un tel modèle est toujours valide pour traiter des images acquises au cours du déplacement. Aussi, nous avons cherché un modèle prenant en compte l'aspect dynamique de la vision humaine en modélisant l'adaptation visuelle et avons pu mettre en évidence de potentiels déficits de visibilité au cours d'un itinéraire. Reste à valider ce modèle. L'aspect dynamique de l'éblouissement d'incapacité serait un gros apport dans les documents de la CIE. Mais il faut pouvoir comparer le modèle à des données 'humaines'. C'est le sens de notre collaboration avec le laboratoire PICS-L de l'Université Gustave Eiffel pour tester les limites du modèle Threshold Increment en dynamique. Une expérimentation a déjà été imaginée avec une détection de cibles en situation de conduite et en présence de sources éblouissantes.

Références

- [135] T. Porsch, A. Walkling, F. Schmidt, et C. Schierz, « Measurement of the Threshold Increment (TI) in road lighting based on using ILMD », in Proceedings of CIE 2014 Lighting Quality and Energy Efficiency., Kuala Lumpur, Malaysia: International Commission on Illumination, CIE., 2014.
- [136] « Contrast and Visibility (Rapport technique) », International Commission on Illumination., CIE. CIE 095 :1992, 1992.
- [137] B. A. Wandell, Foundations of vision. Sunderland, Mass: Sinauer Associates, 1995.
- [138] S. N. Pattanaik, J. Tumblin, H. Yee, et D. P. Greenberg, « Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display », in Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '00, ACM Press, 2000, p. 47-54. doi: 10.1145/344779.344810.
- [139] R. W. G. Hunt, The reproduction of colour, 6th ed. in Wiley-IS&T series in imaging science and technology. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.

6 Contraste & Visibilité : comment intégrer les propriétés optiques de la route

La perception d'un objet est intimement liée à son contraste. Ainsi, les modèles de vision sont basés sur la comparaison de deux quantités, l'une provenant de l'objet et l'autre du fond sur lequel il se détache. Ce contraste est ensuite modulé par des facteurs de géométrie, de luminosité, d'environnement, d'âge, pour aboutir à des modèles plus ou moins complexes de visibilité. Nous présenterons tout d'abord le modèle utilisé historiquement dans la problématique routière et pourquoi nous cherchons à le réhabiliter dans les documents de la CIE. Si nous ne pouvons pas influencer sur les caractéristiques de l'objet à détecter qui peut être de nature très diverse (obstacle, piéton), nous maîtrisons en revanche celles du fond car il s'agit essentiellement de la route. Il faut alors connaître les propriétés optiques du revêtement pour optimiser le contraste et l'installation d'éclairage. Ces propriétés de réflexion sont définies dans le domaine routier sous le nom de « table- r » (r comme réflexion). Ces mesures sont réalisées en laboratoire ou in situ mais de façon très locale car effectuées sur un échantillon plus ou moins représentatif de toute une rue. Nous présenterons une technique basée sur l'analyse des luminances dans une image qui permet d'étendre grandement la zone de mesure et de prendre en compte l'hétérogénéité du revêtement. De plus, ces mesures sont réalisées selon les conditions de vue d'un automobiliste. Nous verrons que cette configuration limitée nécessite d'être complétée à d'autres angles d'observation qui sont actuellement en discussion au sein de la CIE. Nous terminerons sur la possibilité d'obtenir une description intégrale des propriétés optiques sous la forme de BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), pouvant être issue de mesures optiques agrémentées d'extrapolations ou bien de mesures géométriques alliées à un gonioréfectomètre virtuel.

6.1 Modèle de visibilité

Voir un objet est avant tout une question de contraste et c'est essentiellement par des différences de luminance que ce contraste est examiné dans les travaux relatifs à la visibilité routière^[140]. Pour l'observateur standard, tel que celui défini par la CIE^[141], la capacité à détecter un objet dépend de la taille angulaire et de la luminance de cet objet. En 1946, sur la base de la loi de Weber-Fechner appliquée à la vision, les travaux de Blackwell^[142] ont permis d'établir des seuils d'écart de luminance pour qu'un objet uniforme soit détectable sur un fond uniforme. Ils ont servi de support aux recherches d'Adrian dont le modèle de visibilité^[143] constitue un outil privilégié car il est le seul modèle, à notre connaissance, qui ait temporairement intégré des recommandations internationales relatives à l'éclairage routier^[144]. Ce modèle propose une formule complète pour calculer une

différence de luminances seuil, notée ΔL_{seuil} , pour laquelle une cible sera détectée avec une probabilité de 99 % :

$$\Delta L_{seuil} = 2,6 \cdot \left[\frac{\Phi^{\frac{1}{2}}}{\alpha} + L^{\frac{1}{2}} \right]^2 \cdot Fcp \cdot \frac{a(L_f, \alpha) + t}{t} \cdot A \quad (6-1)$$

Où $\Phi^{1/2}$ et $L^{1/2}$ sont des fonctions de la luminance de fond L_f , α est la taille angulaire de la cible, Fcp est une fonction liée à la polarité du contraste, $a(L_f, \alpha)$ est une fonction qui permet de tenir compte du temps d'observation t , A est une fonction de l'âge de l'observateur. Chacune des fonctions est détaillées dans notre rapport^[59]. Adrian reprend également la notion de niveau de visibilité, ou Visibility Level (VL), proposé pour la première fois en 1972 dans le rapport 19 de la CIE^[145]. Il s'agit du rapport entre le contraste réel d'une cible et le contraste seuil. Ce qui dans le modèle d'Adrian conduit à :

$$VL = \frac{L_c - L_f}{\Delta L_{seuil}} \quad (6-2)$$

Le VL est une mesure d'écart en unités de ΔL_{seuil} entre des caractéristiques réelles et un seuil de détection. Bien qu'en théorie une cible présentant un VL supérieur à 1 soit considérée comme visible au sens du modèle d'Adrian, il s'avère qu'en pratique, les VL des cibles étudiées doivent être bien supérieurs à 1 pour que ces cibles soient visibles. En effet, les expérimentations qui ont conduit à l'élaboration du modèle d'Adrian se sont déroulées dans des conditions contrôlées puisque la majorité des données expérimentales ont été recueillies en laboratoire. L'utilisation du modèle sur le terrain nécessite donc des précautions par rapport aux valeurs théoriques et on notera dans la littérature que l'utilisation du modèle a conduit, pour qu'une cible soit visible, à des VL supérieurs à 7^[146] voire compris entre 10 et 20^{[147], [148]}. Le modèle de visibilité d'Adrian a été utilisé pendant une vingtaine d'années pour évaluer ou comparer les performances d'installations d'éclairage routier. Le niveau de visibilité (VL) constituait alors un critère de qualité à part entière. La visibilité est aujourd'hui sortie des recommandations de la CIE (vraisemblablement pour des raisons de difficultés de mesures opérationnelles). Mais nous menons actuellement des recherches en faveur de sa réintégration. Elles sont au cœur des travaux de L. Lebouc dont la thèse^[85] vise à démontrer que des calculs ou des mesures de VL offrent un supplément d'informations nécessaire pour optimiser la performance visuelle des différents types d'utilisateurs dans l'espace urbain. En effet, elle a montré qu'une installation respectant les critères normatifs peut conduire à des situations où le VL est parfois mauvais (Figure 6-1).



Figure 6-1 : Bon contraste vs mauvais contraste

Comme ces images le montrent, le revêtement est partie prenante dans la qualité du contraste perçu. Le Visibility Level utilise des niveaux de luminances mesurés ou issus de calcul. Si nous souhaitons des modèles permettant de bien décrire le fonctionnement du système visuel humain, il est également nécessaire d'avoir des modèles fiables pour calculer les luminances des objets et de la chaussée. Pour cela, il faut une connaissance approfondie des propriétés optiques des revêtements. Les enjeux autour de la photométrie routière ne concernent pas uniquement la visibilité mais croisent aussi ceux des économies d'énergie, de la pollution lumineuse et du réchauffement climatique. Ces thèmes ne seront pas abordés dans ce document mais font partie des sujets étudiés par l'équipe dans des projets de recherche nationaux ou internationaux.

6.2 Les propriétés optiques des revêtements routiers

Le référentiel permettant de décrire les propriétés optiques des revêtements routiers est décrit dans la publication 144 de la CIE^[149] qui constitue le document de référence international.

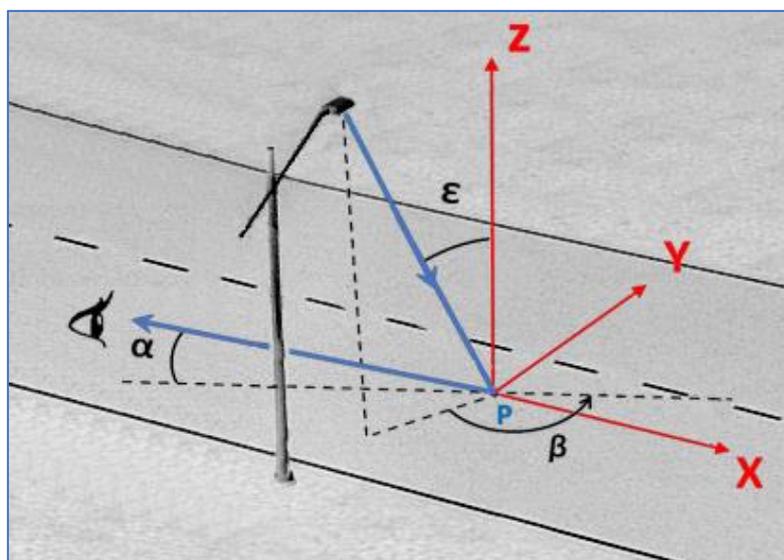


Figure 6-2 : formalisme angulaire pour l'éclairage routier

Les propriétés optiques d'une surface routière peuvent être décrites par un ensemble de coefficients de luminance q , qui sont le rapport de la luminance L perçue par un observateur regardant un point de la route sous l'angle α (Figure 6-2) sur l'éclairement E généré par une source de lumière en ce point, soit pour une incidence définie par les angles β et ε . Ils s'expriment en $\text{cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ ou en sr^{-1} .

$$q = \frac{L}{E} \quad (6-3)$$

Un luminaire d'éclairage est caractérisé par l'intensité I qu'il émet dans différentes directions. Ainsi, les propriétés d'une surface routière sont décrites, dans la pratique, par les tables- r qui sont un ensemble de coefficients r appelés coefficients de luminance réduits.

$$r = q \cdot \cos^3 \varepsilon \quad (6-4)$$

Cela permet de calculer la luminance de la surface routière à partir des valeurs d'intensité de la source lumineuse et de la hauteur h à laquelle est positionné le luminaire.

$$L = q \cdot E = \frac{q \cdot \cos^3 \varepsilon \cdot I}{h^2} = \frac{r \cdot I}{h^2} \quad (6-5)$$

La table- r est un format standardisé par la CIE pour décrire les propriétés optiques d'une surface routière sous une installation d'éclairage. La géométrie d'observation est fixée à $\alpha = 1^\circ$ correspondant à un conducteur dont l'œil est situé à 1,5 m de haut et dont le regard se porte à 86 m devant lui. Comme les propriétés optiques des revêtements de chaussée sont censées ne pas changer significativement pour un angle d'observation α compris entre $0,5^\circ$ et $1,5^\circ$ ^[149], des calculs d'éclairage peuvent être effectués avec la même table- r pour un conducteur qui regarde la route entre 60 et 160 m devant son véhicule.

6.2.1 Actualisation de la définition du coefficient de clarté

Dans tous les livres de photométrie, la définition du coefficient de clarté est donnée par :

$$Q_0 = \frac{1}{\Omega_0} \int_{\Omega_0} q(\varepsilon, \beta) \cdot d\Omega = \frac{1}{\Omega_0} \iint q(\varepsilon, \beta) \cdot \sin \varepsilon \cdot d\varepsilon \cdot d\beta \quad (6-6)$$

Où Ω_0 est l'angle solide contenant toutes les directions depuis le luminaire à une hauteur h jusqu'à des points contenus dans un rectangle défini dans le repère cartésien par les lignes $y = 0$, $y = 3h$, $x = 12h$ et $x = -4h$ (voir Figure 6-3).

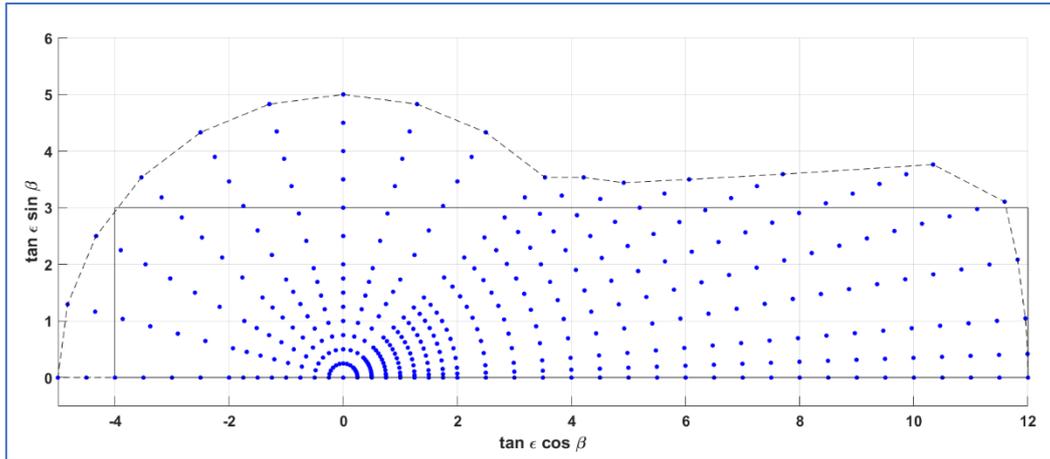


Figure 6-3 : éléments non-nuls d'une table-r et aires d'intégration Ω_0

Nous supposons (car aucune référence expliquant ce choix n'a été retrouvée) que cette surface rectangulaire (en trait plein dans la Figure 6-3) a été définie pour correspondre à une situation d'éclairage routier vue depuis un conducteur. Mais cela conduit à plusieurs difficultés. La première est d'ordre mathématique : il est compliqué d'intégrer selon une surface rectangulaire avec des coordonnées polaires. Cette intégrale peut alors être approximée (et c'est la méthode retenue jusqu'à aujourd'hui) en utilisant une table de coefficients de pondération réalisée par Sørensen^[150]. De plus, cette méthode décrit un matériau avec les éléments contenus dans ce rectangle mais néglige les autres éléments non-nuls présents dans la table-r. Enfin, cette surface définie pour un conducteur est susceptible de changer lorsqu'on s'intéresse à d'autres usagers de la route (piétons, cyclistes, trottinettistes).

Aussi, nous avons proposé dans la révision de la publication 144, une nouvelle définition de Ω_0 qui remédie aux difficultés précédentes (en traits pointillés dans la figure 6-3). Ω_0 est l'angle solide contenant toutes les directions depuis le luminaire à une hauteur h jusqu'à tous les points de valeur non nulle dans la table-r :

$$\Omega_0 = \iint q_0(\varepsilon, \beta) \cdot \sin \varepsilon \cdot d\varepsilon \cdot d\beta \quad (6-7)$$

$$\text{avec } q_0 = \begin{cases} 0 & \text{if } q(\varepsilon, \beta) = 0 \\ 1 & \text{if } q(\varepsilon, \beta) \neq 0 \end{cases}$$

La Figure 6-3 présente dans le repère cartésien, les éléments non-nuls d'une table-r, le Ω_0 rectangulaire et le Ω_0 proposé. Ce dernier n'est pas très différent du rectangle historique et n'engendre donc pas de grosses différences avec l'existant.

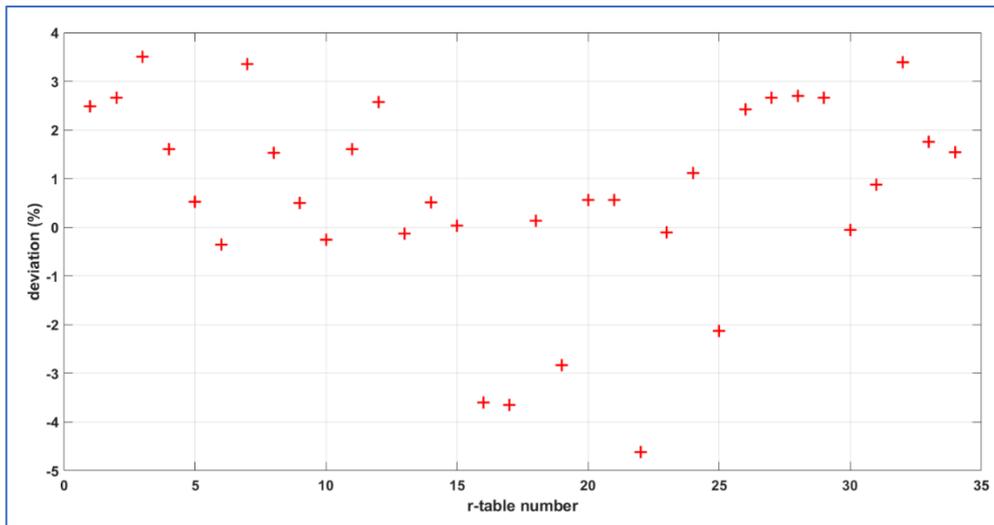


Figure 6-4 : Ecart avec la méthode de Sørensen sur 34 tables-*r*

La Figure 6-4 présente une comparaison entre l’ancien calcul (par pondération) et celui-ci sur la base de 34 tables-*r* (10 tables de la CIE + 24 expérimentales). Ainsi, le ‘vieux’ Q0 (comme dit dans le document CIE-144-2001) est approché dans la gamme [-4.6%, 3.5%]. Les plus grands écarts correspondent aux tables-*r* les plus spéculaires.

6.3 Mesurer une table-*r*

Le format standard des tables-*r* comprend 20 valeurs associées à l’angle β et 29 valeurs associées à l’angle ε pour couvrir l’ensemble des directions d’incidence de la lumière pour une installation d’éclairage routier. Ainsi, une table-*r* est un tableau de 580 coefficients *r*. Mesurer la table-*r* d’un revêtement se fait en utilisant un gonioréfectomètre, que ce soit en laboratoire, sur des échantillons de surface^{[151], [152]} ou directement sur site^{[153]–[156]}. De récents travaux proposent également d’estimer la table-*r* d’une surface routière à partir de mesures de luminance par ILMD (Imaging Luminance Measurement Device – c.à.d. une caméra étalonnée en luminance)^{[20], [157], [158]}. Jusqu’ici, la CIE n’a pas préconisé de faire ces mesures, du fait de l’hétérogénéité des surfaces routières et de leur évolution dans le temps. Mais l’obsolescence de ces tables-*r*, démontrée par de nombreux travaux, l’oblige actuellement à reconsidérer cette position lors de la très prochaine révision de la publication 144. C’est dans ce cadre que s’inscrivent nos travaux sur les géométries d’observation^{[24], [159]} et les métriques permettant de quantifier l’hétérogénéité^{[3], [22]}. Ces articles montrent les limites des tables-*r* standards et démontrent que des tables-*r* réelles peuvent intégrer l’hétérogénéité d’un revêtement, sans alourdir les méthodologies de mesure habituelles. Cependant ces méthodologies de mesure sont consommatrices de temps, en particulier si on veut mesurer toute une rue ou un territoire. C’est ce qui nous a encouragé à proposer une nouvelle méthode de mesure.

6.3.1 Estimation d'une table- r par imagerie

Que ce soit avec un gonioréfectomètre de laboratoire ou un appareil portable, mesurer la table- r d'un revêtement consiste à l'éclairer avec des incidences particulières, jusqu'à 580 couples (β , $\tan \epsilon$), et à mesurer la luminance qu'il réfléchit pour chacune de ces directions. L'éclairage sur le revêtement étant aussi mesuré, on en déduit les valeurs de q par l'équation (6-3) puis de r par l'équation (6-4). A partir d'une image en luminance, il semblerait, a priori, aisé d'en déduire la table- r du revêtement puisqu'il est aussi possible de mesurer l'éclairage produit par l'installation d'éclairage. Mais le système de 580 équations ne peut pas être résolu, du fait de sa dimension et de sa sensibilité au bruit. Chaque luminance étant une combinaison linéaire des coefficients multiplié par l'éclairage de chaque luminaire, une solution consisterait à allumer un seul luminaire à la fois et réaliser une mesure de luminance. Ceci étant inenvisageable en conditions réelles, nos collègues de l'Université Technique de Berlin^[157] ont contourné le problème en utilisant leur propre luminaire pour effectuer des mesures in situ de tables- r par ILMD. Connaissant précisément les caractéristiques du luminaire, ils peuvent calculer l'éclairage produit en chaque point d'une zone d'intérêt avec une direction d'incidence unique. Le luminaire est positionné au début puis à la fin de la zone d'intérêt et une image en luminance de cette zone est acquise pour chaque position du luminaire. Cela permet de calculer directement des rapports L/E qui sont ensuite interpolés linéairement pour correspondre aux valeurs standards d'une table- r . Celle-ci n'est pas retrouvée complètement car les angles d'incidences sont limités aux 2 positions de luminaire. Des chercheurs de l'Université de Vigo ont aussi développé une mesure de table- r par imagerie^[158]. Leur méthodologie repose sur une modélisation de la table- r par trois ellipsoïdes, chacune décrite par cinq paramètres. Ils cherchent alors à minimiser la différence entre les valeurs de luminance mesurées par imagerie et des valeurs de luminance calculées avec leur modèle de table- r . La minimisation consiste à faire converger les valeurs des 15 paramètres. L'avantage de cette méthode par rapport à celle de Buschmann *et al.* est de n'avoir besoin que d'un ILMD pour déterminer la table- r du revêtement. Les contreparties sont de connaître les caractéristiques de l'installation d'éclairage pour pouvoir effectuer les calculs qui servent à la minimisation. Ceux-ci peuvent être effectués en post-traitement, mais les temps de calcul sont relativement importants (environ 1h30).

6.3.2 Notre méthode par ACP

Notre technique pour mesurer une table- r par ILMD (Figure 6-5) est aussi basée sur la réduction de dimensionalité du problème. Nous nous sommes inspirés de travaux portant sur la mesure de sensibilité spectrale de caméras de Jiang *et al.*^[160]. Le domaine est différent mais le problème mathématique est le même : identifier des coefficients noyés dans une mesure qui est une combinaison linéaire de ces coefficients.



Figure 6-5 : Mesure de luminance de chaussée par ILMD

Nous avons détaillé cette technique dans un article paru dans la revue *Lighting Research & Technology*^[2]. Elle est basée sur une analyse en composantes principales (ACP) d'une base de données de tables- r . Ces composantes principales (ou vecteurs propres ou encore ici, tables- r propres) décrivent statistiquement la variance de la base de données. Une table- r , R , peut alors être décrite comme la combinaison linéaire des tables- r propres M :

$$R = \lambda_0 . M \quad (6-8)$$

Connaissant les caractéristiques de l'installation d'éclairage, il est possible de calculer une base A de cartes de luminances propres en utilisant l'équation (6-5) où les éléments de la table- r sont remplacés par les éléments des tables- r propres. La carte de luminance expérimentale L peut alors être décomposée sur cette base de cartes de luminances propres :

$$\lambda_1 = L . A^{-1} \quad (6-9)$$

Ce système est surdéterminé puisque le nombre d'éléments dans la carte de luminance L (c.à.d. le nombre de pixels mesurés dans l'image) est bien supérieur au nombre de coefficients λ_1 recherchés (nombre choisi de vecteurs propres). Une fois les coefficients λ_1 trouvés, ils permettent de reconstruire une table- r estimée R_{est} :

$$R_{est} = \lambda_1 . M \quad (6-10)$$

La Figure 6-6 montre le résultat de deux estimations pour une table- r d'une chaussée sèche et mouillée.

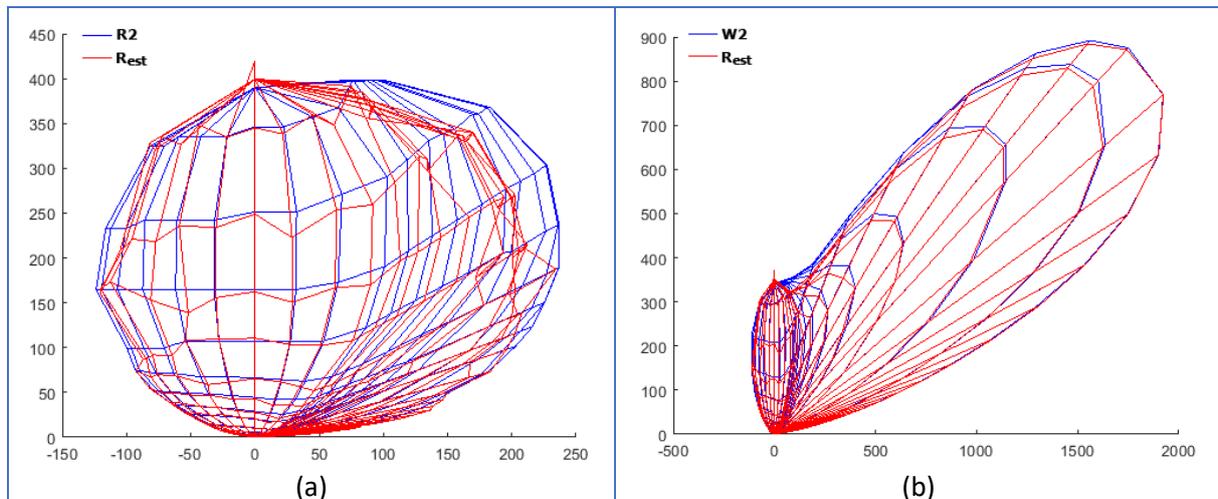


Figure 6-6 : Estimation de table- r d'un matériau sec (a) et mouillé (b)

Ainsi, nous disposons à ce stade d'une méthodologie de mesure in situ des propriétés optiques d'un revêtement par ILMC sous une installation d'éclairage dont les caractéristiques sont connues. La méthode mathématique utilisée permet de retrouver une table- r décrivant précisément ces propriétés aux endroits où les performances de l'installation d'éclairage sont évaluées. Nous l'avons alors utilisée pour concevoir une installation d'éclairage adaptatif qui tient compte de l'évolution des propriétés de réflexion du revêtement en fonction des conditions météorologiques. L'installation repose sur des luminaires possédant deux photométries distinctes. La méthodologie de développement est détaillée dans le papier^[18] et a été présentée lors de la conférence Lux Europa 2022. Le démonstrateur est en service à Limoges depuis avril 2022 et son évaluation expérimentale est prévue sur trois ans. Tous les paramètres du démonstrateur vont être monitorés : critères de qualité, scénarios activés, consommation d'énergie, état de surface. Du fait du caractère innovant de ce démonstrateur d'éclairage adaptatif, nous avons déposé une demande de brevet français^[54] en septembre 2021 qui est en cours d'extension au niveau européen.

6.4 BRDF

Nous terminerons ce chapitre par ce qui constitue le Graal en matière de propriétés optiques des surfaces : disposer de leur BRDF^[161]. La BRDF est en effet la fonction qui décrit la répartition de la lumière réfléchiée dans toutes les directions de l'espace à partir d'une onde électromagnétique incidente. Dans le domaine de l'éclairage routier, connaître la BRDF des revêtements permettrait de dépasser les limites qu'impose une géométrie d'observation figée. Même si des instruments de laboratoire permettent de mesurer la BRDF d'un revêtement^{[151], [159], [162]}, leur nombre est limité et la mesure est très coûteuse en temps et il n'existe pas de matériel permettant de mesurer une BRDF in

situ sur de larges surfaces. Ainsi, notre objectif actuel est d'obtenir des BRDF représentatives des propriétés des revêtements à grande échelle, à partir de relevés dynamiques. Nous allons étudier deux voies pour accéder à cette donnée : la première est de mesurer des tables- r dans des géométries d'observation particulières et pour lesquelles nous aurons des bases de données associées à ces géométries permettant de réaliser l'ACP. La BRDF dans toutes les directions d'observation serait ensuite obtenue par interpolation et extrapolation. Nous avons mené de premiers travaux sur cette approche de reconstruction^[19]. Nous avons cherché à obtenir une BRDF pour des angles d'observation α allant de 1° à 90° à partir de tables- r mesurées à 1° , 2° , 5° , 10° , 20° et 45° . Nous avons tout d'abord travaillé sur une interpolation/extrapolation en fonction de l'angle d'observation en utilisant des fonctions logarithmiques pour modéliser l'évolution du coefficient de clarté Q_0 (Figure 6-7).

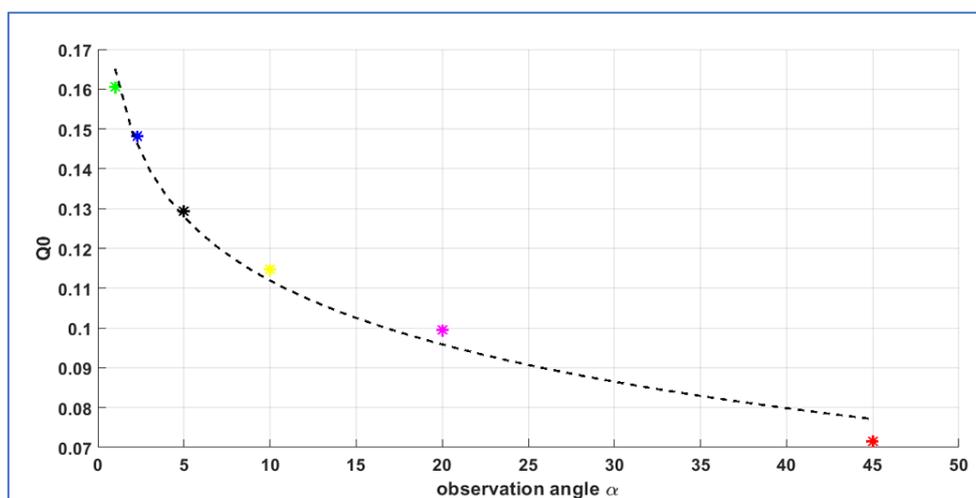


Figure 6-7 : Evolution de Q_0 en fonction de l'angle d'observation

Nous avons aussi travaillé sur une approche purement mathématique utilisant l'évolution des valeurs q en fonction des angles relatifs. Les valeurs à interpoler ou extrapoler sont obtenues comme une combinaison linéaire de leurs plus proches voisins dans un espace à six dimensions. q étant initialement une fonction des angles α , β et ε , les trois autres dimensions ont été définies à partir des différences angulaires $\varepsilon - \alpha$, $\beta - \alpha$ et $\beta - \varepsilon$. Nous avons ensuite comparé les performances des deux méthodes grâce à une BRDF de référence. Elles offrent des résultats comparables entre 1° et 45° , soit dans le domaine d'interpolation, puis la méthode basée sur les angles relatifs devient plus robuste dans le domaine d'extrapolation (Figure 6-8). Ces résultats seront à consolider avec d'autres BRDF mais il nous semble très prometteurs.

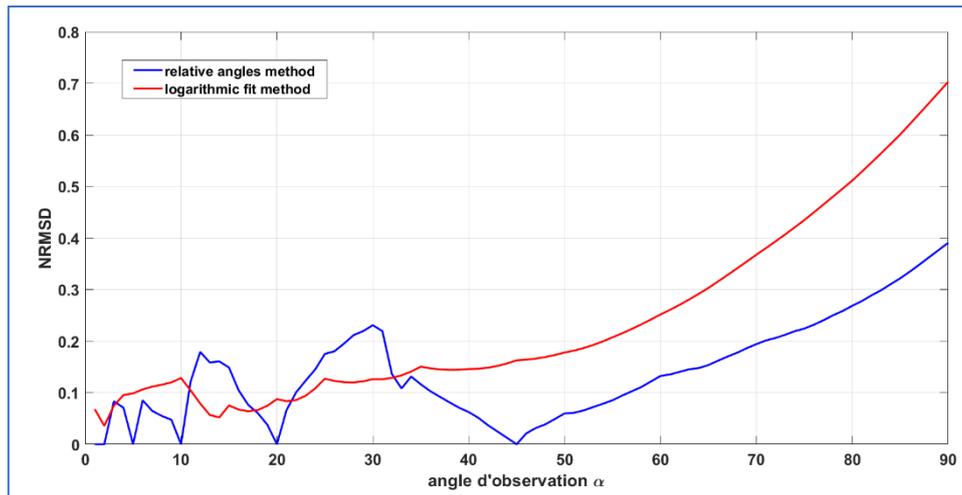


Figure 6-8 : Ecart relatifs des 2 méthodes avec une BRDF de référence

La deuxième voie pour mesurer une BRDF à partir de relevés dynamiques est très ‘numérique’. Elle consiste à s’inspirer de travaux sur l’apparence réaliste des surfaces en synthèse d’images. Pour ces applications, la BRDF d’une surface est mesurée dans un gonioréfectomètre virtuel à partir de sa géométrie 3D. Cette dernière est décrite par un ensemble de microfacettes^{[163], [164]}. L’idée est d’étendre cette approche aux surfaces routières, d’autant que de premières études ont démontrées sa faisabilité en situation statique^[165]. Nous pensons pouvoir passer aux conditions dynamiques grâce à un appareil d’auscultation routière du Cerema réalisant de la profilométrie 3D par laser. Les données, qui servent actuellement à étudier la profondeur moyenne de texture des chaussées, pourraient permettre de générer une description statistique du revêtement (distributions de pentes et de hauteurs) et ainsi construire sa géométrie 3D ‘mesurable’ dans un gonioréfectomètre virtuel pour obtenir la BRDF.

Ces deux voies d’investigation sont traitées depuis janvier 2023 dans le cadre d’un projet très ambitieux financé par l’Agence Nationale de la Recherche (ANR) : Le projet REFLECTIVITY - Road surfacEs Function for Lighting Evaluation, road marking Contrast, urban heat Island to ensure Visibility and sustainability - a été retenu dans le cadre de l’appel à projets générique 2022 de l’ANR. Nous prévoyons également la constitution d’une base de données de laboratoire de BRDF complètes, l’élaboration de modèles prédisant la BRDF d’un revêtement à partir de sa formulation, l’élaboration de modèles simulant les effets du vieillissement et de la variabilité de l’état de surface (humidité, salissure) sur la BRDF. Les applications envisagées concernent la visibilité des marquages routiers, l’optimisation des installations d’éclairage routier mais aussi l’estimation de l’albédo à partir de la BRDF et de mesures colorimétriques.

Références

- [140] R. Brémond, « La visibilité routière : une approche pluri-disciplinaire », mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris Est., 2010.
- [141] CIE. (1932). Proceedings 8th Session (Cambridge 1931). International Commission on Illumination, 1932.
- [142] H. R. Blackwell, « Contrast Thresholds of the Human Eye », *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 36, no 11, p. 624, nov. 1946, doi: 10.1364/JOSA.36.000624.
- [143] W. Adrian, « Visibility of targets: Model for calculation », *Light. Res. Technol.*, vol. 21, no 4, p. 181-188, déc. 1989, doi: 10.1177/096032718902100404.
- [144] « Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic (Rapport technique). », International Commission on Illumination, CIE. (1995). CIE 115 :1995, 1995.
- [145] « A Unified Framework of Methods for Evaluating Visual Performance Aspects of Lighting (Rapport technique). », International Commission on Illumination., CIE. (1972). CIE 19, 1972.
- [146] AFE, « Recommendations relatives à l'éclairage des voies publiques », Association française de l'éclairage, 2002.
- [147] W. Adrian, « Visibility Levels under Night-time Driving Conditions », *J. Illum. Eng. Soc.*, vol. 16, no 2, p. 3-12, juill. 1987, doi: 10.1080/00994480.1987.10748682.
- [148] M. S. Janoff, « Subjective Rating of Visibility », *Proc. IES Annual Conf*, Minneapolis, MN, 1988.
- [149] « Road Surface and Road Marking Reflection Characteristics », rapport technique, International Commission on Illumination., CIE. (2001). CIE 144 :2001, 2001.
- [150] K. Sørensen, « Description and Classification of Light Reflection Properties of Road Surfaces », *The Danish Illuminating Engineering Laboratory*, 7, janv. 1974.
- [151] E. Saint-Jacques, E. Dumont, et C. Villa, « Characterisation of the reflection properties of road surfaces using an in-lab gonio-reflectometer », in proceedings of CIE midterm meeting, october 2017, Jeju Island, Republic of Korea, International Commission on Illumination, CIE, 2017, p. 433-442. doi: 10.25039/x44.2017.WP03.
- [152] V. Muzet, M. Colomb, M. Toinette, P. Gandon-Leger, et J.-P. Christory, « towards an optimization of urban lighting through a combined approach of lighting and road building activities », in proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE, Washington DC, USA: International Commission on Illumination, CIE, juin 2019, p. 789-800. doi: 10.25039/x46.2019.PP23.
- [153] V. Muzet, J.-L. Paumier, et Y. Guillard, « COLUROUTE : a mobile gonio-reflectometer to characterize the road surface photometry », in Proceedings of 2nd CIE Expert Symposium on « Advances in Photometry and Colorimetry », Turin, Italy: International Commission on Illumination, CIE., 2008.
- [154] M. Jackett et W. Frith, « Measurement of the reflection properties of road surfaces to improve the safety and sustainability of road lighting », *NZ Transport Agency*, research report 383, 2009.
- [155] W. Li, S. Zheng, et H. Demirdes, « New achievements in practical determination of road surface reflection table from in situ measurements », in Proceedings of 28th Quadrennial Session of the CIE, Manchester, UK: International Commission on Illumination, CIE., 2015, p. 1676-1681.

- [156] D. Corell et K. Sørensen, « an instrument for the measurement of road surface reflection properties », in proceedings of CIE midterm meeting, october 2017, Jeju Island, Republic of Korea: International Commission on Illumination, CIE, 2017, p. 443-452. doi: 10.25039/x44.2017.WP04.
- [157] S. Buschmann, S. Völker, et J. Steblau, « new image based measurement method of reflective properties of road surfaces », in proceedings of the conference at the cie midterm meeting , october 2017, Jeju Island, Republic of Korea: International Commission on Illumination, CIE, 2017, p. 284-293. doi: 10.25039/x44.2017.OP39.
- [158] A. Ogando-Martínez, F. Troncoso-Pastoriza, E. Granada-Álvarez, et P. Eguía-Oller, « Ellipsoid-based approximation method for the estimation of the actual reduced luminance coefficients of road surfaces for accurate lighting simulations », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 63, p. 102502, déc. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102502.
- [159] V. Muzet et al., « Review of road surface photometry methods and devices – Proposal for new measurement geometries », *Light. Res. Technol.*, vol. 53, no 3, p. 213-229, mai 2021, doi: 10.1177/1477153520958454.
- [160] J. Jiang, D. Liu, J. Gu, et S. Susstrunk, « What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras? », in 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), Clearwater Beach, FL, USA: IEEE, janv. 2013, p. 168-179. doi: 10.1109/WACV.2013.6475015.
- [161] P. Boulenguez et L. Simonot, « Quand la matière diffuse la lumière », Presses des Mines éd., 2019.
- [162] E. Saint-Jacques, C. Prevost, et C. Villa, « evaluation of the performance of a road surface gonioreflectometer », in proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE, Washington DC, USA: International Commission on Illumination, CIE, juin 2019, p. 536-545. doi: 10.25039/x46.2019.OP73.
- [163] D. Meneveaux, B. Bringier, E. Tautzia, M. Ribardiere, et L. Simonot, « Rendering Rough Opaque Materials with Interfaced Lambertian Microfacets », *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 24, no 3, p. 1368-1380, mars 2018, doi: 10.1109/TVCG.2017.2660490.
- [164] B. Bringier, M. Ribardière, D. Meneveaux, et L. Simonot, « Design of rough microgeometries for numerical simulation of material appearance », *Appl. Opt.*, vol. 59, no 16, p. 4856, juin 2020, doi: 10.1364/AO.391254.
- [165] M. Khoudeir, B. Bringier, et M. T. Do, « 3D texture Analysis of fresh Pavement through acquisition and image processing », présenté à 2 nd annual european friction workshop, Nantes, France., 2019.

7 Perspectives

Mesurer la BRDF d'une chaussée est actuellement souvent difficile en raison du temps nécessaire à la mesure (4 angles échantillonnés finement peuvent conduire à des millions de positions). Mais plus fondamental est de l'obtenir avec toutes les propriétés de la lumière : la longueur d'onde et la polarisation, car aujourd'hui aucun modèle, à ma connaissance, ne tient compte de ces composantes dans la conception des éclairages. Au niveau spectral, la difficulté réside dans la mise place d'un spectromètre sur un goniorélectomètre et dans le temps d'acquisition nécessaire à une mesure. Pour la polarisation, il existe aujourd'hui des caméras polarimétriques donnant accès à l'état de polarisation de la lumière. Ainsi expérimentalement rien n'empêche (si ce n'est le temps) la mesure de BRDF complètes. En revanche, théoriquement, les modèles sont encore très loin de tenir compte de toutes les propriétés simultanément. L'histoire de la synthèse d'image montre qu'il existe de nombreux modèles de réflexion de la lumière, depuis les empiriques jusqu'à ceux basés sur l'optique ondulatoire en passant par l'optique géométrique et la théorie des microfacettes. Mais chaque modèle correspond à un type de matériau simple en général homogène ou au mieux constituer de couches différentes. Modéliser la BRDF des chaussées consiste aujourd'hui à caler des modèles paramétriques sur des mesures et nous sommes encore loin de pouvoir prédire les propriétés optiques des chaussées à partir de ses constituants (granulats et liant). En effet, elles sont liées d'une part, aux propriétés des constituants individuels mais aussi à leur ajustement et donc à la texture finale du matériau. Mais même ces données d'entrées sont souvent méconnues, et si elles existent, ne sont pas intégrables directement dans les modèles existants. Ce défi de prédire des propriétés optiques de chaussée à partir de leur formulation est au cœur du projet REFLECTIVITY. On y étudie la modélisation de la texture de chaussée par la théorie des microfacettes, la mesure des propriétés de réflexion de chaque constituant, l'estimation de la BRDF à partir de l'optique géométrique et d'un goniorélectomètre virtuel ainsi que l'évolution des propriétés en fonction de l'usure et de la météo. Tout cela est évidemment à comparer avec des mesures de laboratoire ou mieux, avec de la mesure in situ voire à grand rendement. C'est aussi dans cette optique que nous développons des méthodes pour estimer ces propriétés optiques à partir de caméras. Nous avons démontré la possibilité de remonter aux tables-r à partir de cartes de luminances nocturnes. Les perspectives de ces travaux sont de généraliser la méthode à d'autres angles d'observation et à des BRDF proprement dites puis, difficulté supplémentaire, de réaliser ces mêmes estimations de jour, en utilisant le système Soleil-Terre comme un goniomètre. Concernant les outils de mesure et la technologie, l'outil Cyclope HDR est l'outil de référence du Cerema pour la mesure photométrique en dynamique. Comment faire mieux ? En miniaturisant le système pour le rendre moins encombrant. Une voie possible serait d'utiliser des caméras à réponse logarithmique permettant d'augmenter la dynamique mais elles ont encore

l'inconvénient de fonctionner en rolling shutter c.à.d. sans exposition globale du capteur et cela reste problématique pour les applications en mouvement. Le progrès des smartphones a permis de démocratiser les mini-caméras qui y sont intégrées. On peut donc imaginer un système beaucoup plus compact. Le seul bémol reste la synchronisation de 3 ou 4 mini-caméras qui n'est pas possible actuellement. Une autre voie plus satisfaisante est de décliner le mode HDR tel qu'il existe pour la couleur : utiliser une mosaïque de filtres neutres sur le même capteur et accéder ainsi à des prises de vues simultanées avec le même point de vue mais des sensibilités différentes. Ces innovations technologiques sont prioritairement déclinées sur les smartphones et c'est pourquoi nous développons aussi des outils de mesure basés sur ces mini-caméras. Si les systèmes d'imagerie vont bientôt égaler la vision humaine dans toutes ses caractéristiques, il en faudra de même pour les modèles de perception. Actuellement, les aspects colorimétriques ne sont pas considérés en visibilité routière. La couleur, qui n'est pas une entité aussi quantifiable que la luminance, est plus difficilement manipulable pour évaluer les performances visuelles. Cependant il est nécessaire d'utiliser un contraste coloré pour rendre compte de la visibilité lorsque les surfaces ont des couleurs différentes et nous allons explorer cette voie en tenant compte des sensibilités des cônes. De tels modèles ne peuvent être validés sans les mettre en regard d'expérimentations psycho-visuelles et un outil en essor dans ce domaine est la réalité virtuelle. Elle permet d'alléger les expérimentations et de les réaliser des conditions contrôlées et reproductibles. Mais pour valider des modèles en lien avec la perception, il est nécessaire d'avoir des affichages réalistes tant au niveau des objets que du rendu de l'éclairage. Ce dernier est encore un point faible dans le monde de la synthèse d'image, du moins en ce qui concerne les éclairages et les propriétés optiques des routes. La nécessité d'affichage temps-réel a contraint à simplifier les modèles de propagation de la lumière au maximum, ne laissant que quelques paramètres peu représentatifs de quantités physiques. C'est aujourd'hui un manque dans le domaine routier que de pouvoir imager de façon réaliste, les mesures qui sont réalisées en laboratoire ou sur le terrain. Disposer d'une application permettant de dimensionner une installation d'éclairage en environnement virtuel basée sur des mesures physiques serait plus qu'utile à la communauté de l'éclairage : des concepteurs de systèmes d'éclairage aux fabricants de revêtements. Pour justifier mes propos, la CIE vient d'ouvrir un forum de recherche (RF-04) « L'éclairage dans l'utilisation des dispositifs de réalité augmentée, virtuelle et mixte ». De plus, les enjeux de la photométrie routière ne concernent pas uniquement la visibilité mais croisent aussi ceux des économies d'énergie, de la pollution lumineuse et du réchauffement climatique. Notre implication dans le projet ANR LUNNE qui vise à quantifier l'influence de l'éclairage artificiel nocturne, assoit aussi notre rôle dans l'évaluation des nuisances lumineuses afin de limiter l'impact des besoins anthropiques face aux enjeux de la transition écologique. Les thématiques de l'équipe ont de l'avenir si on en juge les mots du Président de la Division 4 « Eclairage pour les Transports et l'Extérieur » de la Commission Internationale de

l'Éclairage : « Pour le nouveau mandat à venir, je définis les objectifs stratégiques (...) : mettre à jour les rapports techniques d'une importance clé pour la Division (...) : les recommandations en matière d'éclairage routier, l'éclairage des zones urbaines, les calculs de l'éclairage routier. (...) Il sera également nécessaire de suivre la stratégie de recherche dans de nombreux domaines spécifiques de l'éclairage extérieur moderne, avec des aspects axés sur la numérisation, (...), les impacts environnementaux ».

"Les premières conclusions étaient tout à fait erronées ; ce qui montre combien il est dangereux de raisonner sur des données insuffisantes."

Sherlock Holmes

Production scientifique

ARTICLE DANS REVUE A COMITE DE LECTURE (ACL)

- [1] F. GREFFIER, **V. BOUCHER**, V. MUZET, S. BUSCHMANN, ET S. VÖLKER, « A GRID IN PERSPECTIVE FOR ROAD LIGHTING CALCULATIONS », LEUKOS, P. 1-16, DEC. 2022, doi: 10.1080/15502724.2022.2135529.
- [2] **V. BOUCHER** AND F. GREFFIER, « SPACE OF BASIS FUNCTIONS TO RETRIEVE ROAD SURFACE REFLECTION TABLES FROM LUMINANCE MAPS », LIGHT. RES. TECHNOL., P. 147715352210942, JUILL. 2022, doi: 10.1177/14771535221094275.
- [3] F. GREFFIER, V. MUZET, **V. BOUCHER**, F. FOURNELA, L. LÉBOUC, AND S. LIANDRAT, « INFLUENCE OF PAVEMENT HETEROGENEITY AND OBSERVATION ANGLE ON LIGHTING DESIGN: STUDY WITH NEW METRICS », SUSTAINABILITY, VOL. 13, NO 21, P. 11789, OCT. 2021, doi: 10.3390/su132111789.
- [4] M. MARCHETTI, **V. BOUCHER**, J. DUMOULIN, AND M. COLOMB, « RETRIEVING VISIBILITY DISTANCE IN FOG COMBINING INFRARED THERMOGRAPHY, PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS AND PARTIAL LEAST-SQUARE REGRESSION », INFRARED PHYS. TECHNOL., VOL. 71, P. 289-297, JUILL. 2015, doi: 10.1016/j.infrared.2015.05.002.
- [5] J. DUMOULIN AND **V. BOUCHER**, « INFRARED THERMOGRAPHY SYSTEM FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURES SURVEY WITH INLINE LOCAL ATMOSPHERIC PARAMETER MEASUREMENTS AND OFFLINE MODEL FOR RADIATION ATTENUATION EVALUATIONS », J. APPL. REMOTE SENS., VOL. 8, NO 1, P. 084978, JUILL. 2014, doi: 10.1117/1.JRS.8.084978.
- [6] A. CAUCHETEUX, A. ES SABAR, AND **V. BOUCHER**, « OCCUPANCY MEASUREMENT IN BUILDING: A LITERATURE REVIEW, APPLICATION ON AN ENERGY EFFICIENCY RESEARCH DEMONSTRATED BUILDING », INT. J. METROL. QUAL. ENG., VOL. 4, NO 2, P. 135-144, 2013, doi: 10.1051/ijmqe/2013044.
- [7] **V. BOUCHER** ET E. BELIN, « IMAGERIE EN MILIEU DIFFUSANT PAR REINJECTION LASER », IN BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 2006, P. 33-40.
- [8] A. APOSTOLUK, **V. BOUCHER** ET AL., « PERMANENT LIGHT-INDUCED POLAR ORIENTATION VIA ALL-OPTICAL POLING AND PHOTOTHERMAL CROSSLINKING IN A POLYMER THIN FILM », OPT. COMMUN., VOL. 260, NO 2, P. 708-711, AVR. 2006, doi: 10.1016/j.optcom.2005.11.026.
- [9] **V. BOUCHER**, H. LÉBLOND, AND X. NGUYEN-PHU, « POLARIZATION SWITCHING IN A PLANAR OPTICAL WAVEGUIDE », PHYS. REV. E, VOL. 68, NO 5, P. 056604, NOV. 2003, doi: 10.1103/PhysRevE.68.056604.
- [10] **V. BOUCHER**, R. BARILLE, AND G. RIVOIRE, « POLARIZATION-SWITCHING CONTROL IN A NONLINEAR LIQUID PLANAR WAVEGUIDE », J. OPT. SOC. AM. B, VOL. 20, NO 8, P. 1666, AOUT 2003, doi: 10.1364/JOSAB.20.001666.
- [11] A. APOSTOLUK, **V. BOUCHER**, R. SEVENO, C. FIORINI, B. SAHRAOUI, AND J.-M. NUNZI, « STRUCTURAL AND DYNAMIC STUDIES OF THE POLAR ORIENTATION INDUCED BY CORONA POLING AND ALL-OPTICAL POLING IN CROSSLINKABLE POLYMER THIN FILMS », IN ORGANIC NANOPHOTONICS, F. CHARRA, V. M. AGRANOVICH, ET F. KAJZAR, ÉD., DORDRECHT: SPRINGER NETHERLANDS, 2003, P. 355-366. doi: 10.1007/978-94-010-0103-8_30.
- [12] **V. BOUCHER** AND X. NGUYEN-PHU, « GENERATION OF MULTICOLOR SPATIAL SOLITONS BY STIMULATED RAMAN SCATTERING », APPL. OPT., VOL. 41, NO 21, P. 4390, JUILL. 2002, doi: 10.1364/AO.41.004390.
- [13] **V. BOUCHER**, H. LÉBLOND, AND X. N. PHU, « MULTISCALE THEORY OF NONLINEAR WAVEPACKET PROPAGATION IN A PLANAR OPTICAL WAVEGUIDE », J. OPT. PURE APPL. OPT., VOL. 4, NO 5, P. 514-520, SEPT. 2002, doi: 10.1088/1464-4258/4/5/305.
- [14] **V. BOUCHER** AND X. NGUYEN PHU, « POLARIZATION FIELD IN OPTICAL SPATIAL VECTOR SOLITONS », OPT. COMMUN., VOL. 199, NO 1-4, P. 223-229, NOV. 2001, doi: 10.1016/S0030-4018(01)01513-9.
- [15] R. VOLLE, **V. BOUCHER**, K. D. DORKENOO, R. CHEVALIER, AND X. NGUYEN PHU, « LOCAL POLARIZATION STATE OBSERVATION AND THIRD-ORDER NONLINEAR SUSCEPTIBILITY MEASUREMENTS BY SELF-INDUCED POLARIZATION STATE CHANGES METHOD », OPT. COMMUN., VOL. 182, NO 4-6, P. 443-451, AOUT 2000, doi: 10.1016/S0030-4018(00)00787-2.
- [16] V. SKARKA, V. I. BEREZHIANI, AND **V. BOUCHER**, « SELF-TRAPPING OF ELECTROMAGNETIC PULSES IN NARROW-GAP SEMICONDUCTORS », PHYS. REV. B, VOL. 61, NO 15, P. 10201-10205, AVR. 2000, doi: 10.1103/PhysRevB.61.10201.
- [17] M. SYLLA, M. GIFFARD, **V. BOUCHER**, B. ILLIEN, N. MERCIER, AND X. NGUYEN PHU, « NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF CHIRAL THIOLATES », SYNTH. MET., VOL. 102, NO 1-3, P. 1548-1549, JUIN 1999, doi: 10.1016/S0379-6779(98)00548-7.

COMMUNICATION AVEC ACTES DANS UN CONGRES INTERNATIONAL (ACTI)

- [18] F. GREFFIER, **V. BOUCHER**, R. DRONNEAU, AND V. MUZET, « DESIGN OF AN ADAPTIVE ROAD LIGHTING INSTALLATION TAKING INTO ACCOUNT THE EVOLUTION OF PAVEMENT REFLECTION PROPERTIES ACCORDING TO THE WEATHER CONDITIONS. », IN IN PROCEEDINGS OF 14TH EUROPEAN LIGHTING CONFERENCE - LUX EUROPA 2022., PRAGUE, CZECH REPUBLIC, 2022.

- [19] **V. BOUCHER**, GREFFIER FLORIAN, LILEKE STEVE, AND LÉBOUC LAURE, « ROAD BRDF CONSTRUCTION FROM MEASURED R-TABLES », PRESENTE A 17TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF LIGHTING, TOULOUSE, 2022.
- [20] **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, « A METHOD TO ESTIMATE ROAD OPTICAL REFLECTION PROPERTIES FROM LUMINANCE MAP », PRESENTE A LUX EUROPA 2022, 2022.
- [21] L. LÉBOUC, **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, S. LIANDRAT, A. NICOLAÏ, AND P. RICHARD, « INFLUENCE OF ROAD SURFACES ON THE CALCULATION OF A TARGET VISIBILITY TAKING INTO ACCOUNT THE DIRECT AND INDIRECT LIGHTING », IN PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE CIE 2021, ONLINE (HOSTED BY NC MALAYSIA): INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE, DEC. 2021, P. 32-41. DOI: 10.25039/x48.2021.OP03.
- [22] F. GREFFIER, V. MUZET, AND **V. BOUCHER**, « HOW TO TAKE INTO ACCOUNT THE HETEROGENEITY OF OPTICAL PROPERTIES OF A PAVEMENT IN LIGHTING DESIGN? », IN PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE CIE 2021, ONLINE (HOSTED BY NC MALAYSIA): INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE, DEC. 2021, P. 42-51. DOI: 10.25039/x48.2021.OP04.
- [23] **V. BOUCHER**, S. BUSCHMANN, F. GREFFIER, V. MUZET, AND S. VOELKER, « KEEPING THE BENEFIT OF ILMD'S HIGH RESOLUTION IN MEASURING LIGHTING QUALITY PARAMETERS », IN PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE CIE 2021, ONLINE (HOSTED BY NC MALAYSIA): INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE, DEC. 2021, P. 431-441. DOI: 10.25039/x48.2021.OP55.
- [24] F. GREFFIER, V. MUZET, **V. BOUCHER**, F. FOURNELA, AND R. DRONNEAU, « USE OF AN IMAGING LUMINANCE MEASURING DEVICE TO EVALUATE ROAD LIGHTING PERFORMANCE AT DIFFERENT ANGLES OF OBSERVATION », IN PROCEEDINGS OF THE 29TH QUADRENNIAL SESSION OF THE CIE, WASHINGTON DC, USA: INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE, JUIN 2019, P. 553-562. DOI: 10.25039/x46.2019.OP75.
- [25] **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, F. FOURNELA, AND R. DRONNEAU, « DYNAMIC GLARE EVALUATION ALONG A ROUTE », IN PROCEEDINGS OF THE 29TH QUADRENNIAL SESSION OF THE CIE, WASHINGTON DC, USA: INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE, JUIN 2019, P. 1586-1594. DOI: 10.25039/x46.2019.PO159.
- [26] E. MENETRIER, P. RICHARD, **V. BOUCHER**, ET C. BOUJON, « USING VIRTUAL REALITY TECHNIQUES TO STUDY COGNITIVE PROCESSES IN CAR DRIVING ACTIVITY », IN PROCEEDINGS OF THE 12TH INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTER VISION, IMAGING AND COMPUTER GRAPHICS THEORY AND APPLICATIONS (VISIGRAPP 2017), PORTO, 2017, P. 138-145. DOI: 10.5220/0006230901380145.
- [27] **V. BOUCHER**, E. DUMONT, F. GREFFIER, F. FOURNELA, AND R. DRONNEAU, « HIGH DYNAMIC RANGE IMAGING LUMINANCE MEASURING DEVICE (HDR-ILMD) AND APPLICATIONS IN MOTION », IN CONFERENCE PROCEEDING BY COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, OCT. 2017, P. 923-932. DOI: 10.25039/x44.2017.PO35.
- [28] F. GREFFIER, P. CHARBONNIER, J.-P. TAREL, **V. BOUCHER**, AND F. FOURNELA, « AN AUTOMATIC SYSTEM FOR MEASURING ROAD AND TUNNEL LIGHTING PERFORMANCE », IN PROCEEDINGS OF 28TH QUADRENNIAL SESSION OF THE CIE, IN INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE., VOL. CIE 216:2015. MANCHESTER, UK, 2015, P. 1647-1646.
- [29] **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, AND F. FOURNELA, « DISABILITY GLARE EVALUATION IN DRIVING CONDITION USING HIGH DYNAMIC RANGE IMAGES », PRESENTE A PROCEEDINGS OF 28TH CIE SESSION, MANCHESTER, UK, JUIN 2015.
- [30] **V. BOUCHER**, M. MARCHETTI, J. DUMOULIN, AND A. CORD, « PATTERN RECOGNITION APPLIED TO INFRARED IMAGES FOR EARLY ALERTS IN FOG », IN PROC. SPIE 9223, REMOTE SENSING SYSTEM ENGINEERING V, SAN DIEGO, AOUT 2014. DOI: 10.1117/12.2061779.
- [31] **V. BOUCHER** AND J. DUMOULIN, « ATMOSPHERIC EFFECTS ON INFRARED MEASUREMENTS AT GROUND LEVEL: APPLICATION TO MONITORING OF TRANSPORT INFRASTRUCTURES », PRESENTE A EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY, VIENNA, 2014.
- [32] D. AUBERT, **V. BOUCHER** ET AL., « DIGITAL IMAGING FOR ASSESSING AND IMPROVING HIGHWAY VISIBILITY », PRESENTE A TRANSPORT RESEARCH ARENA, PARIS, 2014.
- [33] **V. BOUCHER**, J. DUMOULIN, AND M. MARCHETTI, « BENEFIT OF INFRARED IMAGES IN VISIBILITY APPRECIATION FOR FOG CONDITIONS », PRESENTE A EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY, VIENNA, AVR. 2012.
- [34] M. MARCHETTI, **V. BOUCHER**, J. DUMOULIN, A. CORD, AND M. COLOMB, « APPORT ET ANALYSE D'IMAGES INFRAROUGES POUR LA VISIBILITE DANS LE BROUILLARD », PRESENTE A COLLOQUE MESURES ET TECHNIQUES OPTIQUES POUR L'INDUSTRIE, LILLE, 2011.
- [35] N. HAUTIERE, V. LEDOUX, J.-P. TAREL, **V. BOUCHER**, ET P. CHARBONNIER, « OBSERVATION, MODELISATION ET PREDICTION DE LA DEGRADATION TEMPORELLE DES MARQUAGES ROUTIERS », PROJET DIVAS, 2010.
- [36] J. DUMOULIN, **V. BOUCHER**, AND F. GREFFIER, « NUMERICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF ROAD INFRASTRUCTURE PERCEPTION IN FOG AND/OR NIGHT CONDITIONS USING INFRARED AND PHOTOMETRIC VISION SYSTEMS », PRESENTE A PROCEEDINGS OF SPIE OPTICS AND PHOTONICS, SAN DIEGO, AOUT 2009.
- [37] **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, AND F. FOURNELA, « HIGH SPEED ACQUISITION SYSTEM OF PHOTO-COLORIMETRIC IMAGES TO RECORD AND TO MODEL THE HUMAN VISION SIGNAL », PRESENTE A PROCEEDINGS OF SPIE OPTICS AND PHOTONICS, SAN DIEGO, AOUT 2008.
- [38] E. BELIN AND **V. BOUCHER**, « AN IMAGING SYSTEM BASED ON LASER OPTICAL FEEDBACK FOR FOG VISION APPLICATIONS », PRESENTE A PROCEEDINGS OF SPIE OPTICS AND PHOTONICS, SAN DIEGO, AOUT 2008.

- [39] J. DUMOULIN, **V. BOUCHER**, M. MARCHETTI, L. WENDLING, AND M. COLOMB, « ROADWAY PERCEPTION TECHNOLOGY USING THE INFRARED KNOW-HOW », PRESENTE A PROCEEDINGS OF THE FINAL WORKSHOP OF NR2C ORGANISED BY FEHRL, BRUXELLES, BELGIUM, NOV. 2007.
- [40] J. DUMOULIN, **V. BOUCHER**, M. MARCHETTI, AND M. COLOMB, « INFRARED VISION ON ROADS IN FOG AND/OR NIGHT CONDITIONS: EXPERIMENTS IN A FOG TUNNEL AND NUMERICAL SIMULATIONS », PRESENTE A WORKSHOP AITA 2007,(ADVANCED INFRARED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS), MEXICO, NOVEMBRE 2007.
- [41] J. DUMOULIN, **V. BOUCHER**, M. MARCHETTI, AND M. COLOMB, « ENHANCEMENT OF INFRARED VISION FOR DRIVERS BY ACTING ON INFRASTRUCTURE », PRESENTE A WORKSHOP AITA 2007,(ADVANCED INFRARED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS), MEXICO, NOVEMBRE 2007.
- [42] M. COLOMB, F. FOURNELA, **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, P. MORANGE, AND P. BRIAND, « USE OF A CALIBRATED CAMERA TO STUDY VISIBILITY IN FOG », PRESENTE A PROCEEDINGS OF THE 26TH SESSION OF THE CIE, BEIJING, CHINA, JUILL. 2007.

COMMUNICATION ORALE SANS ACTES (COM)

- [43] **V. BOUCHER**, « AN IMAGING TOOL TO MEASURE GLARE DYNAMICALLY », PRESENTE A CIE WORSHOP ON VISION, BERLIN, MAI 2018.
- [44] **V. BOUCHER**, « MESURE DE TEXTURE DE CHAUSSEE PAR POLARIMETRIE », PRESENTE A JOURNEE SCIENTIFIQUE DU SCIAM (SERVICE COMMUN D'IMAGERIES ET D'ANALYSES MICROSCOPIQUES, ANGERS, AVRIL 2011.
- [45] **V. BOUCHER** ET S. GAYMARD, « VISIBILITE ET REPRESENTATION SOCIALE : COMMENT PREVENIR LA VULNERABILITE DU PIETON ? », PRESENTE A JOURNEE D'ETUDE SECURITE ROUTIERE : EDUCATION ET PREVENTION, CPER10, UNIVERSITE D'ANGERS, MSH, LABORATOIRE DE PSYCHOLOGIE, 2009.
- [46] **V. BOUCHER**, F. FOURNELA, F. GREFFIER, S. GAYMARD, V. NZOBOUNSANA, ET T. AGBOTSOKA, « VISIBILITE PSYCHOPHYSIQUE DES PIETONS DANS L'ENVIRONNEMENT ROUTIER », PRESENTE A 2EME COLLOQUE DE LA PFI COPIE, LYON, NOVEMBRE 2009.
- [47] E. BELIN ET **V. BOUCHER**, « SYSTEME D'IMAGERIE LASER POUR LA VISION EN MILIEU DIFFUSANT », PRESENTE A JOURNEES IMAGERIE OPTIQUE NON CONVENTIONNELLE, PARIS, MARS 2006.
- [48] F. TAILLADE ET **V. BOUCHER**, « IMAGERIE EN MILIEU DIFFUSANT », PRESENTE A JOURNEES TECHNIQUES ROUTE, NANTES, 2005.
- [49] **V. BOUCHER**, E. BELIN, O. HUGON, C. FELIX, ET E. LACOT, « LA METHODE LOFI APPLIQUEE A LA DETECTION D'OBJET DANS LE BROUILLARD », PRESENTE A ECOLE D'ETE 'IMAGERIE ET INFORMATION', LES HOUCHES, 2004.

OUVRAGE SCIENTIFIQUE OU CHAPITRE (OS)

- [50] **V. BOUCHER**, P. RICHARD, ET K. PITARD, « LA PERCEPTION DU CONDUCTEUR : MESURE ET MODELISATION », IN SECURITE DES DEPLACEMENTS, PROTECTION DES USAGERS ET DE L'ENVIRONNEMENT, L'HARMATTAN.IN MAITRISE DES RISQUES ET PREVENTION, NO. 1. PARIS, 2015.
- [51] S. GAYMARD, **V. BOUCHER**, V. NZOBOUNSANA, F. GREFFIER, ET F. FOURNELA, « LA PERCEPTION DES PIETONS PAR LES CONDUCTEURS: CORRELATIONS ENTRE LES DONNEES D'UN ŒIL ELECTRONIQUE ET LE VERBATIM DES CONDUCTEURS. », CAN. J. BEHAV. SCI. REV. CAN. SCI. COMPORT., VOL. 45, NO 2, P. 124-137, AVR. 2013, DOI: 10.1037/A0025789.

CONFERENCE INVITEE DANS UN CONGRES INTERNATIONAL (INV)

- [52] **V. BOUCHER**, « CAMERA CALIBRATION : USING A CAMERA AS A MEASUREMENT TOOL. », PRESENTE A INTERNATIONAL PLANT PHENOTYPING NETWORK, AFFORDABLE PHENOTYPING WORKSHOP, ANGERS, 2021.
- [53] **V. BOUCHER**, « DYNAMIC USE OF AN HDR-ILMD TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF TUNNEL LIGHTING INSTALLATIONS », PRESENTE A OLTUTA 2019, OLDENBURG, 2019.

BREVET (BRV)

- [54] **V. BOUCHER** ET F. GREFFIER, « SYSTEME DE GESTION D'UNE INSTALLATION D'ECLAIRAGE ADAPTATIF ET PROCEDE CORRESPONDANT. », N°FR2109188., 2021
- [55] LATECOERE, « DISPOSITIF ACTIF D'OBSERVATION D'UNE SCENE A TRAVERS UN MILIEU DIFFUSANT, UTILISATION DE CE DISPOSITIF ET PROCEDE D'OBSERVATION », FR2969455, 2012

RAPPORT DE RECHERCHE (RAPP)

- [56] **V. BOUCHER**, « DETECTION DE PARTICULES FINES PAR LIDAR », DEC. 2014.
- [57] F. GREFFIER ET **V. BOUCHER**, « EVALUATION DE DESCRIPTEURS PHYSIQUES DANS UNE SCENE ROUTIERE. », 2013.
- [58] **V. BOUCHER**, « DEVELOPPEMENT D'UN LIDAR POUR MESURER LA POLLUTION DUE AU TRAFIC ROUTIER », DEC. 2012.
- [59] F. GREFFIER ET **V. BOUCHER**, « DESCRIPTION PHYSIQUE D'UNE SCENE VISUELLE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET INVENTAIRE D'OUTILS DE MODELISATION », 2011.

- [60] **V. BOUCHER**, F. GREFFIER, C. LE BASTARD, ET F. BOSC, « ETAT DE L'ART DES MESURES DE POLLUTION ET DE TRAFIC PAR CAPTEUR LASER », DEC. 2010.
- [61] **V. BOUCHER** ET F. GREFFIER, « PERTES DE VISUALISATION PAR TEMPS DE PLUIE : PROCESSUS EXPERIMENTAL », DEC. 2010.
- [62] F. FOURNELA, F. GREFFIER, ET **V. BOUCHER**, « PERTE DE VISUALISATION DES ELEMENTS DE LA CHAUSSEE EN CONDITIONS METEOROLOGIQUES DEGRADEES », DEC. 2009.
- [63] **V. BOUCHER** ET O. JAQUIN, « CONDITIONS METEO DEGRADEES & IMAGERIE PAR REINJECTION LASER », DEC. 2009.
- [64] **V. BOUCHER**, « MESURES DE SURFACE PAR LUMIERE POLARISEE », DEC. 2009.
- [65] **V. BOUCHER**, « DETECTION DU BROUILLARD PAR RETROINJECTION OPTIQUE », DEC. 2009.
- [66] **V. BOUCHER**, « APPLICATIONS DE LA POLARIMETRIE », DEC. 2009.
- [67] **V. BOUCHER** ET F. CHATELAIN, « MESURES DE MICROTXTURE DE CHAUSSEE PAR IMAGERIE POLARIMETRIQUE », DEC. 2008.
- [68] **V. BOUCHER**, « PROBLEMATIQUE DE LA MESURE INFRAROUGE PAR TEMPS DE PLUIE », DEC. 2008.
- [69] **V. BOUCHER** ET AL., « ETUDE COMPARATIVE DE DIFFERENTES TECHNOLOGIES POUR LA VISION DANS LE BROUILLARD : INFRAROUGE BANDE III, INFRAROUGE BANDE II, IMAGERIE ACTIVE A 800NM ET VISION PASSIVE PAR CAMERA PHOTOPIQUE », 2007.
- [70] **V. BOUCHER** ET S. CEDRATI, « DEVELOPPEMENT D'UN IMAGEUR POLARIMETRIQUE & APPLICATIONS », DEC. 2007.
- [71] **V. BOUCHER** ET E. BELIN, « SENSIBILITE DU SYSTEME D'IMAGERIE EN MILIEU DIFFUSANT PAR RETRO-INJECTION LASER », DEC. 2007.
- [72] F. CHRISTNACHER, **V. BOUCHER**, « AMELIORATION DE LA VISIBILITE A TRAVERS LES BROUILLARDS : APPORT DE L'IMAGERIE ACTIVE », JANV. 2006.
- [73] **V. BOUCHER** ET S. CEDRATI, « ETUDE D'UN IMAGEUR POLARIMETRIQUE », DEC. 2006.
- [74] **V. BOUCHER** ET E. BELIN, « DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'IMAGERIE PAR REINJECTION LASER », DEC. 2006.
- [75] **V. BOUCHER**, « SCATTERING IN FOG AND SCENE SIMULATION », DEC. 2006.
- [76] **V. BOUCHER** ET E. BELIN, « DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'IMAGERIE PAR REINJECTION LASER », DEC. 2005.
- [77] **V. BOUCHER**, « DIFFUSION DANS LE BROUILLARD », DEC. 2005.
- [78] **V. BOUCHER** ET E. BELIN, « REINJECTION LASER : APPLICATION A L'IMAGERIE EN MILIEU DIFFUSANT », DEC. 2004.
- [79] **V. BOUCHER** ET E. BELIN, « LA METHODE LOFI APPLIQUEE A LA DETECTION D'OBJET DANS LE BROUILLARD », AVR. 2004.
- [80] **V. BOUCHER**, « PROPAGATION DES ONDES LUMINEUSES DANS L'ATMOSPHERE », FEVR. 2004.
- [81] **V. BOUCHER**, « AVANCEMENT DE TOTEM VISIBILITE TOUS TEMPS », DEC. 2004.
- [82] **V. BOUCHER**, « L'IMAGERIE EN INFRAROUGE LOINTAIN », FEVR. 2003.
- [83] E. BELIN, « UTILISATION DE NOUVELLES TECHNIQUES D'IMAGERIE POUR LA VISION EN MILIEUX DIFFUSANTS », THESE UNIVERSITE D'ANGERS, 2008.
- [84] F. GREFFIER, « MESURES PHOTOMETRIQUES ET COLORIMETRIQUES EN CONDITIONS DYNAMIQUES PAR IMAGERIE HDR. APPLICATION A L'OPTIMISATION DES INSTALLATIONS D'ECLAIRAGE ROUTIER. », THESE UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL, CHAMPS/MARNE, 2022.
- [85] L. LEBouc, « SIMULATION, EVALUATION ET OPTIMISATION DE LA LISIBILITE NOCTURNE DES AMENAGEMENTS URBAINS : PRISE EN COMPTE DES PROPRIETES DE REFLEXION DE LA LUMIERE PAR LES REVETEMENTS POUR UN ECLAIRAGE ADAPTE AUX DIFFERENTS USAGERS DE L'ESPACE PUBLIC. », THESE UNIVERSITE D'ANGERS, 2023.
- [86] K. XU, « SIMULATION NUMERIQUE A PARTIR DE LA GEOMETRIE 3D ET D'UN GONIREFLECTOMETRE VIRTUEL », THESE UNIVERSITE DE POITIERS, EN COURS.

Titre : Étude de la propagation optique appliquée à la visibilité routière. La quête du contraste.

Mots clés : systèmes d'imagerie, infrarouge, réinjection laser, polarimétrie, éclairage routier.

Résumé : En conditions diurnes ou nocturnes, utilisation de longueurs d'ondes au-delà du spectre visible, détection sélective des photons n'ayant pas été diffusés ou encore détection de l'information adéquate pour percevoir son environnement, ajuster sa trajectoire, repérer la signalisation ou détecter un obstacle potentiel. Au cours de nos déplacements, notre système visuel capte, analyse et traite de nombreuses informations permettant d'agir en conséquence. Quelle que soit l'information perçue, celle-ci réside toujours dans la détection d'un objet par rapport à son voisinage. C'est vraisemblablement pour cela que notre système visuel est « câblé » pour détecter des contrastes. Aussi, pour répondre au besoin de disposer d'un contraste suffisant à tout moment et dans n'importe quelle condition, deux voies d'exploration sont exposées. La première consiste à substituer à l'œil, un système d'imagerie capable de surpasser les capacités visuelles :

visible, détection sélective des photons n'ayant pas été diffusés ou encore détection de la polarisation de la lumière. La seconde voie réside dans la modélisation des capacités de l'œil et l'amélioration du contraste en optimisant l'infrastructure et l'éclairage. Pour ce faire, il est nécessaire de savoir ce que l'œil voit et comment ces informations sont interprétées. Il s'agit alors de reproduire sa capacité à détecter des contrastes (modèle de visibilité) et à quantifier ses limites (modèles d'éblouissement et d'adaptation visuelle). Une fois les données physiques et les modèles à disposition, il devient possible d'étudier l'influence d'un éclairage, d'une géométrie particulière, d'un revêtement sur le contraste perçu et par conséquent d'optimiser tous les éléments contribuant à une bonne perception visuelle.

Title : Study of optical propagation applied to road visibility. The quest for contrast.

Keywords : imaging systems, infrared, laser feedback, polarimetry, road lighting.

Abstract : At day or at night, moving on a road requires adequate information to perceive the environment, adjust one's trajectory, spot signs or detect a potential obstacle. During travels, our visual system captures, analyses and processes a lot of information allowing us to act accordingly. Whatever the information perceived, it always resides in the detection of an object in relation to its surroundings. This is probably why our visual system is "wired" to detect contrasts. Also, to meet the need for sufficient contrast at any time and in any condition, two ways of exploration are exposed. The first way is to replace the eye by an imaging system capable of surpassing the visual capabilities: using wavelengths beyond the

selective detection of unscattered photons or measurement of light polarization. The second way is to model the eye's capabilities and improve contrast by optimizing the infrastructure and lighting. To do this, it is necessary to know what the eye sees and how this information is interpreted. This involves reproducing its ability to detect contrast (visibility model) and quantifying its limitations (glare and visual adaptation models). Once the physical data and the models are available, it becomes possible to study the influence of a lighting, a particular geometry, a pavement on the perceived contrast and consequently to optimize all the elements contributing to a good visual perception.