

# Contribution à la détection " d'objets cachés ": vision à travers les milieux diffusants, contrôles non destructifs des structures

Frédéric Taillade

#### ► To cite this version:

Frédéric Taillade. Contribution à la détection " d'objets cachés ": vision à travers les milieux diffusants, contrôles non destructifs des structures. Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010. tel-00658679

## HAL Id: tel-00658679 https://theses.hal.science/tel-00658679

Submitted on 10 Jan2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Ecole Normale Supérieure de Cachan

Ecole Doctorale Sciences Pratiques (ED 285)

Domaine : Sciences de l'Ingénieur

#### Contribution à la détection « d'objets cachés » : vision à travers les milieux diffusants contrôles non destructifs des structures

Synthèse de l'activité scientifique

présentée par

#### Frédéric Taillade

pour obtenir

### le diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches

Travaux présentés le 23 novembre 2010 devant le jury composé de :

M. Bernard Dubuisson	(Rapporteur)
M. Patrick Juncar	(Rapporteur)
M. François Goudail	(Rapporteur)
M. Pierre Jacquot	
M. Frédéric Bourquin	
M. Dominique Placko	(Garant)

### Résumé

Ce document décrit une partie de mes travaux de recherche effectué entre 2002 et 2010 au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées dans les domaines de la sécurité routière et des ouvrages d'art.

Le premier domaine concerne la vision à travers les milieux diffusants. L'objectif est de proposer des dispositifs de surveillance du réseau routier ou d'aide à la conduite en situations météorologiques dégradées (pluie, neige, brouillard, fumée, etc.). Je présente les phénomènes physiques limitant la vision dans le brouillard et des dispositifs permettant de répondre à cette problématique.

Le second domaine traite de l'auscultation des structures d'ouvrages d'art par des techniques non destructives. Deux exemples sont présentés, l'un tiré des travaux sur l'auscultation des composites collés en surface du béton et l'autre concernant l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure.

Pour chacun des sujets, je présente les dispositifs et les méthodes mis en œuvre. Les résultats de modélisation numériques sont comparés aux mesures expérimentales.

Mots clés : instrumentation, physique, contrôle non destructif, imagerie, milieu diffusant, shearographie, thermographie infrarouge.

#### Abstract

This document describes a part of my research works carried out from 2002 to 2010 at the LCPC in road safety and civil engineering structures domains.

The first domain is the vision through scattering media. The goal is to provide monitoring devices or road driving assistance in degraded weather conditions (rain, snow, fog, smoke, etc..). I present the physical phenomena limiting the vision mechanisms in the fog and the devices for responding to this problem.

The second domain deals with auscultation of the civil engineering structures by nondestructive techniques. Two examples are presented, one from work on auscultation of composite bonded on the surface of concrete and the other on auscultation of external post-tensioned ducts.

For each subject, I present devices and methods developed and implemented. The results of numerical modeling are compared to the experimental measurements.

Keywords : instrumentation, physics, nondestructive testing, imaging, scattering medium, shearography, infrared thermography.

## Table des matières

$\mathbf{L}^{\mathrm{i}}$	iste	des fi	gures	V
$\mathbf{L}\mathbf{i}$	iste	des ta	ableaux	vii
S	$\mathbf{ynth}$	èse d	es travaux scientifiques	1
1	$\mathbf{Intr}$	oduct	on générale	3
Ι	Im	ageri	e dans les milieux diffusants	5
<b>2</b>	$\mathbf{Intr}$	oduct	on	7
3	Eta	t de l'a	art des dispositifs d'aide à la conduite	9
4	Etu 4.1 4.2 4.3	<b>de thé</b> Modèl Valida Etude	orique de la diffusion de la lumière    e analytique de luminance    tion	<b>13</b> 13 14 15
<b>5</b>	$\mathbf{Les}$	différe	entes solutions envisagées	19
	5.1	La tor 5.1.1 5.1.2 5.1.3	nographie par cohérence optique	19 19 21 23
	5.2	Le cré 5.2.1 5.2.2 5.2.3 5.2.4	nelage temporel	25 25 26 28 28
	5.3	5.2.4 La mé 5.3.1 5.3.2	thode spectrale     Principe     Résultats expérimentaux	28 29 29 31
6	Con	clusio	n	35

Π	$\mathbf{C}$	ontrôle non destructif et de santé des structures	37	
7	Intr	oduction	39	
8	Diagnostic du collage des composites sur le béton			
	8.1	Introduction	41	
	8.2	Rappels des principaux résultats de thèse	43	
	8.3	Application au domaine du génie civil	43	
	8.4	Mise en œuvre de la shearographie	44	
		8.4.1 Rappels	44	
		8.4.2 Développement et caractérisation	45	
		8.4.3 Diagnostic par shearographie	48	
		8.4.4 Simulation de la déformation d'une surface sollicitée par dépression	49	
		8.4.5 Eprouvettes de laboratoire	52	
		8.4.6 Résultats de mesure par shearographie et dépression	52	
	8.5	Mise en œuvre de la thermographie infrarouge pulsée	54	
		8.5.1 Rappels	56	
		8.5.2 Simulation de la réponse thermique	59	
		8.5.3 Eprouvettes de laboratoire	59	
		8.5.4 Résultats de mesure par thermographie	59	
	8.6	Conclusions et perspectives	61	
9	Diag	gnostic des conduits de précontrainte extérieure	67	
	9.1	Introduction	67	
	9.2	Principe de la sonde capacitive	69	
	9.3	Modélisation électromagnétique de la sonde	70	
		9.3.1 Modèle analytique	70	
		9.3.2 Modèle éléments finis	70	
		9.3.3 Une autre approche : modèle « DPSM »	71	
	9.4	Caractérisation de la sonde capacitive	72	
		9.4.1 Sensibilité en fonction de la permittivité relative	72	
		9.4.2 Sensibilité spatiale	73	
		9.4.3 Etalonnage	74	
		9.4.4 Qualification métrologique de la sonde	75	
	9.5	Mesure de la permittivité relative des matériaux	75	
	9.6	Comparaisons modélisation - mesure	77	
		9.6.1 Eprouvette de laboratoire	77	
		9.6.2 Auscultation en vraie grandeur sur un ouvrage d'art	79	
		9.6.3 Méthode d'estimation de l'épaisseur d'air	80	
	9.7	Conclusion	85	
10	Con	clusion	87	

#### 11 Bilan

## Bibliographie

A	nnez	xes		97
$\mathbf{A}$	Cur	riculu	m Vitae	101
	A.1	Civilit	é	. 101
	A.2	Expéri	iences professionnelles	. 101
	A.3	Forma	tion $\ldots$	. 102
	A.4	Comp	étences	. 102
в	Act	ivités d	de recherche	103
	B.1	Public	ations	. 103
		B.1.1	Brevets	. 103
		B.1.2	Articles dans des revues à comité de lecture	. 103
		B.1.3	Livres et Chapitres de livres	. 104
		B.1.4	Actes de congrès internationaux	. 104
		B.1.5	Actes de congrès nationaux	. 106
		B.1.6	Articles dans des revues technico-professionnelles	. 107
		B.1.7	Autres communications	. 107
	B.2	Encad	rements Scientifiques	. 108
		B.2.1	Encadrement de chercheurs	. 108
		B.2.2	Animation d'équipe	. 109
	B.3	Contra	ats de recherche - Collaborations	. 110
		B.3.1	Projet européen	. 110
		B.3.2	Projets nationaux	. 110
		B.3.3	Collaborations scientifiques	. 110
	B.4	Valoris	sations	. 111
		B.4.1	Expertises	. 111
		B.4.2	Développements	. 111
$\mathbf{C}$	Prir	ncipale	s Publications	113

91

iii

## Table des figures

2.1	Schéma de principe de la propagation de la lumière au travers d'un milieu diffusant	8
3.1	Exemple de dispositifs d'aide à la conduite	10
4.1	Schéma d'une source éclairant une tranche de brouillard et d'un récepteur visant une portion de cette tranche	14
4.2	Rapport signal sur bruit en fonction du rapport $D/V_m$ obtenu à partir de mesures expérimentales (•), PROF-LCPC (—) et avec le modèle analytique	15
4.3	Variation des coefficients d'extinction et de rétrodiffusion en fonction de la longueur d'onde pour trois granulométries de brouillard	10
4.4	Variation du rapport signal sur bruit en fonction de la densité optique du brouillard pour trois granulométries de brouillard (FIG. 4.3.a), calculée à deux longueurs d'ondes $\lambda = 0.5 \ \mu m \ (-) \ et \ \lambda = 10.6 \ \mu m \ ()$ .	17
4.5	Variation du rapport $\mu_E/\mu_B$ en fonction de la longueur d'onde pour trois granulométries de brouillard (FIG. 4.3.a).	18
5.1	Principe de la tomographie par cohérence optique classique : $(S)$ source lumineuse, $(M)$ miroir, $(CS)$ cube séparateur, $(D)$ détecteur, $(Obj)$ objet, $(MD)$ milieu diffusant, $(O_O)$ onde objet, $(O_B)$ onde rétrodiffusée par le milieu diffusant, $(O_D)$ onde de référence	20
5.2	Principe de la tomographie par cohérence optique utilisant un cristal pho- toréfractif : (PRC) cristal photo-réfractif.	21
5.3	Principe de la tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photo- réfractif : méthode de lecture des hologrammes	22
5.4	Montage de laboratoire d'une caméra à tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif.	23
$5.5 \\ 5.6$	Images de l'objet test ayant un rapport signal sur bruit de $-6  dB.  \ldots  \ldots$ Evolution du rapport signal sur bruit pendant la phase de lecture de l'holo-	24
57	gramme	25 26
5.8	Sustème d'imagerie active	$\frac{20}{97}$
5.9	Schéma de la chambre de brouillard du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand	21 20
5.10	Distribution des diamètres de gouttelettes formant le brouillard pour 3 dis- tances de visibilité météorologique et modèle granulométrique utilisé dans	20
	les simulations.	29

5.11	Résultats de vision active à crénelage temporel à trois distances de visibilité (de gauche à droite 12, 16 et 22 m).	30
5.12	$Disposition du laser CO_2$ et de la caméra thermique dans la chambre de browillard	20
F 19	D'outiliara.	ა∠ ეე
5.13		33
0.14		กก
	active infrarouge en fonction de la visibilite meteorologique	33
8.1	Exemples de mise en oeuvre de renforcement composite sur ouvrage.	42
8.2	Inspection au marteau sur ouvrage d'art (Viaduc de Toutru A6)	42
8.3	Schéma de principe d'un interféromètre de shearoaraphie	44
8.4	Définition des vecteurs sensibilités et dénlacements	45
8.5	Interféromètre de shearoaranhie du LCPC	46
8.6	Fenêtres du logiciel ISA 9	47
8.7	Estimation expérimentale de l'incertitude de mesure de la différence de phase $\Delta \varphi$ à partir de l'histogramme des valeurs de phase prises par chaque	- 1
	<i>pixels</i>	48
8.8	Géométrie du problème	50
8.9	Résultat d'un calcul par éléments finis dans le cas d'un défaut de diamètre	
	40 mm et pour une dépression de 100 Pa	51
8.10	Evolution de la dépression nécessaire à produire un contraste de $25 \times 10^{-6}$	
	en fonction du diamètre du défaut recherché	52
8.11	Schémas des éprouvettes de béton renforcées par du tissu	53
8.12	Mise en œuvre de la shearographie dans le cas d'une sollicitation par dé-	
	pression.	53
8.13	Schémas des éprouvettes de béton renforcées par du tissu	54
8.14	Evolution de la dépression nécessaire à produire un contraste de $25 \times 10^{-6}$ en fonction du diamètre du défaut recherché : comparaison calculs - mesures.	55
8.15	Evolution de la dépression nécessaire à produire un contraste de $25 \times 10^{-6}$	
	en fonction de la qualité de collage.	55
8.16	Thermogramme au droit de deux zones, l'une saine, l'autre avec un défaut.	56
8.17	Variation du nombre de Fourier $F_0$ en fonction du nombre de Fourier ca-	
	ractéristique de la durée d'impulsion $F_{0\tau}$	58
8.18	Géométrie du problème	58
8.19	Thermogrammes et contraste thermiques calculés pour trois cas de diamètre	
	de défaut de collage	60
8.20	Eprouvette de béton renforcée par des plats de composite	61
8.21	Image thermique enregistrée 40 s après la fin de la période de chauffage	62
8.22	Température de surface et contraste thermique en fonction du temps enre-	
	gistrés au droit des défauts de diamètres 30 mm se situant à trois profon-	
	deurs différentes : 1, 2, 3, 4 et 5, 6 mm. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	63
8.23	Estimation itérative de la profondeur des défauts.	64
8.24	Inspection d'un ouvrage renforcé par du composite en utilisant un dispositif	
	de shearographie portable	64
8.25	Exemple de défauts détectés.	65
0 1		<u> </u>
9.1	Exemple de précontrainte extérieure	67

9.2	Sonde capacitive.	69
9.3	Schéma de principe de la sonde capacitive.	69
9.4	Approximation de la sonde capacitive	70
9.5	Concept de modélisation par DPSM : cas d'une réfraction d'onde	72
9.6	Modélisation de la variation de capacité et de sa dérivée calculée avec le modèle analutique et par éléments finis en fonction de la permittivité élec-	
	trique du matériau inséré dans le conduit.	73
9.7	Sensibilité spatiale du capteur capacitif pour un matériau de remplissage de	
	permittivité moyenne égale à $\varepsilon_M^1 = 5.$	74
9.8	Courbe d'étalonnage de la sonde capacitive	75
9.9	Banc de mesure des caractéristiques électriques d'échantillons	77
9.10	Mesure de la permittivité relative des matériaux	78
9.11	Schéma de l'éprouvette de laboratoire représentant un conduit de précon-	
	trainte extérieure; à droite, la section du conduit à l'abcsisse $x = 265 mm$ .	79
9.12	Comparaison des résultats de mesures et calculés de la variation de capacité	
	en fonction de l'angle mesurée à l'abcsisse $x = 265 mm$	80
9.13	Auscultation d'un conduit sur site.	81
9.14	Modèle géométrique d'une section d'un conduit.	82
9.15	Simulation de la capacité en fonction de $\theta$ pour 4 matériaux de permittivité relative	83
0.16	$V_{\text{emission}} d_{\alpha} l'_{\text{formation}} d'_{\alpha \text{in}} a_{\alpha} f_{\alpha} f_{\alpha} d_{\alpha} l_{\alpha} l_{\alpha}$	00
9.10	variation de l'épsisseur d'air è ponction de la largeur à mi nauteur $\Delta \theta$ .	04
9.17	Estimation de l'épaisseur à dir à partir de mésures angulaires oblenues avec	01
		-04

## Liste des tableaux

4.1	Distance de visibilité pour différents domaines spectraux et pour trois gra- nulométries de brouillard (FIG. 4.3.a)	17
8.1	Propriétés mécaniques des différents matériaux, où $E$ représente le module d'Young et $\nu$ le coefficient de Poisson.	50
8.2	Propriétés thermiques des matériaux utilisés	59
9.1	Bilan d'incertitude sur la mesure de fréquence	76

## Synthèse des travaux scientifiques

## Chapitre 1 Introduction générale

Ce document décrit une partie de mes travaux scientifiques effectués au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) entre 2002 et 2010. Ils traitent de détection, d'identification et de caractérisation des objets (ou appelés défauts dans certains contextes) au sein d'un milieu ou d'un matériau. Ce milieu ou ce matériau ont des propriétés telles que les objets ne peuvent être « vus » de manière directe. C'est par exemple le cas pour l'endommagement des structures composites (délaminages, défauts de collage) ou bien évidemment lorsqu'il s'agit de vision en milieu diffusant.

Je me suis attaché à présenter plus particulièrement mes travaux relevant de l'imagerie dans le brouillard dans le cadre de la sécurité routière et de ceux traitant du contrôle de santé des structures de génie civil.

L'ensemble de mes travaux repose sur la physique et l'instrumentation. Pour les premiers d'entres eux, ils nécessitent la mise en œuvre de modélisation reposant sur l'optique ondulatoire et la radiométrie. Tandis que les seconds sont régis par des équations aux dérivées partielles qu'il convient de résoudre afin d'approcher une solution numérique.

A cette étape de modélisation, nécessaire à la compréhension du problème dans son ensemble, ma démarche scientifique passe toujours par une étape expérimentale appliquée à des problèmes industriels. Ces deux approches me paraissent indissociables pour répondre aux besoins de détections et de caractérisations qui nous sont posés.

Malgré mon souci de synthèse, il est apparu cependant inévitable de séparer ce manuscrit en deux parties distinctes relatives aux deux thèmes mentionnés précédemment. La première partie traite de l'imagerie à travers le brouillard pour des applications de surveillance du réseau routier ou d'aide à la conduite. Après avoir présenté la problématique dans un premier chapitre, le deuxième dresse un état de l'art des dispositifs commerciaux permettant d'intégrer la fonction d'assistance à la conduite. Le principe de chacun des dispositifs ainsi qu'un bilan des avantages et des inconvénients est présenté. Le troisième chapitre se focalise sur la modélisation des phénomènes physiques limitant la vision en présence de brouillard. Enfin, le quatrième chapitre présente les solutions développées au LCPC ou ayant fait l'objet d'essais en partenariat avec d'autres établissements disposant de la technologie.

La seconde partie traite du contrôle de santé des structures de génie civil à travers deux exemples concernant d'une part le diagnostic du collage de fibres de carbone sur le béton par shearographie et thermographie infrarouge et d'autre part de l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure par sonde capacitive. Après une introduction du contrôle de santé des structures, je rappelle brièvement mes travaux de thèse qui ont influencés mes travaux entrepris par la suite. Pour chacun des exemples choisis, je présente la problématique, le principe des dispositifs et la méthode mise en œuvre. Des simulations numériques montrent ensuite la faisabilité de détection des défauts. Puis enfin, des mesures expérimentales sont présentées et comparées aux résultats numériques.

## Première partie Imagerie dans les milieux diffusants

## Chapitre 2

## Introduction

L'objectif de ces travaux est de proposer des dispositifs en vue de la surveillance du réseau routier ou d'aide à la conduite en situations météorologiques dégradées (pluie, neige, brouillard, fumée, etc.).

L'amélioration de la vision dans ces situations accidentogènes reste un problème difficile à traiter. A notre connaissance, malgré de nombreux travaux menés à la fois par les équipementiers automobiles, aéronautiques et les laboratoires de recherche, il n'existe pas de véritables dispositifs d'aide à la conduite adaptés.

Jusqu'à présent, les travaux de recherches, menés notamment au LCPC, se sont intéressés à la caractérisation et à la simulation du brouillard [1], à la détection [2] ou au développement d'algorithmes de traitement du signal afin de rehausser le contraste [3] des images lorsque c'est possible. On trouve également de nombreux travaux portant sur des systèmes d'imagerie active utilisant le crénelage temporel [4, 5, 6], etc. qui sera détaillé dans cette partie.

Pour comprendre le mécanisme réduisant la visibilité, il faut analyser la propagation d'une impulsion lumineuse envoyée à l'entrée d'un milieu diffusant (FIG. 2.1). Quelques photons traversent le milieu sans interagir avec celui-ci. On les appelle les *photons balistiques*. Une quantité de photons un peu plus importante que les précédents, traversent le milieu en suivant plus où moins le trajet des photons balistiques. On les appelle les *photons serpentiles*. Enfin les plus nombreux, appelés *photons diffusés* interagissent avec les particules composant le milieu diffusant. Leur propagation est aléatoire dans l'espace. Selon les propriétés des particules et de la longueur d'onde, on peut connaître la probabilité de répartition angulaire de la lumière (fonction de phase issue de la théorie de la diffusion de la lumière). Dans certain cas, une proportion non négligeable de photons est diffusée vers l'arrière, c'est-à-dire que la lumière rebrousse chemin donnant naissance à un voile lumineux. C'est principalement ce phénomène qui limite la visibilité.

Autrement dit, le brouillard a deux effets macroscopiques sur la propagation de la lumière. D'une part, la lumière est atténuée en transmission : c'est l'*effet d'extinction*. D'autre part, si nous considérons le cas où le brouillard est illuminé, comme par les phares avant d'un véhicule, une partie de la lumière est redirigée vers la direction incidente : c'est l'*effet de rétrodiffusion*. La combinaison de ces deux effets contribue à réduire le contraste des objets dans la scène de brouillard. Ainsi, pour un capteur, comme l'œil



FIGURE 2.1 – Schéma de principe de la propagation de la lumière au travers d'un milieu diffusant.

humain ou une caméra, la distinction entre l'information (luminance apparente des objets dans la scène) et le bruit (luminance rétrodiffusée par le brouillard) devient très difficile. Pour pallier cette baisse de contraste, il est donc nécessaire d'éliminer la rétrodiffusion de la prise d'image.

Après avoir présenté brièvement la problématique, nous présenterons un état de l'art des dispositifs d'aide à la conduite actuellement commercialisés. Nous donnerons un aperçu de leur principe de fonctionnement, leurs performances et leurs limites pour notre application. Le second chapitre sera consacré à une étude théorique de la rétrodiffusion de la lumière par le brouillard du point de vue luminance et du point de vue des propriétés spectrales. Le troisième chapitre traitera des différentes solutions envisagées pour voir à travers le brouillard. Le principe de chacun des dispositifs sera présenté et leurs performances comparés en termes de gain sur la distance de visibilité par rapport à la vision humaine.

## Chapitre 3

# Etat de l'art des dispositifs d'aide à la conduite

Afin d'améliorer le confort de conduite et de diminuer les risques d'accident par collision, divers dispositifs d'aide à la conduite ont commencé à voir le jour. Nous pouvons les séparer en deux grandes familles, à savoir les systèmes passifs et les systèmes actifs.

Les systèmes actifs sont des dispositifs de type RADAR, LIDAR (FIG. 3.1). Le principe de base de ces capteurs consiste à émettre un signal électromagnétique en direction de la scène à caractériser et à analyser l'écho en retour. L'émission peut se faire soit dans une seule direction, avec un balayage optomécanique, soit avec des faisceaux multiples. Ces capteurs délivrent principalement deux types d'information : la distance des obstacles et leur vitesse relative par rapport au capteur. Ils sont surtout utilisés comme régulateurs automatiques de vitesse.

Il existe actuellement des radars d'aide à la conduite sur les modèles haut de gamme de certains constructeurs. Ces radars connus sous l'acronyme ACC (Adaptive Cruise Control) sont développés par des équipementiers automobiles comme TRW Automotive (FIG. 3.1.a), BOSH, etc. Le radar détecte les obstacles et revoie les informations (vitesse et distance relatives entre les deux véhicules) à un calculateur embarqué qui, à partir de ces informations, régule la vitesse propre du véhicule afin de maintenir constante la distance avec le véhicule qui le précède.

Bien que les radars soient beaucoup moins sensibles aux conditions météorologiques (pluie, brouillard,...) que les capteurs optiques, ils présentent plusieurs limites :

- faible résolution latérale : les radars automobiles ont généralement des champs angulaires très faibles (quelques degrés seulement), ce qui les rend inopérants pour la détection de véhicules dans d'autres voies ou dans le cas d'une route sinueuse,
- les radars actuels sont conçus pour fonctionner sur des distances de plusieurs dizaines de mètres, et ne sont pas performants à faible distance (quelques mètres),
- très forte variation de la SER (Surface Equivalente Radar) d'un véhicule à un autre : par son principe même, le radar détecte avec difficulté les cibles de faible SER comme les piétons et les deux roues (amplitude du signal faible),
- présence d'échos multiples en environnement complexe due à la largeur du lobe radar et de la faible résolution angulaire,



FIGURE 3.1 – Exemple de dispositifs d'aide à la conduite.

- coût trop élevé par rapport à la prestation (le radar AC10 est proposé à 2500 €).

Le lidar est une transposition du radar au domaine optique, l'émetteur hyperfréquence étant remplacé typiquement par un laser. Un capteur lidar est constitué d'un émetteur, d'une optique de réception, ainsi que d'un système électronique d'analyse. Il mesure le temps de vol mis par la lumière pour parcourir le trajet aller et retour entre le capteur et le véhicule qui le précède, à partir duquel est évaluée la distance du véhicule « cible ». Une maquette de détection utilisant une technologie lidar à balayage (laserscan) a été développée dans le cadre du projet européen OLMO, 1999 (On-vehicle Laser Microsystem for Obstacle detection) (FIG. 3.1.b).

Certains équipementiers ont également choisi de développer des capteurs lidars au lieu de capteurs radars, notamment Siemens VDO. Le capteur lidar, mis au point par Siemens VDO, est un dispositif à faisceaux multiples constitué de cinq émetteurs infrarouges pour détecter les véhicules jusqu'à une distance de 250 m par bonne visibilité.

Les lidars sont des capteurs peu onéreux comparés aux radars, mais qu'ils soient à faisceaux multiples ou à balayage, ils présentent également des inconvénients :

- performance très dégradée dans des conditions météorologiques défavorables : le lidar n'a normalement aucune aptitude à fonctionner dans le brouillard, les fortes pluies, et les chutes de neige, ce qui en diminue très sensiblement l'intérêt; par exemple, le dispositif commercialisé sur la Lexus LS430 s'interrompt automatiquement dès que les conditions météorologiques deviennent défavorables, c'est à dire dès que le besoin du système se fait le plus sentir,
- performance très variable en fonction de la SEL (Surface Equivalente Laser) de la cible,
- sensibilité à l'état de surface de l'objet cible.

Les systèmes passifs sont quant à eux essentiellement constitués par l'association d'une ou deux caméras qui forment une image de la scène et d'un traitement d'image reposant sur la reconnaissance de forme destiné à la détection des obstacles. Certains algorithmes peuvent également rehausser le contraste des objets dans la scène [3], si toutefois celui-ci n'est pas nul.

La qualité de la détection par un système de vision dépend non seulement de la qualité de la caméra mais aussi et surtout des algorithmes de traitements d'images associés. Il est difficile de trouver dans la littérature des éléments de comparaisons communs à tous les algorithmes (précision, fiabilité, ...) mais il ressort que ces solutions montrent plusieurs limites :

- les systèmes reposant sur une ou deux caméras embarquées montrent rapidement leurs limites dans les applications extérieures en temps réel (quantité d'information trop importante et algorithmes de traitement très sensibles aux conditions météorologiques) et ils n'offrent pas toujours une fiabilité suffisante pour assister ou remplacer le conducteur,
- les niveaux de luminance des objets (ou les parties d'objets) à détecter et par conséquent leur contraste avec le fond de la scène est très variable, d'où l'incapacité de la caméra à fonctionner dans de mauvaises conditions climatiques et photométriques (conduite de nuit, pluie, brouillard, soleil direct, ...),
- l'image est souvent inexploitable par manque de contraste ou par saturation.

Enfin, il existe des systèmes mixtes tels que développés par VALEO et BOSCH utilisant des caméras sensibles dans le proche infrarouge qui peuvent être associées à un éclairage proche infrarouge lui aussi. Ces systèmes fonctionnent bien de nuit pour la détection de la scène routière mais sont inopérants en conditions météorologiques dégradées à cause du choix de la longueur d'onde comme nous le montrerons dans la suite de ce chapitre.

Pour comprendre les phénomènes physiques réduisant le contraste des objets noyés dans du brouillard, il faut être capable de modéliser les luminances du voile rétrodiffusé par le brouillard et celle des objets. C'est l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 4

## Etude théorique de la diffusion de la lumière

Afin de prédire le gain en termes de distance de visibilité des différents systèmes d'imagerie que nous avons imaginés et de comparer leurs performances théoriques, nous avons développé un modèle analytique donnant la luminance rétrodiffusée et le rapport signal sur bruit en présence de brouillard [A7].

### 4.1 Modèle analytique de luminance

Ce modèle analytique repose sur la théorie de la diffusion de la lumière (Mie) [7] et tient compte évidemment des propriétés du milieu diffusant (granulométrie, indice de réfraction complexe) et des différents paramètres optiques du système imageur envisagé (source lumineuse : puissance, divergence, longueur d'onde ; récepteur : divergence, position par rapport à la source) (FIG. 4.1). Nous avons montré [A7] que la luminance rétrodiffusée par le brouillard et reçue par le détecteur s'écrit :

$$L_{B} = \int_{0}^{\infty} \mu_{B} \frac{P_{S}}{\pi \left[R_{S}^{2} + z^{2} \tan^{2}\left(\theta_{S}\right)\right]} \frac{p\left(\pi - \theta\left(z\right)\right)}{4\pi} \cos\left(\theta\left(z\right)\right) \exp\left(-2\mu_{E}z\right)\xi\left(z\right) dz \qquad (4.1)$$

où  $P_S$ ,  $R_S$  et  $\theta_S$  sont respectivement la puissance lumineuse, le rayon et l'ouverture angulaire de la source,  $\theta$  l'angle entre le centre optique de la zone visée par le détecteur à l'abscisse z considérée et l'axe optique du détecteur,  $\xi$  un coefficient donnant la zone de recouvrement entre le faisceau issu de la source et le faisceau prenant appui sur le détecteur enfin  $\mu_B$ ,  $\mu_E$  et p sont respectivement les coefficients de rétrodiffusion et d'extinction ainsi que la fonction de phase dépendant du brouillard donnés par la théorie de Mie.

Si l'on considère un objet (de surface lambertienne) plongé dans une scène de brouillard, éclairé par une source lumineuse (la même que dans le calcul de la luminance rétrodiffusée), sa luminance vue par le récepteur s'écrit :

$$L_O = \rho \frac{P_S}{\pi \Omega_S D^2} \exp\left(-2\mu_E D\right) \tag{4.2}$$

où  $\rho$  représente l'albédo de l'objet à la longueur d'onde considérée, exp $(-2\mu_E D)$  représente l'atténuation de la lumière sur le trajet aller retour avec D la distance entre le



FIGURE 4.1 – Schéma d'une source éclairant une tranche de brouillard et d'un récepteur visant une portion de cette tranche.

dispositif d'imagerie et l'objet à voir.

*N.B.* le coefficient d'extinction  $\mu_E \approx 3/V_m$  où  $V_m$  représentent la distance de visibilité météorologique définie comme la distance pour laquelle la luminance transmise par l'atmosphère est atténuée à 95 % [8].

On peut alors définir le rapport signal sur bruit qui dépend du rapport des luminances de l'objet  $L_O$  et rétrodiffusée par le brouillard  $L_B$ . Si le rapport signal sur bruit est positif, un conducteur ou un système d'imagerie quelconque verra les objets dans la scène.

En tenant compte des équations (4.1) et (4.2), on peut déjà constater que le rapport signal sur bruit (et par voie de conséquence la distance de visibilité) est indépendant de la puissance lumineuse de la source  $P_S$ . Comme chacun en a fait l'expérience au volant de son véhicule, on augmente pas la distance de visibilité en allumant les feux de route pourtant plus puissant que les feux de croisement.

#### 4.2 Validation

Les résultats de ce modèle analytique [A7] ont été comparés avec succès à ceux obtenus avec le logiciel de simulation PROF-LCPC [1], utilisant la méthode de Monte-Carlo. Ils ont également été comparés avec succès à des mesures expérimentales réalisées dans la chambre de brouillard de VALEO (FIG. 4.2). Il est commode de tracer ce rapport signal sur bruit en fonction de la grandeur adimensionnée donnant la densité optique du brouillard  $(D/V_m)$ .

Pour une distance de visibilité météorologique de 100 m et pour voir un objet à 100 m  $(D/V_m = 1)$ , il faudrait un dispositif d'imagerie ayant un gain (en terme de rapport signal sur bruit) d'environ 30 dB.



FIGURE 4.2 – Rapport signal sur bruit en fonction du rapport  $D/V_m$  obtenu à partir de mesures expérimentales (•), PROF-LCPC (—) et avec le modèle analytique (—).

Nous avons vérifié expérimentalement, comme le montre la figure (FIG. 4.2) (pour  $D/V_m \ge 0, 1$ ), qu'un conducteur au volant d'un véhicule léger, dans un brouillard de nuit pour lequel la distance de visibilité météorologique  $(V_m)$  est de 100 m, ne voit pas la scène routière au delà d'une distance (D) d'environ 10 m.

Très récemment, ce modèle a été utilisé pour simuler des impulsions lumineuses. Il suffit pour cela d'introduire dans les bornes d'intégration de l'équation (4.1) la position spatiale de la tranche de lumière.

#### 4.3 Etude en fonction de la longueur d'onde de la source

Nous nous sommes également intéressé à l'influence de la longueur d'onde par rapport à la distance de visibilité météorologique en présence de brouillard. Les trois granulométries de brouillard considérées (FIG. 4.3.a) sont simulées par une fonction log-normale [9, A7]. Ce modèle de granulométrie correspond assez bien à des granulométries rencontrées expérimentalement (FIG. 5.10). Les coefficients d'extinction, inversement proportionnel à la distance de visibilité, et de rétrodiffusion varient en fonction de la longueur d'onde (FIG. 4.3.b). Les trois granulométries sont normalisées de telle façon que la distance de visibilité météorologique (dans le visible à  $\lambda = 0, 5 \ \mu m$ ) soit égale à 100 m.

Pour les systèmes d'imagerie passifs (ceux n'utilisant pas de source additionnelle), le phénomène d'extinction est le principal effet à considérer puisqu'il est responsable de l'atténuation du signal.

Dans l'infrarouge, bandes spectrales  $0, 8-2, 0 \mu m, 3-5 \mu m$  et  $8-12 \mu m$ , correspon-



b) coefficients d'extinction et de rétrodiffusion

FIGURE 4.3 – Variation des coefficients d'extinction et de rétrodiffusion en fonction de la longueur d'onde pour trois granulométries de brouillard.

dant aux domaines de sensibilité des caméras commerciales, il n'y a pas d'amélioration significative de la visibilité par rapport au visible (TAB. 4.1). Seule la visibilité en bande  $8 - 12 \ \mu m$  est améliorée dans le cas d'une granulométrie centrée sur  $1 \ \mu m$ .

En revanche, en imagerie active, il faut choisir une bande spectrale pour laquelle le coefficient de rétrodiffusion est faible afin que le dispositif de réception ne soit pas ébloui par sa propre source tout en conservant un coefficient d'extinction faible afin de ne pas subir une trop forte atténuation du signal sur le trajet aller retour. Il semblerait que la bande  $8 - 12 \ \mu m$  soit un bon compromis.

Le rapport signal sur bruit a été calculé en fonction de la densité optique du brouillard pour deux longueurs d'onde utilisées en imagerie active (FIG. 4.4). On remarque sur cette figure que pour la longueur d'onde dans le visible ( $\lambda = 0, 5 \ \mu m$ ), le rapport signal sur bruit est peu affecté par la granulométrie du brouillard. D'une part le coefficient d'extinction  $\mu_E$ est constant par convention ( $V_m = 100 \ m$ ) et d'autre part le coefficient de rétrodiffusion  $\mu_B$  est également semblable quelle que soit la granulométrie du brouillard. En revanche,

TABLE 4.1 – Distance de visibilité pour différents domaines spectraux et pour trois granulométries de brouillard (FIG. 4.3.a).

Granulométrie		Distance	de visibilité (m	)
centrée sur $(r \ \mu m)$	Visible	$0, 8-2, 0 \ \mu m$	$3, 0-5, 0 \ \mu m$	$8,0-12,0\ \mu m$
1		86	105	503
5	100	96	88	99
10		98	93	90
80 60 40 20 0 -10 -0 -100 -120 0	0.5 1	$\lambda = 0.5 \mu m$ $\lambda_0$ $l.5 \qquad 2 \qquad 2.5  DV_m$	5 5 5 5.5	

FIGURE 4.4 – Variation du rapport signal sur bruit en fonction de la densité optique du brouillard pour trois granulométries de brouillard (FIG. 4.3.a), calculée à deux longueurs d'ondes  $\lambda = 0,5 \ \mu m \ (-) \ et \ \lambda = 10,6 \ \mu m \ (--).$ 

dans l'infrarouge ( $\lambda = 10, 6 \ \mu m$ ), le rapport signal sur bruit dépend assez fortement de la granulométrie du brouillard du moins entre une granulométrie centrée sur des rayons de gouttelettes de 1  $\mu m$  et les deux autres plus grosses. Ceci n'est pas forcement intuitif. Pour comprendre ce phénomène, il faut s'intéresser à l'intégrale de l'équation (4.1) qui est proportionnelle à un rapport  $\mu_B/\mu_E$  et dont le rapport signal sur bruit en dépend de manière inversement proportionnel. La variation du rapport  $\mu_E/\mu_B$  est représenté en fonction de la longueur d'onde (FIG. 4.5) et pour nos trois granulométries de brouillard modèles. A certaines longueurs d'ondes (autour de 2,  $8\mu m$ ;  $6\mu m$ ;  $11\mu m$ ), le rapport  $\mu_E/\mu_B$  est maximum, c'est-à-dire que pour une distance de visibilité fixée ( $\mu_E = C^{ste}$ ), la rétrodiffusion est très faible.

Toutes choses égales par ailleurs, on montre ainsi que le choix de la longueur d'onde est déterminant pour réaliser un dispositif d'imagerie actif. En passant du visible à l'infrarouge, le rapport signal sur bruit peut être augmenté, dans certain cas, de 40 dB ce qui revient à augmenter la distance de visibilité d'un facteur 10.

Nous reviendrons sur le choix optimum de la bande spectrale dans le chapitre 5.3.



FIGURE 4.5 – Variation du rapport  $\mu_E/\mu_B$  en fonction de la longueur d'onde pour trois granulométries de brouillard (FIG. 4.3.a).

## Chapitre 5

## Les différentes solutions envisagées

Après avoir présenté brièvement les phénomènes qui réduisent le contraste des objets dans la scène en présence de brouillard, nous allons nous intéresser aux différentes solutions développées au LCPC.

L'idée est de trier les photons balistiques et/ou serpentiles parmi les photons diffusés, c'est-à-dire ceux dont la propagation n'est pas (ou quasiment pas) perturbée par le milieu diffusant. Cette séparation peut se faire principalement de trois manières :

- temporellement en éclairant la scène avec une source lumineuse impulsionnelle : les photons balistiques vont mettre moins de temps pour faire un aller retour entre la source et l'objet que les photons diffusés ; elle donne lieu à la technique de crénelage temporel [CI10, CI4] développée notamment par l'Institut de recherche francoallemand de Saint Louis (ISL) avec qui nous collaborons depuis 2005,
- spatialement en éclairant la scène avec une source lumineuse peu cohérente temporellement : les photons balistiques vont parcourir le chemin optique le plus court entre l'aller et le retour; elle donne lieu à la tomographie par cohérence optique [10, B2],
- spectralement en tirant partie des propriétés physiques du phénomène de rétrodiffusion qui peut être éliminée en grande partie selon la longueur d'onde choisie [CN2, B1].

#### 5.1 La tomographie par cohérence optique

De nombreux travaux existent dans le domaine de l'imagerie optique parmi lesquels on trouve l'imagerie des tissus vivants (milieux diffusants par excellence) qui occupe une large place. Une des techniques utilisées repose sur de l'interférométrie, appelée tomographie par cohérence optique (OCT pour Optical Coherence Tomography) [11, 12, 13, 14], dans un but de développer des outils d'aide au diagnostic médical *in vivo* [15, 16, 17, 18], etc.

#### 5.1.1 Principe

Le principe de la tomographie par cohérence<sup>1</sup> optique (FIG. 5.1) repose sur la combinaison (interférence) de la lumière réfléchie par l'objet  $(O_O)$  que l'on cherche à voir et

<sup>1.</sup> On parle de cohérence temporelle



FIGURE 5.1 – Principe de la tomographie par cohérence optique classique : (S) source lumineuse, (M) miroir, (CS) cube séparateur, (D) détecteur, (Obj) objet, (MD) milieu diffusant,  $(O_O)$  onde objet,  $(O_B)$  onde rétrodiffusée par le milieu diffusant,  $(O_R)$  onde de référence.

de la lumière rétrodiffusée par le milieu diffusant  $(O_B)$  d'une part, et de la lumière ayant suivi un trajet pris pour référence  $(O_R)$  d'autre part. A la sortie de l'interféromètre, des interférences se produisent si la différence de chemin optique est inférieure à la longueur de cohérence de la source lumineuse utilisée (S). Si on utilise une source lumineuse ayant une grande longueur de cohérence, lorsqu'on déplace le miroir (M) de l'interféromètre, on observe une alternance de franges sombres et lumineuses. Dans ce cas, l'ensemble des ondes venant de l'objet et rétrodiffusée par le milieu diffusant interfèrent avec l'onde de référence. Il n'est donc pas possible de trier les ondes objets de celles rétrodiffusées.

Au contraire, une source lumineuse de courte longueur de cohérence (lampe à filament, diode électroluminescente par exemple) donnent naissance à des interférences seulement entre les ondes provenant d'une fine tranche d'espace (équivalente à la moitié de la longueur de cohérence de la source) et ayant parcouru un chemin optique équivalent à celui de l'onde de référence. Les autres ondes tombent sur le détecteur donnant une puissance lumineuse indépendante du chemin optique de l'onde de référence.

La profondeur de cette tranche est sélectionnée en agissant sur la différence de chemin optique (retard). En relevant l'amplitude de l'intensité lumineuse à la sortie de l'interféromètre pour plusieurs retards de l'onde de référence, on obtient une image tomographique (en 3 dimensions) de la scène. Il est également possible de travailler avec un chemin de référence fixe et d'imager seulement la tranche d'espace correspondant au retard de l'onde de référence. Il est ainsi possible de trier les ondes venant de l'objet de celles venant du milieu diffusant.

On comprend alors que le détecteur (le plus souvent une caméra) reçoit beaucoup plus de photons diffusés que de photons balistiques. Par conséquent, le signal interférométrique à détecter est noyé dans un bruit important. Pour pallier ce problème, il est nécessaire d'utiliser des caméras de bonne qualité (en terme de rapport signal sur bruit et de dynamique), d'avoir recourt à des techniques de décalage de phase associées à des algorithmes



FIGURE 5.2 – Principe de la tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif : (PRC) cristal photo-réfractif.

d'inversion et de moyenner une centaine d'images pour augmenter le rapport signal sur bruit de l'image finale.

#### 5.1.2 Tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif

Pour lever cette difficulté, durant la thèse d'Étienne Belin, nous avons développé un dispositif original qui a fait l'objet d'un brevet [B2]. Ce dispositif repose sur l'OCT associé à un cristal photoréfractif [19, 20] afin d'augmenter le rapport signal sur bruit [21, 22, 23] (FIG. 5.2). Un cristal photoréfractif peut être « assimilé » à une plaque holographique réinscriptible en temps réel.

Supposons que l'on éclaire une scène avec une source peu cohérente comme en tomographie classique et que nous enregistrons dans un cristal photoréfractif les interférences produites par les ondes venant de l'objet et de la référence. C'est ce que l'on appelle couramment un hologramme.

Puisque la différence des chemins entre les ondes rétrodiffusées par le milieu et l'onde de référence est plus grande que la longueur de cohérence de la source lumineuse, la lumière rétrodiffusée éclaire simplement le cristal et le traverse sans produire d'interférences. Il existe plusieurs solutions pour restituer l'hologramme (FIG. 5.3) :

- au fur et à mesure que l'on écrit l'hologramme, une partie de l'onde de référence se diffracte à la traversée du cristal donnant une image virtuelle de l'objet au moment où celui-ci a été enregistré ; la lumière provenant de l'objet réel et la lumière rétrodiffusée par le milieu traversent le cristal dans la même direction que la lumière diffractée ; si on utilise le cristal photoréfractif dans la configuration optique dite « d'anisotropie de diffraction » [20, 24], alors les ondes transmises par le cristal sont polarisées perpendiculairement aux ondes diffractées ; en utilisant un polariseur placé derrière le cristal, on coupe en partie les ondes transmises pour ne garder que les ondes diffractées, c'est-à-dire une image virtuelle de l'objet comme s'il n'y avait pas de lumière rétrodiffusée ; l'efficacité de réjection du bruit dépend du coefficient d'extinction du polariseur et de la pureté optique du photoréfractif (FIG. 5.3.a),
- une autre solution consiste à alterner des périodes d'écriture et de lecture de l'hologramme; pendant la phase d'écriture l'objet diffuse de la lumière vers le cristal photoréfractif qui reçoit aussi de la lumière du faisceau de référence; à travers le


a) première méthode : (P) polariseur



b) deuxième méthode : (Sh) obturateur



c) troisième méthode : (F) filtre spectral

FIGURE 5.3 – Principe de la tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif : méthode de lecture des hologrammes.

cristal, la caméra reçoit de la lumière de l'objet et celle diffusée par le milieu diffusant; pendant la phase de lecture, on occulte la lumière venant de l'objet; la caméra voit l'hologramme précédemment enregistré qui s'efface pendant la lecture sans être ébloui par la lumière rétrodiffusée (FIG. 5.3.b),

- une troisième solution consiste à enregistrer l'hologramme à une longueur d'onde et de le lire en temps réel avec une seconde longueur d'onde (en respectant les conditions de diffraction de Bragg); un filtrage spectral et spatial élimine alors la première longueur d'onde qui porte l'information de l'objet et du milieu diffusant pour ne laisser passer que l'information venant de l'hologramme, c'est-à-dire l'objet virtuel (FIG. 5.3.c).

Toute la dynamique de la caméra sert à coder en niveau de gris l'image virtuelle de l'objet. On peut alors se contenter d'utiliser une caméra standard et d'enregistrer une seule image tout en ayant un rapport signal sur bruit très grand (puisqu'on a supprimé le bruit de la prise d'image).



FIGURE 5.4 – Montage de laboratoire d'une caméra à tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif.

### 5.1.3 Résultats

Après avoir caractérisé (mesure de l'efficacité de diffraction) nos cristaux photoréfractifs (BGO, BSO<sup>2</sup> et mis au point une caméra de laboratoire reposant sur ce principe (FIG. 5.4), les premiers résultats que nous avons obtenus ont été très encourageants.

Les résultats que nous présentons ont été obtenus en laboratoire. Nous avons remplacé l'objet et le milieu diffusant par un bloc d'aluminium en forme de marche d'escalier (FIG. 5.4). La hauteur de la marche est de l'ordre de 10 mm ce qui représente 5 à 10 fois la longueur de cohérence du laser que nous utilisons dans cette expérience. La marche d'escalier permet de vérifier que le montage est bien apte à faire de la tomographie. Pour simuler le milieu diffusant, du moins du point de vue énergétique, nous dirigeons le faisceau incident préférentiellement en direction du côté « bruit » de l'objet test. Le chemin optique du faisceau de référence est égal au trajet allant du cube séparateur au cristal photoréfractif en se réfléchissant sur l'objet test côté « signal ». De cette manière, seule la lumière venant de l'objet côté « signal » interfère dans le cristal photoréfractif avec la lumière, nous simulons de manière maitrisée l'atténuation de la lumière côté « signal » et le fait que le détecteur est ébloui par une lumière intense côté « bruit » (FIG. 5.5.a).

Le détecteur est constitué d'une caméra CCD analogique munie d'un objectif qui permet de voir l'ensemble de l'objet test. Le signal vidéo analogique est numérisé par une carte d'acquisition vidéo standard 8 bits. Nous avons mis au point une procédure de réglage des niveaux de numérisation de la carte d'acquisition qui permet d'utiliser toute sa dynamique.

<sup>2.</sup> Cristaux d'oxyde de bismuth et de germanium  $(Bi_{12}GeO_{20})$  ou de silicium  $(Bi_{12}SiO_{20})$ 



FIGURE 5.5 – Images de l'objet test ayant un rapport signal sur bruit de  $-6 \, dB$ .

Avec la première méthode (sans utiliser l'obturateur du montage (FIG. 5.4)), compte tenu des caractéristiques du cristal et des polariseurs, le gain théorique est estimé à environ 9 dB ce qui se vérifie parfaitement expérimentalement. Si l'on se rapporte à la figure du rapport signal sur bruit en fonction de l'opacité du brouillard (FIG. 4.2), la distance de visibilité, par rapport à la vision humaine, est doublée en utilisant notre dispositif. Néanmoins, il reste insuffisant pour nos besoins d'imagerie. Pour augmenter le gain, une solution envisageable consiste à augmenter l'efficacité de diffraction du cristal en lui appliquant une tension alternative de quelques kilovolts [25]. Après avoir mesuré l'efficacité de diffraction du photoréfractif polarisé par une haute tension, le gain théorique estimé est de l'ordre de 13 dB ce qui correspond à voir cinq fois plus loin qu'à l'œil nu. Des essais complémentaires en laboratoire devraient permettre de confirmer cette faisabilité.

Avec les méthodes suivantes, le gain théorique est « infini » puisque nous supprimons d'une façon ou d'une autre le bruit venant du milieu diffusant. En pratique, il est limité par le rapport signal sur bruit du détecteur. A ce jour, nous avons utilisé simplement la deuxième méthode car elle présente l'avantage d'un montage auto-aligné contrairement à la troisième.

Avec la deuxième méthode, nous avons imagé l'objet test (FIG. 5.5.a) dont le rapport signal sur bruit, entre les deux côtés de la marche, est de  $-6 \ dB$ . Nous avons atteint expérimentalement un gain d'environ 40 dB (en une seule prise d'image) (FIG. 5.6), ce qui correspond à voir quatorze fois plus loin qu'à l'œil nu. Le meilleur rapport signal sur bruit enregistré par la caméra pendant la phase de lecture est de l'ordre de 35 dB.

La figure (FIG. 5.6) montre l'évolution du rapport signal sur bruit pendant la phase de lecture. En vision OCT-PRC, les deux premières images correspondent à l'enregistrement pendant la fermeture de l'obturateur. Après cette période, nous apercevons une décroissance lente du rapport signal sur bruit en vision OCT-PRC due à l'effacement progressif de l'hologramme. Le temps d'effacement de l'hologramme est identique au temps d'enregistrement et dépend de la puissance lumineuse du faisceau de référence. Il est possible de diminuer le temps d'exposition de l'objet et de rémanence de l'hologramme afin d'augmenter la dynamique temporelle du système pour en faire un dispositif quasi-temps réel (20 images/s).

Le maximum du rapport signal sur bruit atteint  $(35 \ dB)$  dépend du bruit intrinsèque de la caméra. C'est-à-dire qu'une caméra de meilleure qualité permettra d'augmenter ce maximum. Cependant, le gain dépend évidemment du niveau maximum que peut



FIGURE 5.6 – Evolution du rapport signal sur bruit pendant la phase de lecture de l'hologramme.

prendre le rapport signal sur bruit mais surtout le rapport signal sur bruit intrinsèque de l'objet test. Nous pensons que nous pouvons encore augmenter ce gain, c'est-à-dire faire de l'imagerie pour des scènes ayant un rapport signal sur bruit inférieur à  $-6 \ dB$ . La limite inférieure acceptable dépend de la puissance lumineuse venant de l'objet test côté « signal » qui arrive sur le cristal photoréfractif (effet de seuil).

# 5.2 Le crénelage temporel

La technique de l'imagerie active à crénelage temporel consiste à associer au capteur d'image sa propre source d'éclairage pour illuminer la scène au moment de l'observation. En synchronisant judicieusement l'éclairage et la réception, il devient alors possible d'améliorer la visibilité à travers les milieux atmosphériques diffusants.

Elle fait l'objet de nombreuses publications dans le domaine de la détection et de la reconnaissance de cibles pour des applications de surveillances [26, 27] ou pour voir à travers des camouflages et des milieux diffusants [28] et enfin elle permet de reconstruire en 3 dimensions la scène imagée [29, 30, 31, 32, 33].

#### 5.2.1 Principe

Au lieu d'éclairer la scène de façon continue, on l'éclaire avec de très brèves impulsions lumineuses. La durée d'un de ces flashs de lumière est typiquement de quelques centaines de nanosecondes à quelques microsecondes. Pour donner un ordre de grandeur, nous parlerons d'impulsions de 200 ns. A la vitesse de la lumière, une impulsion d'une durée de 200 ns correspond à un train d'onde de 60 m de longueur. Nous avons donc produit une tranche d'espace éclairée, d'une épaisseur de 60 m, qui se dirige vers la scène à visualiser à la vitesse de la lumière (FIG. 5.7.a). Cette tranche de lumière atteint un objet présent



c) tranche lumineuse arrivant sur la caméra - d) tranche lumineuse continuant son chemin obturateur ouvert obturateur fermé

FIGURE 5.7 – Principe de l'imagerie active par crénelage temporel.

dans la scène et va, en partie, se réfléchir sur cet objet. La quantité de lumière rétroréfléchie dépend du coefficient de réflexion de l'objet à la longueur d'onde d'éclairage. Cette portion de lumière rétroréfléchie revient vers le système d'éclairage (FIG. 5.7.b). Pendant tout ce temps, l'obturateur de la caméra reste en position fermé. La caméra n'est donc pas éblouie par la lumière rétroréfléchie par les particules en suspension dans l'air. C'est au moment où l'onde lumineuse revient de la tranche d'espace à visualiser que l'on ouvre l'obturateur de la caméra (FIG. 5.7.c), ceci pendant une durée équivalente à la durée de l'impulsion laser. L'obturateur est ensuite refermé pour ne pas voir l'onde qui continue à se propager au-delà de la tranche d'espace à visualiser (FIG. 5.7.d).

On comprend maintenant que la durée de l'impulsion laser ou le temps de pose de la caméra (les deux étant souvent ajustés pour être identiques) déterminent l'épaisseur de la tranche d'espace visualisée au niveau de la scène. Entre l'instant où l'impulsion laser est engendrée et l'instant où l'obturateur de la caméra est ouvert, ce délai détermine la distance à laquelle on regarde la scène.

#### 5.2.2 Dispositif

Un système optronique d'imagerie est constitué de différents sous-éléments dont les fonctions de transfert conditionnent la capacité du système à détecter un objet dans le champ de vue. L'éclairement de l'image (au plan focal de l'optique d'imagerie) est conditionné par le bilan énergétique et sa qualité par la fonction de transfert de modulation du système global. Ces deux paramètres peuvent être évalués en tenant compte des caracté-



a) schéma d'un système d'imagerie active



FIGURE 5.8 – Système d'imagerie active.

ristiques de chacun des sous-ensembles formant le système (FIG. 5.8.a).

L'illuminateur est caractérisé par sa longueur d'onde, par sa puissance et sa divergence. Le récepteur est caractérisé par sa sensibilité spectrale, par son champ de vue, par la pupille de l'optique d'imagerie et par la fonction de transfert de modulation (FTM) de chacun de ses sous-ensembles (FIG. 5.8.b). Ces différentes caractéristiques permettent de calculer la portée du système et de simuler la qualité d'image à laquelle on peut s'attendre si on construit un système à partir de sous-ensembles déterminés.

L'obturateur rapide est réalisé au moyen d'un intensificateur d'images qui permet d'atteindre des temps d'ouverture de l'ordre de la centaine de nanosecondes.

La figure (FIG. 5.8.c) présente un des dispositif de l'ISL que nous avons utilisé à plusieurs reprises. Il a un champ de vue rectangulaire de  $3, 25^{\circ} \times 2, 44^{\circ}$  et une portée de  $2 \ km$ . La source envoie des impulsions laser de 200 ns à une fréquence de répétition de 14 kHz. La puissance lumineuse maximum sortant de l'illuminateur est d'environ 500 W soit une puissance moyenne d'environ  $1, 4 \ W$ .



FIGURE 5.9 – Schéma de la chambre de brouillard du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand.

### 5.2.3 Résultats expérimentaux

Plusieurs essais en situation de brouillard nocturne ont été réalisés dans les chambres de brouillard du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Clermont-Ferrand (FIG. 5.9) et de VALEO. La chambre de brouillard de Clermont-Ferrand a l'avantage d'être équipée d'instruments de mesure (transmissiomètres et granulomètre) afin de caractériser le brouillard.

La granulométrie du brouillard produit est centrée sur des diamètres de gouttes de l'ordre de 1  $\mu m$  (FIG. 5.10). Cette figure confirme le choix du modèle de granulométrie utilisé dans l'étude théorique présentée précédemment (chapitre 4).

Un exemple d'images acquises avec le dispositif de l'ISL (FIG. 5.11) montre un panneau routier situé à environ 30 m du poste d'observation. Dès que la densité du brouillard est telle que la distance de visibilité météorologique est supérieure à 12 m, le dispositif à crénelage temporel permet d'apercevoir le panneau. Cette technique permet d'augmenter le rapport signal sur bruit d'environ 50 à 60 dB ce qui revient à « voir » environ 15 à 20 fois plus loin qu'à l'œil nu [CI10, CI4].

### 5.2.4 Vers un système bas coût

Bien que l'imagerie active utilisant le crénelage temporel soit une méthode performante pour voir à travers le brouillard, elle n'est pas forcement envisageable dans un contexte industriel à cause de son coût relativement élevé.

En effet, il faut prévoir un budget autour de 15 k $\in$  pour une caméra intensifiée auquel s'ajoute le budget pour l'illuminateur pulsé et son électronique.

Pour pallier ce problème, l'idée est d'utiliser un détecteur matriciel CMOS dont on pourrait piloter de manière *ad hoc* son obturateur électronique. Il faut pour cela accéder à la commande d'un certain nombre de transistors composant le pixel CMOS afin de réaliser la fonction de crénelage temporel. Bien qu'aucune caméra ne soit disponible



FIGURE 5.10 – Distribution des diamètres de gouttelettes formant le brouillard pour 3 distances de visibilité météorologique et modèle granulométrique utilisé dans les simulations.

aujourd'hui, ceci est technologiquement possible. Nous avons réussi à nouer des contacts avec un industriel capable de réaliser des matrices CMOS intégrant notre fonction. Une pré-étude optique/électrique a permis de valider le concept.

Un équipementier aéronautique devrait prochainement rejoindre le consortium afin de monter un dossier de financement pour réaliser un première série d'une centaine de caméras de ce type.

### 5.3 La méthode spectrale

### 5.3.1 Principe

Lors de nos travaux théoriques sur la rétrodiffusion de la lumière, nous avons montré qu'il existait des longueurs d'onde ou le phénomène de rétrodiffusion est plus faible que dans le domaine des longueurs d'onde visibles.

Notamment, quelle que soit la granulométrie du brouillard considéré (distribution du diamètre des gouttes centrée entre 1  $\mu m$  et 10  $\mu m$ ), dans le domaine infrarouge lointain (Bande III entre 8 et 12  $\mu m$ ), la rétrodiffusion de la lumière est quasiment nulle autour d'une longueur d'onde voisine de 11  $\mu m$  (FIG. 4.3.b). C'est-à-dire qu'en illuminant un brouillard dans cette région spectrale, très peu de lumière revient vers la source. Le contraste des objets éclairés est donc rehaussé. Le coefficient d'extinction est comparable à celui mesuré dans le visible. C'est en partie pour cette raison que les dispositifs d'imagerie passive en bande III ne présentent pas un grand intérêt.

Par ailleurs, compte tenu de la loi du rayonnement du corps noir, il faut noter que les objets ayant une température autour de 20 °C, ont une luminance maximale dans la bande III (infrarouge thermique).



a) image globale de la scène sans brouillard



b) image du panneau pour  $V_m = c$ ) image du panneau pour  $V_m = 12 m$  16 m



d) image du panneau pour  $V_m = 22 m$ 

FIGURE 5.11 – Résultats de vision active à crénelage temporel à trois distances de visibilité (de gauche à droite 12, 16 et 22 m).

Le contraste thermique d'un objet est défini comme étant la différence des températures de l'objet et du fond de la scène ramenée à la température du fond de scène. Les objets thermiquement visibles ont donc un contraste non nul, c'est-à-dire les objets chauds sur fond froid ou le contraire. En utilisant la vision infrarouge active, il est également possible de voir les objets ayant un contraste nul, c'est-à-dire les objets à la même température que celle du fond. Bien évidemment, dans ce cas, il est nécessaire que l'albédo des objets soit relativement élevé dans cette gamme de longueur d'onde. C'est en général le cas, puisqu'il s'agit de voir des panneaux métalliques ou disposant de système de réflecteurs (bille, coin de cube), de glissières métalliques, des catadioptres de véhicule, etc.

#### 5.3.2 Résultats expérimentaux

Des mesures expérimentales réalisées en chambre de brouillard, au LRPC de Clermont-Ferrand, ont permis de confirmer cette étude théorique.

Différents éléments sont disposés dans la chambre de brouillard (FIG. 5.13.a) : le cercle bleu localise la position de la tête du transmissiomètre, le rectangle vert localise la position d'une plaque portée à une température de 30 °C, située à 10 m de la caméra et enfin le triangle jaune localise la position d'un panneau routier « Attention Travaux », 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. De cette façon, nous avons deux objets (la plaque et le panneau) avec des contrastes thermiques ( $C_T = T_{objet}/T_{fond} - 1$ ) bien différents l'un de l'autre : pour la plaque  $C_T \approx 0,01$  et pour le panneau  $C_T = 0$ .

La source lumineuse utilisée est un Laser  $CO_2$  (COHERENT-Diamond C-30A) émettant un rayonnement à 10,6  $\mu m$  et dont la puissance optique 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. Le laser illumine l'ensemble du panneau routier. Le détecteur est une caméra thermographique (FLIR A320) de 320 × 240 pixels de microbolomètres non refroidis. La résolution en température est de l'ordre de 50 mK (à 30 °C). La réponse spectrale des détecteurs est comprise entre 7,5 et 13  $\mu m$ .

Les axes du faisceau de la source laser et de la caméra thermique sont colinéaires et très proches en distance l'un de l'autre ( $\approx 0,5 m$ ), de sorte que la rétrodiffusion soit maximale si elle existe (FIG. 5.12).

Les premières images ont confirmé nos prédictions théoriques (FIG. 5.13.b). Même en présence d'un brouillard très dense ( $V_m \ll 8 m$ ), la caméra thermique n'est pas éblouie par la rétrodiffusion de la lumière incidente. On ne voit 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 lumineuse est éteinte, seul les objets ayant un contraste thermique non nul sont visibles (FIG. 5.13.c). Dès que la source lumineuse est allumée (FIG. 5.13.d), la luminance mesurée par la caméra au droit du panneau est nettement rehaussée jusqu'à saturer le détecteur montrant ainsi qualitativement l'efficacité du dispositif.

En l'absence totale de brouillard, le laser étant allumé, nous avons mesuré le contraste



FIGURE 5.12 – Disposition du las  $CO_2$  et de la caméra thermique dans la chambre de brouillard.

maximum  $C_0$  du panneau en prenant comme température de référence celle du fond de la scène. Puis, pour chaque palier de distance de visibilité météorologique  $V_m$ , nous avons mesuré le contraste apparent C du panneau dans les mêmes conditions que précédemment. Nous avons alors estimé la distance de visibilité obtenu avec notre dispositif de vision infrarouge actif  $V_{IR}$  en utilisant l'expression suivante :  $V_{IR} = -D/3 \ln (C/C_0)$ , où D =25 m distance entre la caméra et le panneau.

Nous avons reporté sur la figure (FIG. 5.14), l'évolution de la distance de visibilité mesurée avec le dispositif de vision infrarouge actif en fonction de la distance de visibilité météorologique (mesurée dans le visible) pour deux températures de références mesurées dans deux zones différentes du fond de la scène (de chaque côté du panneau).

Nous constatons que pour une distance de visibilité météorologique de 20 m, le contraste des objets dans le domaine spectral qui nous intéresse est celui que nous aurions eu pour des objets situés entre 300 et 800 m, en supposant que les objets sont assez gros pour être résolus par la caméra. En conclusion, ce dispositif de vision infrarouge actif permet d'atteindre un gain d'un facteur 15 à 40 sur la distance de visibilité même lorsque le contraste thermique des objets est nul.

Ce dispositif est extrêmement simple à mettre en œuvre puisqu'il ne nécessite qu'une caméra thermique et une source lumineuse adaptée (laser  $CO_2$  par exemple). L'ensemble de ces éléments sont très répandus de nos jours. En collaboration avec un équipementier aéronautique, nous envisageons de déposer un brevet [B1].



a) sans brouillard

b) avec  $V_m << 8 m$ , laser allumé



c)  $V_m = 8 m$ , laser éteint

d)  $V_m = 8 m$ , laser allumé

FIGURE 5.13 – Résultats de vision en infrarouge dans différentes situations.



FIGURE 5.14 – Evolution de la distance de visibilité mesurée avec le dispositif de vision active infrarouge en fonction de la visibilité météorologique.

# Chapitre 6

# Conclusion

Les travaux de recherche menés sur le thème de la vision tout temps, nous ont amené à approfondir nos connaissances dans la propagation de la lumière dans les milieux diffusants comme le brouillard.

Une première étape de notre travail a été de proposer un modèle analytique de la luminance rétrodiffusée par le brouillard. Ce modèle rend compte de l'évolution du rapport signal sur bruit en fonction de la densité optique du brouillard ou, ce qui revient au même de la perte de contraste des objets noyés dans le brouillard.

A la différence des simulations reposant sur le tracé de rayons (Monte-Carlo), ce modèle analytique permet de comprendre quels sont les paramètres physiques qui sont à l'origine de la perte de contraste. Il est alors plus facile de concevoir des dispositifs permettant d'améliorer la visibilité.

Ces premiers travaux nous ont conduit à proposer plusieurs dispositifs, plus ou moins matures, exploitant différentes propriétés de la propagation dans le brouillard :

- la tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif est une technique totalement originale qui a fait l'objet d'un brevet en 2008; elle est le fruit d'une partie du travail de thèse de Etienne Belin; en laboratoire, nous avons montré qu'elle pouvait atteindre un gain sur le rapport signal sur bruit d'environ 40 dBce qui revient à voir 10 fois plus loin qu'à l'œil nu,
- l'imagerie active à crénelage temporel, développée par l'ISL avec qui nous collaborons, permet d'atteindre un gain sur le rapport signal sur bruit d'environ 50 dB correspondant à voir 15 fois plus loin qu'à l'œil nu ; cependant les dispositifs actuels, utilisant un intensificateur d'image, sont trop coûteux pour envisager un déploiement sur des véhicules ou même des avions ; avec des industriels, nous avons montré qu'il était possible de fabriquer une caméra CMOS particulière permettant de faire du crénelage temporel à bas coût,
- l'imagerie infrarouge active, exploitant l'absence de rétrodiffusion autour d'une longueur d'onde de 11  $\mu m$ ; cette technique permet d'atteindre un gain sur le rapport signal sur bruit d'environ 40 dB soit un facteur 10 sur la distance de visibilité; un brevet est en cours de dépôt avec un industriel.

Les derniers résultats obtenus, nous encouragent à poursuivre nos travaux de manière plus intense encore, en y associant des industriels fabricant de composants et des futurs utilisateurs.

# Deuxième partie

# Contrôle non destructif et de santé des structures

# Chapitre 7

# Introduction

Depuis mon doctorat à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) sous la direction de Jean Claude Krapez, Daniel Balageas et François Lepoutre, je me suis intéressé à l'évaluation non destructive des ouvrages d'arts [A14, A11, A9, L2, CI21, CI14, CI13].

Au LCPC, j'ai ainsi mené des travaux de recherches d'une part sur le diagnostic du collage des composites sur le béton [A4] faisant appel à la mesure d'un champ de déformation par shearographie (technique d'interférométrie de speckle) et à la thermographie infrarouge. D'autre part, je me suis intéressé à l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure [A6] fondé sur un dispositif de mesure de capacité faisant appel à l'électrostatique.

Plus récemment, j'ai été amené à travailler sur les capteurs à fibres optiques pour la mesure répartie de la température et de la déformation dans les structures de génie civil [L1, A5, A3, CI2, CI3]. Cette partie ne sera volontairement pas détaillée dans ce rapport car elle ne constitue pas le cœur de mes travaux de recherche.

Nous présenterons deux exemples de contrôles non destructifs appliqués au génie civil, l'un sur l'auscultation du collage composite-béton et l'autre sur l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure.

Pour chacune de ces problématiques, nous donnerons une description du principe de la méthode et des matériels développés. Nous aborderons les aspects de simulations numériques et nous présenterons des résultats de mesures expérimentales.

# Chapitre 8

# Diagnostic du collage des composites sur le béton

# 8.1 Introduction

Le renforcement ou la réparation des structures en béton armé par des fibres polymères (Fiber-Reinforced Polymer : FRP) collées en surface est désormais une technique couramment acceptée et répandue (FIG. 8.1). Cependant, l'utilisation des techniques de collage implique de suivre des procédures rigoureuses [34, 35, 36]. De plus, les équipes d'installation doivent être formées conformément aux recommandations du fabricant pour assurer la durabilité et la performance à long terme des armatures de FRP. La vérification de conformité *in situ* devient alors un élément important du processus de mise en œuvre afin de garantir les propriétés d'usages tout au long de la vie de la structure. Une fois le renforcement ou la réparation effectuée, il n'existe pas de méthodes conventionnelles de contrôle non destructif (CND), capables de vérifier la parfaite adhérence du composite sur son substrat.

De nombreuses techniques de contrôle destructives existent mais les inspections visuelles et « acoustiques » au moyen d'un marteau sont certainement les deux techniques les plus utilisées (FIG. 8.2). Elles sont faciles à mettre en œuvre et permettent, dans une certaine mesure, de détecter les imperfections de surfaces et les délaminages. En revanche, ces techniques sont incapables de fournir suffisamment d'informations sur la profondeur (en cas de multicouches composites) et sur l'étendue des zones décollées. Elles ne sont pas capables non plus, d'évaluer le niveau d'adhésion entre le FRP et le substrat (délamination partielle, endommagement de la résine). Seule une technique d'arrachement permet d'apprécier les propriétés d'adhérence du composite sur son support en béton sur des éprouvettes ou des zones témoins mais nécessite une réparation de la zone endommagée. L'idée est donc de proposer une méthode de CND du collage.

Dans cette dernière décennie, on trouve dans la littérature de nombreux travaux portant sur l'évaluation non destructive du collage des FRP. La plupart de ces méthodes sont empruntées au monde de l'aéronautique comme la shearographie et la thermographie infrarouge. Cependant, dans le domaine du génie civil, ces travaux restent au stade de la détection des défauts et éventuellement à l'estimation grossière de leur étendue visible en surface sans nécessairement tenir compte des phénomènes physiques comme la diffusion de la chaleur, etc. qui peuvent fausser cette mesure.



 $\label{eq:Figure 8.1-Exemples de mise en oeuvre de renforcement composite sur ouvrage.}$ 



FIGURE 8.2 – Inspection au marteau sur ouvrage d'art (Viaduc de Toutry A6).

Ce travail se trouve donc être une suite naturelle à mes travaux de thèse entrepris à l'ONERA.

## 8.2 Rappels des principaux résultats de thèse

Au cours de ma thèse [37], j'ai entrepris des travaux sur le contrôle non destructif des structures aéronautiques associant les ondes de Lamb comme moyen de sollicitation et la shearographie [38] comme moyen de visualisation. Le but principal de ces travaux était de proposer aux services de maintenance aéronautique une méthode capable de contrôler l'intégrité des structures de manières quantitatives, rapides et avec une grande lisibilité de l'endommagement [A14, CI18, CI19, CI20, CI22, CI16, CI12].

Les structures aéronautiques se présentent souvent sous forme de plaques minces de grande étendue en alliage d'aluminium et en composite (carbone/époxy, verre/epoxy, etc.). Pour ausculter de grandes surfaces, les techniques échographiques ultrasonores dans les coques s'avèrent longues et coûteuses dans ce milieu industriel. L'idée était donc de mettre en œuvre des ondes de plaque, appelées ondes de Lamb [39, 40]. Ces ondes ont la particularité d'être guidées par les faces de la plaque où elles se propagent et ceci sur plusieurs mètres sans être notablement atténuées. Bénéficiant du fait que la sollicitation devenait ainsi multi-points, une méthode d'analyse plein champ paraissait donc souhaitable pour augmenter le rendement. Nous nous sommes alors tournés vers des techniques d'interférométrie de speckle [41] proches de l'holographie mais mieux adaptées à l'environnement industriel, comme la shearographie, et susceptibles de mesurer des champs de déformation en quasi temps réel.

Durant cette même période passée à l'ONERA, je me suis intéressé à la technique de la vibro-thermographie [A9] utilisant un mode de sollicitation original fondé également sur les ondes de Lamb.

# 8.3 Application au domaine du génie civil

Comme nous venons de le décrire brièvement, la problématique de détection des défauts sur des structures aéronautiques est assez proche de celle rencontrée dans le domaine du génie civil. On trouve, dans la littérature, plusieurs auteurs proposant des méthodes non destructives d'évaluation du collage des FRP. Ces méthodes reposent principalement sur deux techniques : la shearographie [42, CI11], la thermographie infrarouge [43, 44] ou utilisant le couplage de ces deux techniques [45, CI8].

Après quelques rappels sur les dispositifs expérimentaux utilisés et les méthodes développées, nous donnerons un aperçu de nos investigations sur des éprouvettes de laboratoires et une première tentative sur le terrain.



FIGURE 8.3 – Schéma de principe d'un interféromètre de shearographie.

### 8.4 Mise en œuvre de la shearographie

#### 8.4.1 Rappels

Bien que la shearographie soit relativement bien connue dans « le monde du contrôle non destructif », pour plus de clarté dans la suite de cette partie, nous faisons quelques rappels sur la mesure de déformation au moyen de cette technique. Le lecteur souhaitant plus d'informations peut notamment se reporter au premier chapitre de ma thèse [37] qui fait référence à de nombreux ouvrages qui sont encore d'actualité aujourd'hui.

La shearographie est une technique d'interférométrie de speckle procurant en quasi temps réel une image quantitative de la déformation d'une surface sollicitée mécaniquement ou thermiquement par exemple. Les différents dispositifs sont largement décrits par leurs auteurs dans les références suivantes [38, 46, 47, 48].

Le principe de base consiste à faire interférer deux ondes ayant subi sensiblement les mêmes fluctuations aléatoires de chemin optique au cours de leurs trajets entre l'objet étudié et la matrice CCD. Il en résulte une certaine immunité aux vibrations environnantes ce qui rend la shearographie particulièrement intéressante pour une utilisation sur site et notamment en contrôle non destructif. Pour cela, une technique classique est de réaliser une mesure différentielle de la phase optique. Par l'intermédiaire d'un dispositif optique (interféromètre de Michelson (FIG. 8.3) par exemple), chaque pixel de la matrice CCD vise deux points voisins de l'objet, A et B, séparés d'une distance  $\delta$  de quelques dizaines de millimètres. Dans le plan de la matrice CCD, nous obtenons alors deux images de l'objet légèrement décalées l'une de l'autre (on dit aussi cisaillées, d'où le terme shear en anglais). Cette phase optique représente le déphasage qui est le produit de l'indice de réfraction du milieu dans lequel se propagent les faisceaux lumineux par la différence des longueurs géométriques de ces deux faisceaux.

Chaque pixel de la matrice CCD est le siège d'une interférence à deux ondes. Cette interférence dépend de la phase optique qui est mesurée en utilisant les techniques de décalage de phase [49]. Entre deux états de l'objet (avant et après déformation), l'image obtenue représente la variation de phase optique  $\Delta \varphi$ . En suivant la même démarche que Pryputniewicz [50] dans le cas de l'holographie, nous avons montré [37] que la différence de phase  $\Delta \varphi$  est la différence des produits scalaires, aux points A et B, entre le vecteur



FIGURE 8.4 – Définition des vecteurs sensibilités et déplacements.

sensibilité et le vecteur déplacement (FIG. 8.4). La différence de phase s'écrit :

$$\Delta \varphi = \overrightarrow{d_A} \cdot \overrightarrow{K_A} - \overrightarrow{d_B} \cdot \overrightarrow{K_B}$$
(8.1)

où  $\overrightarrow{d}$  et  $\overrightarrow{K} = 2\pi/\lambda \left(\overrightarrow{O} - \overrightarrow{E}\right)$  sont respectivement les vecteurs déplacements et sensibilités aux points A et B avec  $\overrightarrow{E}$  et  $\overrightarrow{O}$  les vecteurs unitaires, selon les directions respectives de l'éclairement et de l'observation et  $\lambda$  la longueur d'onde du laser d'illumination.

Dans le cas d'ondes planes et si l'on considère que les directions d'illumination et d'observation sont normales à la surface de l'objet et que le taux de cisaillement est petit devant la différence des déplacements normaux à la surface, la différence de phase se met sous une forme que l'on trouve souvent dans la littérature :

$$\Delta \varphi \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right) \delta \tag{8.2}$$

où w représente le déplacement normal à la surface de l'objet visé.

#### 8.4.2 Développement et caractérisation

Après avoir conçu et développé un interféromètre de shearographie (FIG. 8.5), associé à son logiciel d'acquisition (FIG. 8.6) et de traitements d'images, ce dispositif a été qualifié métrologiquement [A8].

La qualification métrologique est une étape importante dans la mise au point d'un dispositif de mesure. Cette démarche fait appel non seulement à une partie de ma formation initiale, suivie au Conservatoire National des Arts et Métiers mais aussi à mon premier poste occupé au LCPC en tant que Métrologue du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées.



a) conception optique



FIGURE 8.5 – Interféromètre de shearographie du LCPC.



FIGURE 8.6 - Fenêtres du logiciel ISA2.

Le but de ce bilan métrologique consiste d'une part à donner une incertitude-type sur la différence de phase mesurée avec notre dispositif et d'autre part à identifier les facteurs d'influences sur la mesure. Durant mes travaux de thèse, nous avions proposé un premier bilan d'incertitude reposant sur une analyse statistique de différentes acquisitions d'images expérimentales de l'éclairement et sur l'estimation expérimentale directe de l'incertitude-type. Le dispositif utilisé à cette époque était un interféromètre de shearogaphie commercial. Nous avions montré que l'algorithme à quatre décalages de phase éliminait les covariances entre images d'éclairement. Dans ces conditions, l'incertitude de mesure sur la différence de phase était comprise entre  $2\pi/108$  et  $2\pi/145$  selon la méthode d'estimation.

En 2003, j'ai proposé une approche rigoureuse [A8] de l'estimation de l'incertitudetype de la différence de phase reposant sur le guide pour l'expression des incertitudes de mesure (« GUM ») [51]. Ce bilan tient compte du mode opératoire mis en œuvre dans l'étalonnage du dispositif déphaseur et dans la mesure de phase proprement dite. Les termes prépondérants d'incertitudes-types sur le déphasage sont l'incertitude de répétabilité de mesure des images d'éclairement ( $43 \times 10^{-3}rad$ ) et l'incertitude liée à l'étalonnage du dispositif déphaseur ( $12 \times 10^{-3}rad$ ). Il est intéressant de noter que le nombre de bits (8 bits) de la carte vidéo servant à numériser les images d'éclairement est suffisante pour cette application puisque cette numérisation conduit à une incertitude de  $3 \times 10^{-3}rad$ . La différence de phase  $\Delta \varepsilon$  est calculée par soustraction de deux images de phase. Sans tenir compte des covariances, dans le cas où l'on utilise l'algorithme à 4 décalages de phase [37], l'incertitude sur la différence de phase  $\Delta \varphi$  est égale à  $u (\Delta \varphi) = u (\varphi) \sqrt{2} \approx 64 \times 10^{-3}rad$ soit  $2\pi/98$ .



FIGURE 8.7 – Estimation expérimentale de l'incertitude de mesure de la différence de phase  $\Delta \varphi$  à partir de l'histogramme des valeurs de phase prises par chaque pixels.

Ce bilan d'incertitude est en bon accord avec une évaluation expérimentale de l'incertitude. En effet, pour mesurer le bruit associé à la chaîne de mesure complète, une méthode expérimentale simple et rapide consiste à enregistrer la différence de phase  $\Delta \varphi$  dans une zone où l'objet n'a subi aucune déformation. La largeur à mi-hauteur de la différence de phase de cette zone (FIG. 8.7) est une bonne approximation de l'incertitude de mesure. Elle a été évaluée expérimentalement à  $2\pi/108$ .

Les mesures de la différence de phase réalisées par interférométrie de speckle, notamment par shearographie, peuvent ainsi être raccordées à l'unité de longueur du Système International des unités (SI) par l'intermédiaire de la longueur d'onde du laser utilisé. Les performances de notre dispositif de shearographie sont comparables aux meilleurs produits commerciaux avec l'avantage de maîtriser l'ensemble de la chaîne de mesure. Il est donc facile de l'adapter selon nos besoins.

### 8.4.3 Diagnostic par shearographie

La shearographie n'est finalement qu'un moyen de visualisation des déformations plein champ de la surface d'une structure. Pour en faire un dispositif d'auscultation, il est nécessaire de lui associer une sollicitation permettant de révéler les défauts recherchés au sein de la structure. Le problème réside en grande partie dans le choix de cette sollicitation.

Parmi les sollicitations envisageables associées à la shearographie, on trouve la sollicitation thermique par flash [52, 53, 54], la mise en vibration [55, 56, 57, 58, 59] et comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, la sollicitation ultrasonore utilisant les ondes acoustiques guidées dans le cas de structures minces [60, CI24]. Mais la mise en dépression est probablement la sollicitation la plus utilisée en contrôle non destructif [61, 62, 54]. On trouve dans la littérature, de nombreuses applications industrielles utilisant cette technique, comme par exemple le diagnostic des structures aéronautiques [63, 64] ou les réservoirs cryogéniques de propulseurs [65].

Avec ce type de sollicitation, il est possible de détecter un large spectre de défauts [66] aussi bien sur des structures composites (délaminage) que sur des structures collées. La différence de pression  $\Delta P$  imposée entre la surface extérieure et la lame d'air enfermée à l'intérieur du défaut, crée une déformation en forme de *bosse*. En général, quelques Pascal suffisent à induire une déformation mesurable par shearographie et ainsi révéler le défaut. Cela dépend essentiellement des propriétés mécaniques des matériaux sollicités et du rapport entre la largeur et la profondeur du défaut recherché [54].

La dépression peut être appliquée de différentes manières, soit au moyen d'une ventouse transparente permettant de viser la surface comme nous l'utilisons (FIG. 8.12), soit en intégrant l'interféromètre de shearographie à « l'intérieur » de la ventouse comme certains industriels le proposent.

# 8.4.4 Simulation de la déformation d'une surface sollicitée par dépression

Afin d'évaluer le potentiel de la méthode dans notre cas, nous cherchons à calculer la réponse mécanique d'un échantillon. Notre échantillon est composé d'une ou plusieurs couches de composite et de colle et enfin d'un substrat, le béton. On s'intéresse alors à la déformation anormale de la surface du composite au droit d'un défaut. Les défauts à détecter sont de deux types : soit une absence totale de colle entre deux couches de composite ou entre la dernière couche de composite et le béton, soit une mauvaise qualité de colle.

Pour simplifier les simulations, nous considérons le composite comme un matériau orthotrope. Le béton et la colle sont considérés comme des matériaux isotropes. Le décollement, caractérisé par un diamètre, est simulé en supprimant la colle (FIG. 8.8). Le problème présente alors une symétrie de rotation autour de l'axe z, il est donc possible de se limiter à une étude 2D axi-symétrique. Nous utilisons un logiciel du commerce de calculs par éléments finis, COMSOL [67], pour résoudre l'équation d'équilibre :

$$div \ \sigma = 0 \tag{8.3}$$

où  $\sigma$  est le tenseur des contraintes mécaniques données par la loi de Hooke  $\sigma = C\varepsilon$  avec C et  $\varepsilon$  respectivement les tenseurs de rigidité et de déformation.

Les épaisseurs des différentes couches de composite, de colle et du béton sont égales respectivement à 1 mm, 0, 2 mm et 20 mm. Le diamètre des défauts varie entre 10 mm et 40 mm. Les propriétés mécaniques des différents matériaux utilisés dans la simulation sont rappelés dans le tableau (TAB. 8.1).

Dans le cas d'un défaut de diamètre 40 mm et pour une dépression appliquée de 100 Pa, nous obtenons un maximum de déplacement w, au droit du défaut, de l'ordre de 65 nm (FIG. 8.9.a). Comme nous l'avons décrit précédemment, la shearographie est



FIGURE 8.8 – Géométrie du problème.

TABLE 8.1 – Propriétés mécaniques des différents matériaux, où E représente le module d'Young et  $\nu$  le coefficient de Poisson.

Béton	Colle époxy	Composite $(T300/914)$						
		caractérisé par son tenseur de rigidité [68]						
E = 33GPa	E = 5, 2GPa							
$\nu = 0.21$	$\nu = 0,38$		143,8	6, 2	6, 2	0	0	0 ]
		$C_{(GPa)} =$	6, 2	13, 3	6, 5	0	0	0
			6.2	6, 5	13, 3	0	0	0
			0	0	0	3, 6	0	0
			0	0	0	0	3, 6	0
			0	0	0	0	0	5,7



b) dérivé du déplacement  $\partial w / \partial x$ 

FIGURE 8.9 – Résultat d'un calcul par éléments finis dans le cas d'un défaut de diamètre 40 mm et pour une dépression de 100 Pa.

sensible à la dérivée de la composante normale des déplacements (8.2). Comme Lamarque l'a proposé dans ces travaux de thèse [54], nous définissons un contraste de la dérivée du déplacement défini par :

$$C_{\partial w} = \left(\frac{\partial w}{\partial r}\right) - \left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)^{sain} \tag{8.4}$$

En tenant compte de l'incertitude de mesure de notre dispositif, de la longueur d'onde du laser (0, 5  $\mu m$  et du taux de cisaillement  $\delta$  de l'ordre de 10 mm), le contraste minimum mesurable est de l'ordre de 5 × 10<sup>-7</sup>. En comparant la dérivée du déplacement calculé précédemment et le contraste minimum (zone hachurée dans (FIG. 8.9.b)), on montre que ce défaut est facilement détectable dans nos conditions. Evidemment, le contraste dépend du diamètre du défaut et de la dépression appliquée. La figure (FIG. 8.10) montre l'évolution de la dépression nécessaire pour produire un contraste de  $25 \times 10^{-6}$  en fonction du diamètre du défaut recherché.



FIGURE 8.10 – Evolution de la dépression nécessaire à produire un contraste de  $25 \times 10^{-6}$ en fonction du diamètre du défaut recherché.

#### 8.4.5 Eprouvettes de laboratoire

Avec la contribution d'un partenaire industriel du génie civil FREYSSINET, deux premières éprouvettes de béton renforcées par composite ont pu être fabriquées. Ces éprouvettes (FIG. 8.11), de  $300 \times 300 \ mm^2$ , sont renforcées par un tissu en composite de carbone. Les défauts de collage sont simulés en insérant des disques de polytetrafluoroethylene (Teflon) de 0, 5 mm d'épaisseur, entre le composite et le béton. Sur la première éprouvette, nous avons introduit quatre disques de diamètres variables : 10, 20, 30 et 40 mm. La seconde est constituée de quatre disques de diamètres identiques 40 mm, percés de trous (variables en nombre et en diamètre permettant de faire varier le pourcentage de masse de disque restant) afin de simuler des qualités de collage variables. Les éprouvettes ont été fabriquées selon les recommandations d'applications du constructeur du produit utilisé. Après fabrication, on considère que l'épaisseur de la couche de colle est de 0, 2 mm.

#### 8.4.6 Résultats de mesure par shearographie et dépression

Une première série d'essais a été réalisée en mesurant la déformation au moyen de la shearographie lorsqu'une dépression est appliquée par l'intermédiaire d'une ventouse transparente (FIG. 8.12). La ventouse est constituée de panneaux de Plexiglas<sup>©</sup> d'épaisseur 20 mm dont les dimensions hors tout sont de  $180 \times 180 \times 70 \text{ mm}^3$ .

La figure (FIG. 8.13.a) montre les résultats obtenus sur la première éprouvette. Pour imposer une différence de phase optique de l'ordre de  $2\pi$  (c'est-à-dire un contraste de la dérivée du déplacement de l'ordre de  $25 \times 10^{-6}$ ), il est nécessaire d'imposer une dépression croissante au fur et à mesure que le diamètre du défaut diminue. La figure (FIG. 8.14) compare les courbes, obtenues par simulation (FIG. 8.10) et expérimentalement, donnant la dépression imposée en fonction du diamètre du défaut. Nous trouvons un excellent accord entre ces deux courbes. Notons que l'étendue du défaut (diamètre) peut être me-



a) défauts de diamètre variable : éprou-b) défauts de diamètre 40 mm, simulant vette A1 une qualité de collage variable (0% : décollé sur toute la surface) : éprouvette A2

FIGURE 8.11 – Schémas des éprouvettes de béton renforcées par du tissu.



FIGURE 8.12 – Mise en œuvre de la shearographie dans le cas d'une sollicitation par dépression.



FIGURE 8.13 – Schémas des éprouvettes de béton renforcées par du tissu.

surée facilement connaissant le grandissement du dispositif de shearographie et le taux de cisaillement [54].

Les résultats obtenus sur la seconde éprouvette (FIG. 8.13.b) permettent de montrer qualitativement l'évolution de la dépression nécessaire à appliquer pour obtenir une déformation constante en fonction de la qualité du collage dans le cas d'un défaut de diamètre constant. Plus il y a de trous dans le disque de Teflon, plus le collage est parfait et plus la dépression doit être grande pour déformer localement le composite comme le montre la figure (FIG. 8.15). Cette dernière expérimentation permet de mieux appréhender le problème de l'identification des propriétés du défaut comme son diamètre, sa profondeur et la qualité du collage.

D'autres types de sollicitations existent notamment la sollicitation thermique. Bien que Lai & al. [45] ont montré que la shearographie associée à une sollicitation thermique permet de détecter et d'estimer l'étendue du défaut, elle ne permet pas d'estimer sa profondeur. Pour pallier ce problème, nous avons mis en œuvre la thermographie infrarouge pulsée.

# 8.5 Mise en œuvre de la thermographie infrarouge pulsée

Depuis de nombreuses années, la thermographie infrarouge stimulée ou plus exactement pulsée, est une technique utilisée pour le contrôle de structures aéronautiques. Cette technique permet avec une facilité déconcertante, si on la compare à la shearographie, de détecter les défauts de type délaminage dans les structures en composite [69, 70, CI6] et



FIGURE 8.14 – Evolution de la dépression nécessaire à produire un contraste de  $25 \times 10^{-6}$  en fonction du diamètre du défaut recherché : comparaison calculs - mesures.



FIGURE 8.15 – Evolution de la dépression nécessaire à produire un contraste de  $25 \times 10^{-6}$  en fonction de la qualité de collage.



FIGURE 8.16 – Thermogramme au droit de deux zones, l'une saine, l'autre avec un défaut.

moyennant quand même du traitement du signal non trivial et certaines hypothèses, de remonter à la profondeur du défaut.

#### 8.5.1 Rappels

Nous n'allons pas détailler ici le principe de la méthode qui est largement décrit dans la littérature [70]. Nous allons nous contenter de rappeler succinctement le principe en se focalisant sur le traitement du signal que nous avons en partie développé permettant d'estimer la profondeur du défaut avec une bonne précision (faible incertitude).

Le principe consiste à chauffer la surface du composite pendant une période  $\tau$  et à enregistrer un film de la température de surface de l'échantillon au moyen d'une caméra thermique pendant la période de refroidissement en général (FIG. 8.16). Il existe de nombreuses techniques d'analyses d'images permettant la détection du défaut et en particulier la détermination de sa profondeur sous la surface du composite [71]. L'une des plus connues et probablement des plus anciennes consiste à visualiser l'évolution temporelle de la température de surface entre une zone réputée saine et le reste de l'image [69] (FIG. 8.16) puis à calculer le contraste thermique défini par la relation suivante :

$$C_T = \frac{T}{T^{sain}} - 1 \tag{8.5}$$

où  $T^{sain}$  et T sont respectivement les températures au droit de la zone réputée saine et sur le reste de l'image.

En faisant l'hypothèse que la diffusion de la chaleur se produit dans un milieu semiinfini et pour une période de chauffage  $\tau$  infiniment courte (Dirac), la profondeur du défaut d peut être estimée en mesurant le temps  $t_{max}$  pour lequel le contraste thermique est maximum en utilisant la relation suivante :

$$d = \sqrt{\alpha t_{max}} \tag{8.6}$$

où  $\alpha = \lambda/\rho c$  est la diffusivité thermique du matériau composite selon la direction perpendiculaire à la surface de l'échantillon avec  $\rho$ , c et  $\lambda$  respectivement la densité, la capacité calorifique et la conductivité thermique du composite.

Cette méthode peut être améliorée de plusieurs manières possibles : (i) en mesurant le temps  $t_0$  (FIG. 8.16) pour lequel le contraste thermique émerge du bruit de mesure [72] afin de rendre la méthode insensible à l'anisotropie du composite en termes de conductivité thermique; (ii) en normalisant le film par une image prise juste après la période de chauffage afin de tenir compte de la non uniformité de chauffage et du détecteur [73]; (iii) en tenant compte de la période finie de chauffage  $\tau$ . Nous allons nous intéresser à cette dernière amélioration car elle pose plusieurs problèmes.

La prise en compte de la durée de l'impulsion et de sa forme a été considérée par de nombreux auteurs notamment dans le cadre de la mesure de diffusivité thermique par la méthode flash [69]. La première correction à apporter consiste à prendre comme origine des temps, non pas le début de l'impulsion, mais son barycentre énergétique [74]  $t_g$  défini par la relation :

$$t_g = \frac{\int_0^\tau t\phi(t)dt}{\int_0^\tau \phi(t)dt}$$
(8.7)

avec  $\phi(t)$  une fonction décrivant l'évolution temporelle de l'impulsion.

Cependant cette correction ne suffit pas à estimer avec une bonne précision la profondeur du défaut lorsqu'on utilise l'expression (8.6). Cette estimation ne constitue qu'une première approximation de la profondeur. En effet, à mesure qu'on augmente la durée de l'impulsion, le temps pour lequel le contraste est maximum, est retardé. Peu de littérature existe sur ce dernier point. A notre connaissance, seuls les travaux de thèse de Krapez [75] considèrent cet effet dans le cas de matériaux homogènes et d'un défaut étendu (pas d'effet 2D). La figure (FIG. 8.17) donne l'évolution du nombre de Fourier au contraste maximum ( $F_0 = \alpha t_{max}/d^2$ ) en fonction du nombre de Fourier caractéristique de la durée d'impulsion  $F_{0\tau}$  ( $F_{0\tau} = \alpha \tau/d^2$ ). Les courbes sont paramétrées par la résistance thermique adimensionnée du défaut ( $R^* = R/(d/\lambda)$  où R représente la résistance thermique du défaut). Le décrochement vers  $F_{0\tau} = 10$  signifie que pour les impulsions plus longues, le contraste maximum est observé pendant l'impulsion et pas après. Le nombre de Fourier  $F_0$  ne varie donc plus. En tenant compte de la durée de l'impulsion, la profondeur du défaut s'écrit alors :

$$d' = \sqrt{\frac{\alpha t_{max}}{F_0}} \tag{8.8}$$

La procédure d'estimation de la profondeur d'un défaut à partir d'un thermogramme mesuré, consiste à estimer de manière grossière la profondeur à l'aide de l'expression (8.6) puis de déterminer les paramètres  $F_{0\tau}$  et  $R^*$  afin d'en déduire le nombre de Fourier  $F_0$  et d'estimer plus finement la profondeur à l'aide de l'expression (8.8) et ainsi de suite.


FIGURE 8.17 – Variation du nombre de Fourier  $F_0$  en fonction du nombre de Fourier caractéristique de la durée d'impulsion  $F_{0\tau}$ .



FIGURE 8.18 – Géométrie du problème.

#### 8.5.2 Simulation de la réponse thermique

De la même manière que pour la simulation mécanique, nous cherchons à calculer la réponse thermique d'un échantillon (composite / adhésif / béton) avec un défaut de collage et soumis à une impulsion de chaleur externe d'une durée finie. Nous supposons que le « chargement thermique » est appliqué uniformément sur la surface du composite. Pour des raisons de simplicité, les simulations sont limitées au cas d'un composite considéré comme un matériau orthotrope, le béton et l'adhésif étant considérés comme des matériaux isotropes. Le défaut est supposé être un disque de diamètre fini, caractérisé par un manque de colle (FIG. 8.18). Le logiciel d'éléments finis COMSOL [67] permet de résoudre l'équation de Fourier de transfert de chaleur :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = div \left(\lambda \ \mathbf{grad} \ T\right) \tag{8.9}$$

La géométrie du problème est en tout point identique au problème mécanique. Les propriétés thermiques des différents matériaux sont reportées dans le tableau (TAB. 8.2).

Material	$\rho$	c	$\lambda$	
	$(kg.m^{-3})$	$(J.K^{-1}.kg^{-1})$	$(W.m^{-1}.K^{-1})$	
Epoxy	1200	1200	0,2	
Concrete	2300	900	1,8	
Composite	1500	850	4, 2 dans le sens des fibres	
			0,7 perpendiculaire aux fibres	

TABLE 8.2 - Propriétés thermiques des matériaux utilisés.

La figure (FIG. 8.19.a) montre l'évolution de la température en surface du composite soumise à un flux de 1000  $W.m^{-1}$  pendant 1 s dans les cas d'une zone saine (sans défaut) et d'une zone avec défaut pour trois diamètres différents 20, 30 et 40 mm. L'amplitude et le temps d'apparition du contraste thermique maximum (FIG. 8.19.b) dépendent du diamètre du défaut comme cela est parfaitement connu [72]. Cependant, la mesure du temps auquel apparait le contraste maximum est facile à mettre en œuvre sur le terrain, ce qui n'est pas forcément le cas pour la mesure de  $t_0$ .

#### 8.5.3 Eprouvettes de laboratoire

L'éprouvette de laboratoire utilisée dans ces expériences (FIG. 8.20) de  $400 \times 300 \ mm^2$ , est renforcée en utilisant des plats de composite de largeur 100 mm et d'épaisseur 1, 2 mm collés par une couche d'ahésif d'épaisseur 1 mm environ. Cette éprouvette est constituée de trois diamètres de défauts (10, 20 et 30 mm) placés à trois profondeurs différentes : sous le premier plat, sous le deuxième et enfin sous le troisième (entre le béton et le dernier plat). Ainsi, cette éprouvette dispose de 9 défauts différents.

#### 8.5.4 Résultats de mesure par thermographie

La surface de l'éprouvette est chauffée pendant 50 s à l'aide d'une couverture chauffante (puissance électrique 1000W et de surface  $1 \times 0, 9 m^2$ ). La température de surface est mesurée pendant la période de refroidissement en utilisant une caméra infrarouge de



b) Contraste thermiques

FIGURE 8.19 – Thermogrammes et contraste thermiques calculés pour trois cas de diamètre de défaut de collage.



FIGURE 8.20 - Eprouvette de béton renforcée par des plats de composite.

 $320 \times 240$  pixels composés de microbolomètres. Sa résolution en température est de l'ordre de 80 mK dans une plage de température comprise entre  $-40^{\circ}C$  et  $+2000^{\circ}C$ . La réponse spectrale des détecteurs est comprise entre 7,5 et 13  $\mu m$ .

La figure (FIG. 8.21) montre une image thermique de la surface de l'échantillon enregistrée 40 s après la fin de la période de chauffage. Les thermogrammes (FIG. 8.22.a) et les contrastes thermiques correspondants (FIG. 8.22.b) sont mesurés au droit des défauts les plus larges (diamètre de 30 mm). Le maximum du contraste apparait 7 s, 33 s et 120 s après la fin de la période de chauffage respectivement en fonction de la profondeur du défaut. En utilisant notre procédure d'inversion décrite auparavant et après quelques itérations (FIG. 8.23), la profondeur des défauts est estimée avec une incertitude (à k = 2) de 1, 2 ± 0, 2 mm, 3.3 ± 0.3 mm et 6, 3 ± 0, 3 mm correspondant respectivement aux profondeurs théoriques de 1, 2, 3, 4 et 5, 6 mm.

Globalement, nous trouvons un bon accord entre les valeurs supposées connues et nos estimations. Cependant, pour le défaut le plus profond à 5, 6 mm, la température de la surface est proche de la température ambiante ce qui a pour effet de diminuer le contraste et d'induire une incertitude importante dans la détermination du temps auquel le contraste est maximum.

### 8.6 Conclusions et perspectives

De par la disponibilité commerciale des caméras de thermographie infrarouge et leur simplicité d'utilisation, cette technique est aujourd'hui couramment utilisée par les équipes en charge du contrôle de l'application des composites sur le béton.

Aujourd'hui, la thermographie est utilisée en génie civil de manière exclusivement qualitative. La durée et la puissance de chauffage ne sont pas pris en compte dans l'analyse des images qui se fait simplement visuellement. On détecte alors les plus gros défauts très rapidement sans pouvoir les caractériser précisément. Cependant, dans le cas de multicouches, il est nécessaire de faire le contrôle après chaque application d'une couche ce qui demande une disponibilité du personnel et du matériel qui peuvent parfois poser des



FIGURE 8.21 – Image thermique enregistrée 40 s après la fin de la période de chauffage.

problèmes.

Nos travaux de recherche reposant sur une analyse fine des thermogrammes permettent d'obtenir un diagnostic quantitatif des défauts tout en réduisant le nombre d'intervention sur site et sans pour autant utiliser du matériel onéreux. Nous avons montré sur des éprouvettes de laboratoire que sans complexifier énormément la méthode, il était possible d'estimer la profondeur des défauts avec une bonne incertitude. Nous travaillons dans ce sens avec l'équipe du Laboratoire Régional d'Autun afin de rédiger une méthode d'essai mettant en œuvre la thermogrpahie infrarouge afin de réaliser dans l'avenir des diagnostics quantitatifs.

Concernant la shearographie, des essais sur le terrain (FIG. 8.24) ont pu être tentés l'an passé [A2] en collaboration avec la société DANTEC Dynamics. Elle dispose d'un système d'auscultation reposant sur la shearographie intégrée à un système de succion. Malgré quelques difficultés liées à la rugosité des surfaces composites utilisées en génie civil, comparées à celles rencontrées en aéronautique, nous avons pu détecter des défauts de collage de diamètre inférieur à 10 mm (FIG. 8.25). Ces premiers essais vont permettre d'adapter rapidement ce dispositif aux exigences rencontrées en génie civil. Là encore, notre contribution se situe dans l'analyse des résultats des images de déformation en tenant compte de la sollicitation appliquée afin de d'estimer les caractéristiques géométriques des défauts de collage.

Nous allons poursuivre nos travaux sur ce sujet en se focalisant sur la détermination des propriétés d'adhésion des composites sur le béton, à la fois à travers des travaux de recherche, des essais en laboratoire et aussi des inspections sur ouvrage.



FIGURE 8.22 – Température de surface et contraste thermique en fonction du temps enregistrés au droit des défauts de diamètres 30 mm se situant à trois profondeurs différentes : 1, 2, 3, 4 et 5, 6 mm.



FIGURE 8.23 – Estimation itérative de la profondeur des défauts.



a) ouvrage renforcé par des tissus en composite b) dispositif de shearographie portable utilisé (Q-810 Dantec Dynamics)

FIGURE 8.24 – Inspection d'un ouvrage renforcé par du composite en utilisant un dispositif de shearographie portable.



a) décollement



b) mauvais collage entre deux couches de tissus de composite

FIGURE 8.25 – Exemple de défauts détectés.

# Chapitre 9

# Diagnostic des conduits de précontrainte extérieure

# 9.1 Introduction

De nombreux ouvrages en béton comportent des câbles de précontrainte extérieure que ceux-ci aient été mis en œuvre dès la construction (depuis 1980) ou comme procédé de renforcement de la structure (depuis 1970). Il existe différents types de protection de ces câbles. Jusqu'en 2001, ils étaient très majoritairement placés dans des conduits en polyéthylène haute densité (PEHD), où l'espace résiduel était rempli sous haute pression par un coulis à base de liant hydraulique. Suite à quelques ruptures de câbles de précontrainte extérieure protégés par du coulis de ciment directement au contact de l'acier (FIG. 9.1), la détection des anomalies d'injection au coulis de ciment [76] est devenue une préoccupation des gestionnaires.

Les anomalies constatées sont des vides avec ou sans présence de produits humides comme du coulis non durci ou de la « pâte blanche » (issue de l'exsudation de coulis « instables » pendant la prise), voire avec présence d'eau. Ces anomalies favorisent l'oxydation et la corrosion des torons qui peuvent conduire à la rupture des câbles sous tension [77].

Déceler visuellement des défauts d'injection dans des conduits opaques est impraticable



a) intérieur d'un caisson de pont



b) rupture de câbles de précontrainte extérieure

FIGURE 9.1 – Exemple de précontrainte extérieure.

de l'extérieur et les procédures d'auscultation habituellement utilisées s'avèrent inappropriées, car locales et destructives (ouvertures du conduit [78]), peu commodes (rayons gamma) et coûteuses. La méthode usuelle reste encore aujourd'hui le sondage au marteau. Cependant, cette méthode ne permet pas de déceler la présence de pâte blanche. Dans ces conditions, l'établissement d'un véritable diagnostic passe par la mise au point de nouveaux outils d'investigation non destructifs, délivrant des informations qualitatives voire quantitatives.

Les méthodes électromagnétiques se sont révélées être performantes dans des cas similaires. En particulier, la mesure capacitive est mise en œuvre pour estimer quantitativement la teneur en eau du sol [79], du ciment [80], ou des produits agricoles [81]. Cette technique permet également d'évaluer la porosité des roches volcaniques [82], la concentration de bulle dans des fluides multiphasiques [83], etc. En outre, les détecteurs capacitifs sont utilisés pour la différenciation qualitative des matériaux comme le bois [84], pour caractériser les cellules biologiques [85], caractériser la neige pour prévenir du risque d'avalanche [86], et pour détecter des mines en plastiques enterrées [87]. La mesure capacitive fournit un outil non destructif [88] des propriétés diélectriques à micro-échelle, par exemple pour inspecter les composants électroniques [89] ou le contrôle durant leur procédé de fabrication [90].

Cette technique a donc fait l'objet de travaux de recherche depuis plusieurs décennies, notamment au sein du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, d'abord pour mesurer la teneur en eau des sols et matériaux granulaires [91, 92] et plus récemment pour l'évaluation non destructive des conduits de précontrainte extérieure [93] et enfin le béton de peau [94].

Dans le cadre de l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure, l'approche largement privilégiée était essentiellement axée sur le développement de méthodes et l'amélioration d'un capteur existant visant à établir la faisabilité du procédé. Un obstacle majeur à l'emploi de cette technique était lié d'une part à la caractérisation de la sonde (sensibilité, facteur d'influence...), d'autre part à l'interprétation des mesures en termes de caractérisation et d'identification de défauts : présence de vide ou d'eau dans le conduit, dégradations de l'enrobage, endommagements du câble (rupture de torons, corrosion...).

Mon travail a donc consisté dans un premier temps à simuler, par un modèle analytique et par éléments finis, la réponse de cette sonde capacitive. Cette étude [A6, CI9] a contribué ainsi à donner une première analyse « physique » de la technique d'auscultation en s'appuyant sur la confrontation des résultats de simulation et des résultats expérimentaux obtenus sur des éprouvettes ayant des défauts maîtrisés. Dans un second temps, un prototype commercial a été réalisé par le Centre d'Etudes et de Conception de Prototypes de Rouen et que j'ai qualifié métrologiquement afin qu'il puisse entrer au catalogue des matériels des Laboratoires des Ponts et Chaussées (FIG. 9.2).

Afin d'améliorer l'interprétation des résultats bruts fournis par la sonde, j'ai proposé à la direction scientifique du LCPC de financer une thèse sur ce sujet (thèse de Thierry Bore 2007-2010).

Cette thèse a pour but de développer un outil de simulation reposant sur le formalisme DPSM (Distributed Point Source Method) que nous présenterons brièvement afin de



FIGURE 9.2 – Sonde capacitive.



FIGURE 9.3 – Schéma de principe de la sonde capacitive.

concevoir un modèle numérique du capteur [CI7], de mettre au point un banc de mesures des caractéristiques électriques des matériaux et enfin de proposer des modèles d'interprétation des signaux issus de mesures expérimentales.

## 9.2 Principe de la sonde capacitive

Le principe de mesure consiste à placer deux électrodes sur la surface du conduit en (PEHD) (FIG. 9.3). Entre les électrodes, il existe une capacité électrique C dont la valeur dépend de la nature du conduit et des matériaux enfermés dans ce conduit. Les électrodes sont reliées à un oscillateur dont la fréquence de résonance  $f_{osc}$  dépend de la capacité électrique entre les électrodes. La fréquence de résonance de l'oscillateur varie autour de 30 MHz et peut s'écrire sous la forme :

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\tag{9.1}$$

où L représente une inductance interne à l'oscillateur.

Avant d'être mesurée, la fréquence de l'oscillateur est divisée électriquement par un facteur 2048. La fréquence mesurée est notée  $f_D$  et vaut environ 14, 6 kHz.



FIGURE 9.4 – Approximation de la sonde capacitive.

### 9.3 Modélisation électromagnétique de la sonde

#### 9.3.1 Modèle analytique

Avant de modéliser par éléments finis cette sonde capacitive dans son milieu d'emploi, il est intéressant de comprendre le fonctionnement électrique du capteur en lui-même et les capacités élémentaires mises en jeu lors d'une mesure.

Pour établir notre modèle analytique, la géométrie des électrodes est simplifiée en la considérant co-planaire (FIG. 9.4.a). En suivant les lignes de potentiels électriques à travers les différentes couches de matériaux d'une électrode à l'autre, on en déduit le modèle analytique de la capacité électrique. Il se représente sous la forme de deux capacités en séries dépendant du conduit en PEHD  $C_C$  et du matériau à l'intérieur de ce conduit  $C_M$ , elles mêmes en parallèles avec une capacité  $C_S$  représentant le support des électrodes (FIG. 9.4.b). La capacité électrique équivalente C s'écrit :

$$C = C_S + \frac{C_C \cdot C_M}{C_C + C_M} \tag{9.2}$$

où chaque capacité élémentaire peut s'écrire sous la forme  $C_i = \varepsilon_0 \varepsilon_i \chi$  avec  $\varepsilon_0$  la permittivité absolue dans le vide qui vaut 8,854188 × 10<sup>-12</sup> F.m<sup>-1</sup> [95],  $\varepsilon_i$  la permittivité électrique relative du matériau i (C, M ou S) et  $\chi$  le facteur géométrique des électrodes ( $\chi = La/e$ dans le cas d'un condensateur plan parallèle avec e = 10 mm la distance inter électrodes, L = 150 mm la longueur des électrodes et a = 10 mm la largeur des électrodes).

#### 9.3.2 Modèle éléments finis

Afin de tenir compte de la géométrie réelle du conduit et des défauts rencontrés, nous avons simulé par éléments finis (EF) la réponse du capteur capacitif. Ces calculs ont été réalisés avec le logiciel COMSOL [67].

En raison de la relative uniformité du champ électrique le long de l'axe du conduit comparé aux autres directions (section du conduit), la simulation se fait en deux dimensions (2D). Evidement, cette approche néglige les effets de bords des électrodes dans l'axe du conduit, ce qui représente une erreur infime. Nous utilisons un modèle électrostatique pour simuler la réponse du capteur posé sur le conduit de précontrainte puisqu'on considère que les matériaux sont homogènes et que leur réponse est linéaire. Le domaine  $\Omega$  représentant le conduit de précontrainte est divisé en sous domaines représentant les différents matériaux : acier, vide (air), ciment, pâte blanche. Le maillage utilise des mailles triangulaires par défaut. Le potentiel électrique  $\phi$  est déterminé par la résolution de l'équation de Laplace qui s'écrit :

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_i \nabla \phi) = 0 \tag{9.3}$$

A chaque nœud du maillage du domaine, la méthode par éléments finis calcule le potentiel électrique. Le champ électrique et la densité de flux électrique sont déduits du potentiel par les expressions suivantes :

$$E = -\nabla\phi \tag{9.4}$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_i E \tag{9.5}$$

Finalement, la capacité électrique entre les électrodes s'écrit :

$$C = \frac{1}{V_0^2} \int_{\Omega} D \cdot E \cdot d\Omega \tag{9.6}$$

où  $V_0$  est l'amplitude de la tension appliquée aux bornes des électrodes.

Les conditions aux limites sont prises comme étant égales à +1, 0 V sur une électrode, -1, 0 V sur l'autre, le reste des frontières extérieures sont considérées comme isolées électriquement.

#### 9.3.3 Une autre approche : modèle « DPSM »

Cette partie relève d'un travail important de la thèse de Thierry Bore [A1, CI7, CN3].

Développée initialement à l'ENS de Cachan par Dominique Placko [96, 97, 98], la technique nommée DPSM (Distributed Point Source Method) a été utilisée au départ pour l'étude de problèmes assez simples en contrôle non destructif de nature électromagnétique ou ultrasonore. Le but recherché était d'obtenir des modèles semi analytiques pour décrire l'interaction d'un capteur avec son environnement.

Ces modèles, présentés sous forme matricielle, étaient ensuite exploités dans des schémas d'inversion pour l'estimation de caractéristiques quantitatives d'un objet observé. Accompagnée par la montée en puissance rapide des moyens de calcul, cette méthode a pu être appliquée à des cas présentant une géométrie plus complexe et ainsi voir son champ étendu à des problèmes industriels plus vastes. La méthode est aujourd'hui utilisée pour favoriser les étapes de compréhension, de conception, et d'optimisation de systèmes de capteurs, puis exploitée dans la phase d'estimation des paramètres, qui nécessite la connaissance d'un modèle (rapide) des interactions entre les différents objets du problème. L'une des applications les plus complexes de cette méthode est actuellement sa mise en œuvre en imagerie quantitative de diffraction, comme l'imagerie de défauts dans des structures métalliques par courants de Foucault.



FIGURE 9.5 - Concept de modélisation par DPSM : cas d'une réfraction d'onde.

Sans rentrer dans le détail de l'écriture matricielle, cette technique de calcul semi analytique repose sur la superposition d'un ensemble de « points lumineux » dont les poids sont déterminés pour satisfaire l'ensemble des conditions aux limites du problème. Le principe consiste donc à substituer aux objets présents dans le système à modéliser, des couches de sources ponctuelles situées de part et d'autre de leurs interfaces (surfaces de capteurs, frontières entre deux milieux) (FIG. 9.5). La disposition des sources est associée à un maillage régulier de points tests situés sur les interfaces. Ces sources sont destinées à restituer les grandeurs physiques (champ, potentiel, pression, etc.) présentes dans le problème réel, et sont calculées pour vérifier les conditions aux limites sur les points tests répartis sur toutes les interfaces.

### 9.4 Caractérisation de la sonde capacitive

Pour nos premières simulations, à la fréquence de travail de l'oscillateur, nous avons estimé que la permittivité relative était égale à 2,5 pour le conduit en PEHD, 1 pour l'air, entre 5 et 15 pour le coulis (selon sa teneur en eau), 20 pour la pâte blanche et enfin 80 pour l'eau. Nous reviendrons plus en détails sur ces valeurs de permittivités relatives au paragraphe 9.5.

#### 9.4.1 Sensibilité en fonction de la permittivité relative

Avec les modèles analytique et par éléments finis établis juste avant, nous avons calculé la variation de la capacité électrique mesurée en fonction de la permittivité électrique du matériau inséré dans le conduit en PEHD (FIG. 9.6.a). La dérivée de cette courbe représente la sensibilité du capteur (FIG. 9.6.b).

Le capteur est très sensible à la présence de matériaux dont la permittivité électrique relative est comprise entre 1 et 30. A la fréquence de l'oscillateur (30 MHz), la permittivité



b) sensibilité

FIGURE 9.6 – Modélisation de la variation de capacité et de sa dérivée calculée avec le modèle analytique et par éléments finis en fonction de la permittivité électrique du matériau inséré dans le conduit.

électrique relative de l'eau est 4 fois supérieure à celle d'un coulis de ciment à forte teneur en eau. Pourtant, le capteur capacitif n'est pas en mesure de distinguer ces deux matériaux. Nous remarquons également un bon accord des résultats obtenus entre le modèle analytique et le calcul aux éléments finis.

#### 9.4.2 Sensibilité spatiale

En complément de la sensibilité de la capacité en fonction de la permittivité relative du matériau inclus dans le conduit (FIG. 9.6), il est intéressant de connaître la zone auscultée par le capteur capacitif.

Nous avons réalisé un modèle EF 2-D, dans lequel nous considérons un conduit rempli d'un matériau de permittivité relative  $\varepsilon_M^1$ . La capacité calculée vaut alors  $C_M^1$ . Une petite inclusion, de permittivité relative  $\varepsilon_M^2$  proche de  $\varepsilon_M^1$ , est introduite dans le conduit. Pour chacune des positions (x, y) de l'inclusion, la capacité calculée est notée  $C_M^2(x, y)$ . La



FIGURE 9.7 – Sensibilité spatiale du capteur capacitif pour un matériau de remplissage de permittivité moyenne égale à  $\varepsilon_M^1 = 5$ .

sensibilité peut alors être définie comme étant le rapport entre la variation de capacité et la variation de permittivité relative multipliée par un facteur tenant compte du rapport des surfaces entre l'intérieur du conduit  $S_c$  et celle de l'inclusion  $S_i$  [99] :

$$S(x,y) = \frac{C_M^2(x,y) - C_M^1}{\varepsilon_M^2 - \varepsilon_M^1} \frac{S_c}{S_i}$$
(9.7)

Le résultat de la sensibilité est représenté sous forme d'une section d'un conduit dans laquelle figure pour chaque position de l'inclusion, la valeur de la sensibilité (FIG. 9.7). Dans le cas d'un matériau de remplissage de permittivité relative de l'ordre de 5, correspondant à un coulis de ciment, la zone auscultée par la sonde capacitive est confinée au voisinage des électrodes.

#### 9.4.3 Etalonnage

Afin de comparer les résultats expérimentaux et de simulations, nous avons proposé une méthode d'étalonnage permettant de connaître la relation qui existe entre la fréquence de l'oscillateur mesurée et la capacité entre électrodes. Bien que très succinct, cet étalonnage a permis pour la première fois de comparer de manière quantitative les résultats simulés et mesurés.

L'étalonnage consiste à mesurer la fréquence de l'oscillateur après avoir mis en contact une condensateur de capacité connue sur les électrodes de la sonde. En tenant compte de l'équation donnant la fréquence de l'oscillateur (9.1), la capacité C peut se mettre sous la forme :

$$C = \frac{A}{f_{osc}^2} + B \tag{9.8}$$

où A et B sont les coefficients d'étalonnage à déterminer.

Bien que la capacité des condensateurs ne soit connue qu'à 20 % près de leur valeur nominale, cette incertitude reste suffisante pour réaliser notre étalonnage.



FIGURE 9.8 – Courbe d'étalonnage de la sonde capacitive.

A titre d'exemple, nous présentons une courbe d'étalonnage dont nous avons tiré les coefficients A et B par une méthode de moindres carrés.

#### 9.4.4 Qualification métrologique de la sonde

Dans le cadre du développement d'une sonde capacitive commerciale (2009), une étape importante dans le développement de matériel consiste à dresser un bilan métrologique qui sert à prononcer la qualification métrologique de celui-ci par le Délégué à la Normalisation et à la Qualité du LCPC.

Cette qualification métrologique donne de manière quantitative l'aptitude du matériel à répondre aux besoins pour lequel il a été développé tout en analysant les facteurs d'influence. Je me suis donc occupé de cette étape en 2009.

A partir des différents essais réalisés, nous avons dressé un bilan d'incertitude de la mesure de fréquence (TAB. 9.1). La principale composante d'incertitude est due à la reproductibilité de la mesure. La fréquence de mesure (après le diviseur) est mesurée avec une incertitude relative de 7,  $4 \times 10^{-3}$  correspondant au rapport entre l'incertitude-type (104 Hz) et une mesure dans l'air (14000 Hz). Cette incertitude est à comparer à la variation de fréquence en présence d'un vide dans le conduit qui est de l'ordre de 2,  $2 \times 10^{-2}$ c'est-à-dire 4 fois plus grande que l'incertitude de mesure (à k = 2).

Nous avons ainsi pu caractériser métrologiquement la sonde capacitive et montrer son aptitude à détecter des défauts d'injections dans les conduits de précontrainte extérieure. Cette sonde capacitive est au catalogue des Matériels des Laboratoires des Ponts et Chaussées (MLPC).

### 9.5 Mesure de la permittivité relative des matériaux

Afin de pouvoir comparer les résultats de simulations et expérimentaux sur des conduits, il est important de connaître les valeurs de permittivité électrique réaliste des matériaux utilisés dans les conduits de précontrainte extérieure. Ce travail a été une partie importante de la thèse de Thierry Bore.

Les matériaux comme le coulis de ciment, le conduit en PEHD ou pis encore la pâte blanche et la cire pétrolière sont mal connus du point de vue de leurs caractéristiques élec-

Composante de l'incertitude	Valeur	Sensibilité	Loi de dis-	Incertitude
			tribution	(Hz)
			(coef.)	
Répétabilité / Reproductibilité	163 Hz	1	Uniforme	47,1
			$(1/2/\sqrt{3})$	
Influence de l'humidité relative	30à $80~%$	-0,08 Hz/%	Uniforme	1,2
			$(1/2/\sqrt{3})$	
Influence de la température	$\pm 5 C$	-3,4 Hz/C	Uniforme	9,8
			$(1/2/\sqrt{3})$	
Influence de l'ovalisation des	50 Hz	1	Uniforme	14,4
conduits $\leq 10~\%$ du diamètre initial			$(1/2/\sqrt{3})$	
Influence de la préemption du cap-	22 Hz	1	Uniforme	6,4
teur capacitif			$(1/2/\sqrt{3})$	
Influence du changement d'élec-	32 Hz	1	Uniforme	9,2
$\operatorname{trodes}$			$(1/2/\sqrt{3})$	
Influence de la vitesse de déplace-	30 Hz	1	Uniforme	8,7
ment			$(1/2/\sqrt{3})$	
Incertitude-type composée				52
Incertitude d'utilisation (k=2)				104

 TABLE 9.1 – Bilan d'incertitude sur la mesure de fréquence.

triques. Il était donc important d'améliorer la connaissance de ces matériaux notamment en fonction de la fréquence appliquée. Grâce à un partenariat avec la société ANRITSU et l'Institut Fresnel, nous avons pu développer une cellule coaxiale dans laquelle on introduit l'échantillon à caractériser (FIG. 9.9). Cette cellule est reliée à un analyseur de réseau électrique qui mesure les paramètres [S] (de l'anglais *Scattering parameters*) de n'importe quel quadripôle. Les mesures sont analysées par le logiciel EpsiMu© développé par l'Institut Fresnel [100]. Il utilise l'inversion de Nicolson-Ross-Weir [101, 102, 103] et permet d'extraire, des paramètres [S], la permittivité électrique et la perméabilité magnétique relatives de l'échantillon placé dans la cellule en fonction de la fréquence.

La variation de permittivité électrique en fonction de la fréquence peut être décrite par un phénomène de relaxation de type Debye [104] modifié par Cole et Cole [105] :

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\frac{f}{f_r}} - j\frac{\sigma_S}{2\pi f\varepsilon_0}$$
(9.9)

avec  $\varepsilon_S$  et  $\varepsilon_{\infty}$  respectivement la permittivité statique et à haute fréquence  $(f \gg f_r)$  où  $f_r$  est la fréquence de relaxation,  $\sigma_S$  la conductivité électrique statique.

De nombreux travaux de recherche se sont intéressés à caractériser l'eau, qu'elle soit sous forme de liquide ou de solide [106], en fonction de la température ou de la salinité [107, 108]. On peut également citer les travaux de Al-Qadi [109] et Davis [110] qui se sont intéressés à caractériser électriquement des matériaux de construction comme le béton. A titre d'exemple, nous présentons des résultats (FIG. 9.10) de mesures de permittivité électrique en fonction de la fréquence entre 100 MHz et 1 GHz sur de l'air ( $\varepsilon_r = 1$ ) afin



FIGURE 9.9 – Banc de mesure des caractéristiques électriques d'échantillons.

de valider notre banc puis sur des matériaux très peu connus du point de vue électrique comme la pâte blanche et la cire. La partie réelle de la permittivité électrique relative de la pâte blanche atteint une valeur d'environ 30 entre 100 MHz et 1 GHz. La partie imaginaire permet d'accéder à la conductivité électrique du matériau qui est estimée à 1,32  $S.m^{-1}$ . Sur la même plage fréquentielle, le conduit en PEHD a une permittivité de l'ordre de 2,5 et le coulis de ciment compris entre 5 et 7 selon le rapport de quantité d'eau sur ciment. On remarque que la permittivité de la cire est du même ordre de grandeur de celle du PEHD ce qui explique que l'auscultation des conduits remplis de cire soit impossible en pratique avec la sonde capacitive.

### 9.6 Comparaisons modélisation - mesure

Après avoir présenté différentes approches pour modéliser le fonctionnement de la sonde capacitive et après l'avoir caractérisée, nous allons donner un aperçu des travaux concernant la comparaison entre des résultats issus de calculs et des mesures expérimentales. Nous présenterons des résultats obtenus sur une éprouvette de laboratoire d'un conduit de précontrainte extérieure présentant un défaut d'injection typique puis des mesures expérimentales lors d'une auscultation sur un ouvrage.

#### 9.6.1 Eprouvette de laboratoire

L'éprouvette utilisée est constituée d'un conduit en PEHD de 500 mm de long, de diamètre extérieur 90 mm et d'épaisseur 5 mm contenant un coulis en forme de biseau, surmonté d'une couche biseautée de pâte blanche, surmontée enfin d'une couche d'air (FIG. 9.11). L'éprouvette est obturée par deux bouchons hermétiques afin de conserver au mieux l'humidité de la pâte blanche. Le conduit de précontrainte est dépourvu de torons métalliques. Du point de vue électrostatique, cette configuration est très proche de la réalité puisque les produits responsables de la corrosion peuvent se situer dans la partie supérieure du conduit et les câbles dans sa partie inférieure par exemple en haut d'un passage de déviateur.

Des mesures angulaires ( $0^{\circ} \leq \theta \leq 360^{\circ}$ ) ont été réalisées selon une section d'abscisse  $x = 265 \ mm$ . Pour les modélisations, nous considérerons alors un conduit simplifié où les









FIGURE 9.10 – Mesure de la permittivité relative des matériaux.



FIGURE 9.11 – Schéma de l'éprouvette de laboratoire représentant un conduit de précontrainte extérieure; à droite, la section du conduit à l'abcsisse x = 265 mm.

épaisseurs d'air et de pâte blanche sont constantes sur la longueur des électrodes et égales respectivement à 15 mm et 6 mm.

La fréquence mesurée, convertie en capacité grâce à la courbe d'étalonnage de la sonde capacitive (FIG. 9.8), est représentée en fonction de l'angle  $\theta$  (FIG. 9.12). Sur cette figure (FIG. 9.12), nous comparons des courbes obtenues à la fois expérimentalement et par simulations (EF et DPSM).

Concernant les résultats de simulation, nous constatons un bon accord entre ceux calculés à l'aide du modèle éléments finis et du modèle DPSM. Ces courbes simulées sont par ailleurs très proches des courbes expérimentales mesurées sur l'éprouvette. Néanmoins, on peut remarquer un décalage des courbes expérimentales et simulées en fonction de l'angle (à  $\theta = 45^{\circ}$  et 315°). Ce décalage correspond à un angle d'environ 15° qui s'explique par le fait que d'une part la modélisation est 2D alors que le cas réel est 3D et d'autre part qu'il peut exister une différence de géométrie des différentes couches dans le cas réel (ménisque de coulis au bord de la zone remplie et du conduit).

La simulation par éléments finis fait apparaître une sorte d'oscillation lorsque les électrodes sont dans la partie basse du conduit (à 180°). Cela provient de l'adaptation du maillage aux conditions aux limites lorsqu'on souhaite traiter le problème de manière rapide et automatique en fonction de la position angulaire des électrodes sur le conduit. Cet artefact disparaît dès que le maillage est réalisé manuellement à chaque position angulaire des électrodes.

#### 9.6.2 Auscultation en vraie grandeur sur un ouvrage d'art

L'exemple ci-après décrit le cas d'un ouvrage sur lequel a été utilisée la sonde capacitive. Les investigations ont été réalisées par les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées d'Autun et de Toulouse avec la contribution du LCPC pour l'interprétation des mesures issues de la sonde capacitive.

Cette étude a fait l'objet, dans un premier temps, d'une inspection détaillée de la précontrainte extérieure qui consiste à une observation visuelle des conduits et surtout un sondage au marteau pour détecter la présence de « vides » à l'intérieur des conduits. Cette inspection a permis de constater la présence de défauts importants, susceptibles de



FIGURE 9.12 – Comparaison des résultats de mesures et calculés de la variation de capacité en fonction de l'angle mesurée à l'abcsisse x = 265 mm.

générer une dégradation de la précontrainte.

Puis dans un deuxième temps, le LRPC d'Autun et le LCPC ont procédé à une auscultation de ces conduits à l'aide de la sonde capacitive ce qui a permis :

- de confirmer la présence de vides le long du conduit (FIG. 9.13.a),
- de déceler des vides non repérés lors du sondage au marteau,
- de localiser des zones avec présence de pâte blanche et d'humidité (FIG. 9.13.b).

Les résultats ainsi obtenus à l'aide de la sonde ont été confirmés par la réalisation de fenêtres ou d'ouvertures circulaires (FIG. 9.13.c). Cependant, comme le laissait entrevoir l'étude sur la sensibilité en fonction de la permittivité, dans un cas d'un retrait rempli d'eau, une mesure circulaire n'a pas permis de prédire la présence d'eau.

#### 9.6.3 Méthode d'estimation de l'épaisseur d'air

Pour l'instant, l'estimation d'anomalies de remplissage se fait de manière qualitative. Grâce à une partie des travaux de thèse de Thierry Bore, nous avons montré tout récemment qu'il était très facile d'estimer l'épaisseur d'air à l'intérieur du conduit à partir d'une mesure angulaire.

Le principe consiste à mesurer la largeur à mi hauteur de la courbe donnant la variation de capacité (ou de fréquence) en fonction de la position angulaire sur le conduit (FIG. 9.12). Un modèle géométrique d'un conduit partiellement rempli permet de mieux comprendre l'évolution de la capacité mesurée au passage des électrodes (FIG. 9.14). Lorsque l'une des électrodes arrive au droit de la zone de remplissage alors que l'autre fait



a) mesure longitudinale selon une génératrice du conduit

b) mesure angulaire autour du conduit



c) photographie de l'ouverture du conduit au droit de la mesure angulaire

FIGURE 9.13 – Auscultation d'un conduit sur site.



FIGURE 9.14 – Modèle géométrique d'une section d'un conduit.

face à la zone non remplie, cette position correspond au changement brutal de capacité. On peut alors montrer que l'épaisseur d'air dépend de la largeur à mi hauteur  $\Delta \theta$  par la relation :

$$e_{air} = R_{int} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\Delta\theta}{2} + \alpha\right) \right] \tag{9.10}$$

avec  $R_{int}$  le rayon intérieur du conduit et  $\alpha$  un terme dépendant de la largeur angulaire des électrodes.

En considérant un conduit de précontrainte de diamètre extérieur de 90 mm et d'épaisseur 5 mm ( $R_{int} = 40 \text{ mm}$ ), des simulations en DPSM ont donc été réalisées en faisant varier à la fois l'épaisseur d'air entre 1 mm et 39 mm et la nature du matériau de remplissage pour quatre permittivités relatives égales à 5, 20, 40 et 60 (FIG. 9.15). A partir de ces simulations, nous avons reporté la variation d'épaisseur d'air en fonction de la largeur à mi hauteur de chacune des courbes précédentes (FIG. 9.16). Après un ajustement au sens des moindres carrés, nous estimons la valeur du terme  $\alpha$  (9.10) à 5,75°.

Nous remarquons que la largeur à mi hauteur est indépendante de la nature du matériau de remplissage.

Pour vérifier notre méthode d'estimation de l'épaisseur d'air, nous avons confectionné une éprouvette de laboratoire semblable à celle de la figure (FIG. 9.11). Puis, à différentes sections, c'est-à-dire pour différentes épaisseurs d'air dans le conduit, nous avons réalisé des mesures angulaires (FIG. 9.17.a). En utilisant notre méthode d'estimation (FIG. 9.16), nous avons estimé l'épaisseur d'air à partir des enregistrements. Après avoir coupé le conduit aux endroits de la mesure, nous avons mesuré l'épaisseur d'air réelle que nous comparons à notre estimation (FIG. 9.17.b). Compte tenu des incertitudes de mesures, notre méthode est parfaitement capable d'estimer quantitativement l'épaisseur d'air sans être gênée par le matériau remplissant le conduit, si toutefois celui-ci à une permittivité relative supérieure à celle du conduit.

Une méthode d'estimation de l'épaisseur de pâte blanche reste à mettre au point pour compléter le diagnostic.



FIGURE 9.15 – Simulation de la capacité en fonction de  $\theta$  pour 4 matériaux de permittivité relative.



FIGURE 9.16 – Variation de l'épaisseur d'air en fonction de la largeur à mi hauteur  $\Delta \theta$ .



a) Mesures de capacité en fonction de  $\theta$  pour b) Estimation de l'épaisseur d'air en fonction différentes épaisseurs d'air de l'épaisseur d'air mesurée (réelle)

FIGURE 9.17 – Estimation de l'épaisseur d'air à partir de mesures angulaires obtenues avec la sonde capacitive.

### 9.7 Conclusion

Aujourd'hui, la sonde capacitive est un outil parfaitement intégré dans le processus d'inspection des conduits de précontrainte extérieure en complément de l'inspection classique et pour le suivi dans le temps de la dégradation des conduits pathologiques [111, A6]. Nous participons régulièrement à des inspections directement sur ouvrages ou simplement pour donner un avis sur l'interprétation des mesures.

Néanmoins, il reste encore beaucoup de travail sur ce sujet de l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure. Certainement que les points les plus délicats restent la détection d'eau dans les conduits et l'auscultation des conduits remplis de cire.

Mais, le diagnostic du remplissage des conduits ne constitue finalement qu'une approche par défaut. En réalité, il faudrait être capable de faire un diagnostic de l'endommagement des câbles en acier eux mêmes. Nous envisageons de collaborer avec un industriel, sous forme d'une thèse CIFRE, afin de proposer une sonde hybride permettant de répondre en même temps à ce double objectif.

Par ailleurs, à travers le projet européen ISTIMES, et d'un post-doctorat (Bastien Roucariès) que j'encadre, nous développons une autre méthode d'auscultation des conduits de précontrainte extérieure. En effet, il est peut être bon de rappeler ici, que le contrôle de ces conduits n'est pas sans danger pour l'inspecteur en cas de rupture.

La méthode proposée se fonde sur le principe d'une auscultation TDR (acronyme de Time Domain Reflectomerty). L'idée est d'envoyer une impulsion électrique sur une ou plusieurs paires de conducteurs placés en surface du conduit et/ou utilisant les câbles d'acier eux mêmes puis d'analyser la réponse en retour. Nos premiers travaux se sont concentrés sur la simulation de la propagation d'une onde électrique dans le cas général d'une ligne dispersive. Nous avons également développé une méthode d'interrogation et d'inversion originales permettant de s'affranchir de la dispersion induite par les matériaux représentant un conduit de précontrainte.

# Chapitre 10

# Conclusion

A travers les deux exemples présentés dans ce manuscrit, nous nous apercevons que le contrôle non destructif des structures nécessite d'explorer plusieurs champs de la physique, ce qui rend cette activité passionnante.

A chaque fois, notre démarche consiste à analyser la problématique en lien avec une étude bibliographique afin de choisir la meilleure solution d'auscultation. Puis, une fois ce choix opéré, commence le travail de simulation dont les résultats sont comparés à des mesures expérimentales jusqu'à obtenir un accord satisfaisant. Ce n'est finalement qu'à ce moment là que l'on peut prétendre avoir compris une partie du problème. Vient ensuite une étape d'inversion, qui consiste à extraire du signal, l'information sur le

défaut ou la propriété du matériau que l'on cherche à évaluer. Cette activité, nous a conduit à plusieurs reprises à monter des collaborations scientifiques avec des laborateires universitaires et des industriels. Nos récultats nous encou

tifiques avec des laboratoires universitaires et des industriels. Nos résultats nous encouragent à poursuivre nos efforts afin de pouvoir proposer des méthodes et des matériels d'auscultation utilisables sur le terrain, comme cela est le cas pour la sonde capacitive.

# Chapitre 11

# Bilan

Mon activité de recherche s'est donc déclinée autour de deux thèmes bien distincts : le premier portant sur l'imagerie dans le brouillard pour des applications de sécurité routière et le second ayant trait au contrôle de santé des structures de génie civil pour des besoins de diagnostics et de maintenances.

L'aspect transverse des mes travaux m'a permis d'aborder une importante diversité d'applications, source d'enrichissements professionnels et personnels. J'ai eu la chance de rencontrer des interlocuteurs issus d'horizons multiples (chercheurs, ingénieurs, chefs de projets) et de compétences diverses (physiciens, chimistes). Mes travaux m'ont conduit naturellement à diversifier l'activité de valorisation sous forme d'articles, brevets, prototypes, méthodes d'essais, etc.

Mes travaux sur l'imagerie dans le brouillard, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, permettent aujourd'hui d'envisager des dispositifs opérationnels d'aide à la conduite. Ils reposent sur le tri des photons balistiques en exploitant différentes propriétés liées au de temps de vol ou à la longueur du chemin parcouru par les photons entre la source et la cible ou exploite des propriétés spectrales. Plusieurs dispositifs ont été proposés dont certains d'entre eux originaux faisant l'objet d'un brevet. La mise en place de partenariats industriels devraient permettre d'aboutir rapidement à des prototypes embarquables.

Mes travaux sur le contrôle de santé des structures est la suite de mes travaux de thèse, notamment ceux traitant de l'auscultation des composites de carbone collés sur le béton. Même si le chemin est encore long pour proposer une méthode de diagnostic fiable, utilisable sur le terrain et non destructive, j'ai montré que l'association de différentes techniques comme la shearographie et la thermographie infrarouge était certainement une voie adéquate et prometteuse. Le diagnostic des composites collés dépasse largement le domaine du génie civil pour revenir vers celui de l'aéronautique. La connaissance de lois de comportement mécanique et le problème du contrôle de l'intégrité des structures sont certainement deux points fondamentaux pour voir l'apparition massive de structures tout en composites.

Le second exemple présenté traite de l'auscultation du remplissage des conduits de précontrainte extérieure au moyen d'une sonde capacitive dont j'ai participé à son développement. Mes travaux de modélisation et de comparaison des résultats, issus de simulations et de mesures, ont contribué à intégrer ce dispositif dans le processus d'inspection des conduits.

Pour conclure ce mémoire, je souhaite souligner mon implication dans l'encadrement de doctorants et de post-doctorants. Cette activité, partie intégrante du métier de chercheur, se révèle particulièrement captivante sur le plan humain et nécessaire par la remise en question permanente qu'elle procure.

# Bibliographie

N.B. Les références bibliographiques alpha-numériques font références à mes travaux dont la liste se trouve dans la partie Publications, page 103.

- Chap. Semi-Monte Carlo light tracing applied to the study of road visibility in fog, DUMONT, E. Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods. Springer-Verlag, 1998, pp. 177-187
- [2] HAUTIÈRE, N.; AUBERT, D.; DUMONT, E.; TAREL, J.-P. Experimental validation of dedicated methods to in-vehicle estimation of atmospheric visibility distance. *IEEE* transactions on Instrumentation and measurement 57(10), 2008, pp. 2218–2225
- [3] HAUTIÈRE, N.; AUBERT, D.; DUMONT, E.; TAREL, J.-P. Towards fog-free in-vehicle vision systems through contrast restoration. *IEEE Conference on Computer Vision* and Pattern Recognition cvpr, 2007, pp. 1–8
- [4] LAROCHELLE, V.; MATHIEU, P.; SIMARD, J.-R. Two generations of Canadian active imaging systems : ALBEDOS and ELVISS. SPIE Infrared Technology and Applications XXV 3698, 1999, pp. 229–2435
- [5] WALKER, J. G.; CHANG, P. C. Y.; HOPCRAFT, K. I. Visibility depth improvement in active polarization imaging in scattering media. *Applied Optics* 39 (2000), pp. 4933-4941
- [6] DAVID, O.; KOPEIKA, N. S.; WEIZER, B. Range gated active night vision system for automobiles. Applied Optics 45 (2006), pp. 7248-7254
- BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley & Sons, 1983
- [8] MIDDLETON, W. E. K. Vision through the atmosphere. University of Toronto Press, 1952
- [9] DEIRMENDJIAN, D. Scattering and Polarization Properties of Water Clouds and Haze in the Visible and Infrared. *Applied Optics* 3 (1964), pp. 187
- [10] BELIN, E. : Utilisation de nouvelles techniques d'imagerie pour la vision en milieux diffusants, Université d'Angers, Diss., 2008
- [11] HUANG, D.; SWANSON, E.; LIN, C.; SCHUMAN, J.; STINSON, W.; CHANG, W.; HEE, M.; FLOTTE, T.; GREGORY, K.; PULIAFITO, C.; FUJIMOTO, F. Optical coherent tomography. *Science* 254 (1991), pp. 1178–1181
- [12] BEAUREPAIRE, E.; BOCCARA, A.; LEBEC, M.; BLANCHOT, L.; SAINT-JALMES, H. Full-field optical coherence microscopy. *Optics Letters* 23 (1998), pp. 244–246

- [13] DUBOIS, A.; VABRE, L.; BOCCARA, A.; BEAUREPAIRE, E. High-resolution full-field optical coherence tomography with a linnik microscope. *Applied Optics* 41 (2002), pp. 805–812
- [14] VABRE, L.; DUBOIS, A.; BOCCARA, A. Thermal-light full-field optical coherence tomography. *Optics Letters* 27 (2002), pp. 530–532
- [15] IZATT, J.; KULKARNI, M.; YAZDANFAR, S.; BARTON, J.; WELCH, A. In vivo bidirectional color doppler flow imaging of picoliter blood volumes using optical coherence tomography. *Optics Letters* 2 (1997), pp. 1439–1441
- [16] COLSTON, B.; SATHYAM, U.; DASILVA, L.; EVERETT, M.; STROEVE, P.; OTIS, L. Three dimensional OCT images from retina and skin. *Optics Express* 3 (1998), pp. 230–238
- [17] FELDCHTEIN, F.; GELIKONOV, G.; IKSANOV, R.; GELIKONOV, G.; KURANOV, R.; SERGEEV, A.; GLADKOVA, N.; OURUTINA, M.; REITZE, D.; WARREN, J. Three dimensional oct images from retina and skin. *Optics Express* 3 (1998), pp. 239–250
- [18] POLOLEANU, A.; ROGERS, J.; JACKSON, D.; DUNNE, S. Three dimensional oct images from retina and skin. Optics Express 7 (2000), pp. 292–298
- [19] STEPANOV, B. I.; IVAKIN, E. V.; RUBANOV, A. S. Recording two-dimensional and three-dimensional dynamics holograms in transparent substances. *Soviet Physics Doklady* 16 (1971), pp. 46
- [20] PETROV, M. P.; MIRIDONOV, S. V.; STEPANOV, B. I.; KULIKOV, V. V. Light diffraction and nonlinear image processing in electro-optic BSO. Opt. Commun. 31 (1979), pp. 301–304
- [21] HUIGNARD, J. P.; HERRIAU, J. P.; VALENTIN, T. Time average holographic interferometry with photoconductive electrooptic BSO crystals. *Applied Optics* 16 (1977), pp. 2796–2798
- [22] MARRAKACHI, A.; HUIGNARD, J. P.; HERRIAU, J. P. Application of phase conjugation in BSO crystals to mode pattern visualisation of diffuse vibrating structures. *Opt. Commun.* 34 (1980), pp. 15–18
- [23] HYDE, S.; BARRY, N.; JONES, R.; DAINTY, J.; FRENCH, P.; KLEIN, M.; WECHS-LER, B. Depthresolved holographic imaging through scattering media using photorefraction. *Optics Letters* 20 (1995), pp. 1331–1333
- [24] TROTH, R. C.; DAINTY, J. C. Holographic interferometry using anisotropic selfdiffraction in BSO. Optics Letters 16 (1991), pp. 53–55
- [25] POUET, B.; KRISHNASWAMY, S. Dynamic holographic interferometry by photorefractive crystals for quantitative deformation measurements. *Applied Optics* 35 (1996), pp. 787–794
- [26] DRIGGER, R. G.; VOLLMERHAUSEN, R. H.; DEVITT, N.; HALFORT, C.; BARNARD, K. J. Impact of speckle on laser range-gated shortwave infrared imaging system target identification performance. *Optical Engineering* 43 (2003), pp. 738
- [27] ESPINOLA, R. L.; JACOBS, E. L.; C. E. HALFORD, R. V.; TOFSTED, D. H. Modeling the target acquisition performance of active imaging systems. *Optics Express* 15 (2007), pp. 3816–3832
- [28] BUSCK, J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar. Optical Engineering 44 (2005), pp. 116001

- [29] ALBOTA, M. A.; HEINRICH, R. M.; KOCHER, D. G.; FOUCHE, D. G.; PLAYER, B. E.; O'BRIEN, M. E.; AULL, B. F.; ZAYHOWSKI, J. J.; MOONEY, J.; WILLARD, B. C.;; CARLSON, R. R. Applied Optics 41 (2002), pp. 7671
- [30] BUSCK, J.; HEISELBERG, H. Gated Viewing and High-Accuracy Three-dimensional Laser Radar. Applied Optics 43 (2004), pp. 4705–4710
- [31] ANDERSEN, J. F.; BUSCK, J.; HEISELBERG, H. Pulsed Raman fiber laser and multispectral imaging in three dimensions. *Applied Optics* 45 (2006), pp. 6198–6204
- [32] ANDERSSON, P. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images. Optical Engineering 45 (2006), pp. 034301
- [33] LAURENZIS, M.; CHRISTNACHER, F.; MONNIN, D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping. *Optics Letters* 32 (2007), pp. 3146–3148
- [34] ACI, Committee 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI, 2008
- [35] AFGC. Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites - Recommandations provisoires. Bulletin scientifique et technique de l'AFGC, 2007
- [36] FIB, Task Group 9. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. FIB bulletin 14, 2001
- [37] TAILLADE, F. : Association de la shearographie et des ondes de Lamb pour la détection rapide et quantitative des délaminages, Conservatoire National des Arts et Métiers, Diss., 2000
- [38] LEENDERTZ, J.A.; BUTTERS, J.N. An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. Journal of Physics E : Scientific Instruments 6 (1973), pp. 1107–1110
- [39] LAMB, H. On elastic waves in an elastic plate. Proc. Roy. Soc., Ser. A 93 (1917), pp. 114–128
- [40] ROYER, D.; DIEULESAINT, E. Ondes élastiques dans les solides : Tome 1. Paris : Masson, 1996
- [41] DAINTY, J. C. Laser speckle and related phenomena. Springer-Verlag, 1975
- [42] HUNG, M. Y. Y. Shearography and applications in nondestructive evaluation of structures. International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2006, pp. 1723–1730
- [43] GALIETTI, U.; LUPRANO, V.; NENNA, S.; SPAGNOLO, L.; TUNDO, A. Nondestructive defect characterization of concrete structures reinforced by means of FRP. *Infrared Physics & Technology* 49 (2007), pp. 218–223
- [44] VALLUZZI, M. R.; GRINZATO, E.; PELLEGRINO, C.; MODENA, C. IR thermography for interface analysis of FRP laminates externally bonded to RC beams. *Materials* and Structures 42 (2007), Nr. 1, pp. 25–34
- [45] LAI, W. L.; KOU, S. C.; POON, C. S.; TSANG, W. F.; NG, S. P.; HUNG, Y. Y. Characterization of Flaws Embedded in Externally Bonded CFRP on Concrete Beams by Infrared Thermography and Shearography. *Journal of Nondestructive Evaluation* 28 (2009), Nr. 1, pp. 27–35
- [46] HUNG, Yau Y. A speckle-shearing interferometer : a tool for measuring derivatives of surface displacements. *Optics Communications* 11 (1974), June, Nr. 2, pp. 132–135
- [47] HUNG, Y. Y. Image-shearing camera for direct measurement of surface strains. Applied Optics 18 (1979), Nr. 7, pp. 1046–1051
- [48] HUNG, Y. Y. Shearography : a novel and practical approach for nondestructive inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation* 8 (1989), Nr. 2, pp. 55–67
- [49] Chap. Phase-Shifting Holographic Interferometry, CREATH, K. Holographic Interferometry. Springer Series in Optical Science, 1994, pp. 109–150
- [50] Chap. Quantitative Determination of Displacements and Strains from Holograms, PRYPUTNIEWICZ, R. J. Holographic Interferometry. Springer Series in Optical Science, 1994, pp. 33–74
- [51] BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). International Organization for Standardization, 2008
- [52] PAOLETTI, D.; SPAGNOLO, G. S.; ZANETTA, P.; FACCHINI, M.; ALBRECHT, D. Manipulation of speckle fringes for non-destructive testing of defects in composites. *Optics & Laser Technology* 26 (1994), Nr. 2, pp. 99–104
- [53] FULTON, J. P.; DEATON, Jr.; B., J.; R. S. ROGOWSKI, M. N. Capabilities and limitations of electronic shearography for detection of cracks in thin plates. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* 13, 1994, pp. 365–372
- [54] LAMARQUE, T. : Caractérisation de délaminages par interférométrie de speckle à cisaillement avec sollicitation thermique ou mécanique., Université PARIS VI, Diss., 1998
- [55] PRYPUTNIEWICZ, R. J. Time-averaging holography in vibration analysis. Optical Engineering 24 (1985), pp. 843–848
- [56] HARIHARAN, P.; OREB, B.F. Stroboscopic Holographic Interferometry : application of digital techniques. *Optics Communications* 59 (1986), Nr. 2, pp. 83–86
- [57] NAKADATE, S. Vibration measurement using phase-shifting speckle-pattern interferometry. Applied Optics 25 (1986), pp. 4162–4167
- [58] TOH, S. L.; SHANG, H. M.; CHAU, F. S.; TAY, C. J. Flaw detection in composites using time-averages shearography. *Optics and laser technology* 23 (1991), pp. 25–30
- [59] PRYPUTNIEWICZ, R. J. Electronic shearography and electronic holography working side by side. *Proceedings of SPIE* 1821, 1992, pp. 27–37
- [60] BARD, B. A.; GORDON, G. A.; WU, S. Laser modulated phase stepping digital shearography for quantitative full-field imaging of ultrasonic waves. J. Acoust. Soc. Am. 103 (1998), pp. 3327–3335
- [61] CLARADY, J. F.; SUMMERS, M. Electronic holography and shearography NDE for inspection of modern materials and structures. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* 12, 1993, pp. 381–386
- [62] DEATON, Jr.; DEATON, J. B.; ROGOWSKI, R. S. Electronic shearography : current capabilities, potential limitations, and future possibilities for industrial nondestructive inspection. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* 12, 1993, pp. 395–402

- [63] NEWMAN, J. W. Shearographic inspection of aircraft structure. *Materials Evaluation* 49 (1991), Nr. 9, pp. 1106–1109
- [64] BOBO, S. : Shearographic inspection of a Boeing 737 / Federal Aviation Administration. 1991. – Forschungsbericht
- [65] BURLEIGH, D. D.; ENGEL, J. E.; KUHNS, D. R. Laser shearographic testing of foam insulating on cryogenic fuel tanks. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* 12, 1993, pp. 411–418
- [66] HUNG, Y.Y.; CHEN, Y.S.; NG, S.P.; LIU, L.; HUANG, Y.H.; LUK, B.L.; IP, R.W.L.; WU, C.M.L.; CHUNG, P.S. Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering* 64 (2009), Nr. 5-6, pp. 73–112
- [67] COMSOL. http://www.comsol.com
- [68] H. KACZMAREK, S. M. Comparative ultrasonic analysis of damage in CFRP under static indentation and low velocity impact. *Composite Science and Technology* 51 (1994), pp. 11–26
- [69] BALAGEAS, D.; DÉOM, A.; BOSCHER, D. Characterization and nondestructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method. *Materials Evaluation* 45(4) (1987), pp. 46
- [70] MALDAGUE, X. Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing. John Wiley & sons Inc., 2001
- [71] IBARRA-CASTANEDO, C.; GONZÁLEZ, D.; KLEIN, M.; PILLA, M.; VALLERAND, S.; MALDAGUE, X. Infrared Image Processing and Data Analysis. *Infrared Physics* 46 (2004), pp. 75–83
- [72] KRAPEZ, J.-C.; LEPOUTRE, F.; BALAGEAS, D. Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated thermography. 8th International Topical Meeting on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 1994
- [73] KRAPEZ, J.-C.; BOSCHER, D.; DELPECH, Ph.; DEOM, A.; GARDETTE, G.; BALA-GEAS, D. Time-resolved pulsed stimulated infrared thermography applied to carbonepoxy non destructive evaluation. *Quantitative Infrared Thermography*, 1992
- [74] DEGIOVANNI, A. Correction de longueur d'impulsion pour la mesure de la diffusivité thermique par méthode flash. International Journal of Heat and Mass Transfert 30(10) (1987), pp. 2199–2200
- [75] KRAPEZ, J.-C. : Contribution à la caractérisation des défauts de type délaminage ou cavité par thermographie stimulée, Ecole Centrale de Paris, Diss., 1991
- [76] ROY, R. L. Rhéologie et stabilité des matrices cimentaires et des coulis. T Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées. Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées, LCPC, 2006
- [77] BLACTOT, E.; BRUNET-VOGEL, C.; FARCAS, F.; GAILLET, L.; MABILLE, I.; CHAUSSADENT, T.; SUTTER, E. Electrochemical behaviour and corrosion sensitivity of prestressed steel in cement grout. WIT Transactions on Engineering Sciences 54 (2007)
- [78] DÉROBERT, X.; AUBAGNAC, C.; ABRAHAM, O. Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy. Nondestructive Testing and Evaluation International 35 (2002), pp. 541–548

- [79] FARES, A.; ALVA, A. K. Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. Soil Science Society of America Journal 64 (2002), pp. 311–318
- [80] SMITH, A.; ABÉLARD, P.; THUMMEN, F.; ALLEMAND, A. Electrical characterization as a function of frequency : application to aluminous cement during hydratation. *Cement and Concrete Composites* 24 (2002), pp. 477–487
- [81] NELSON, S. O. Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 41 (1992), pp. 116–122
- [82] RUST, A. C.; RUSSEL, J. K.; KNIGHT, R. J. Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91 (1999), pp. 79–96
- [83] KENDOUSH, A. A.; SARKIS, Z. A. A non-intrusive auto-transformer technique for the measurement of void fraction. *Experimental and Thermal Fluid Science* 13 (1996), pp. 92–97
- [84] STEELE, P. H.; KUMAR, L.: Detector for heterogeneous material. 1996. US Patent nř5,585,732
- [85] ASAMI, K. Characterization of heterogeneous system by dielectric spectroscopy. Progress in Polymer Science 27 (2002), pp. 1617–1659
- [86] LOUGE, M. Y.; FORSTER, R. L.; N. JENSEN, R. P. A portable capacitance snow sounding instrument. *Cold Regions Science and Technology* 28 (1998), pp. 73–81
- [87] MAMISHEV, A. V. : Interdigital dielectrometry sensor design and parameter estimation algorithms for non-destructive material evaluation, Massachusetts Institute of Technology, U.S.A, Diss., 1999
- [88] LOUGE, M. Y.; FORSTER, R. L.; JENSEN, N.; PATTERSON, R. New possibilities of increasing accuracy for non destructive testing. Part 1. Basic principles and application examples. Nondestructive Testing and Evaluation International 32 (1999), pp. 397– 401
- [89] RUPRECHT, M.; BENSTETTER, G.; HUNT, D. A review of ULSI failure analysis techniques for DRAMS. Part II : Defect isolation and visualization. *Microelectronics Reliability* 43 (2003), pp. 17–41
- [90] JEANDUPEUX, O.; MARSICO, V.; ACOVIC, A.; FAZAN, P.; BRUNE, H.; KERN, K. Use of the scanning capacitance microscopy for controlling wafer processing. *Microelectronics Reliability* 42 (2002), pp. 225–231
- [91] TRAN, NL.; AMBROSINO, R. Mesure de la teneur en eau des sols et des matériaux par une méthode capacitive. Bulletin des Ponts et Chaussées 60 (1972), pp. 155–165
- [92] BARON, JP.; TRAN, NL. Méthodes de mesure et de contrôle des teneurs en eau de matériaux dans les LPC. Bulletin des Ponts et Chaussées 87 (1977), pp. 85–96
- [93] DUPAS, A.; SUDRET, J. P.; CHABERT, A. : Méthode de diagnostic de câbles de précontrainte externe contenus dans des gaines. 2001. Brevet français FR0107719
- [94] DÉROBERT, X.; IAQUINTA, J.; KLYSZ, G.; BALAYSSAC, J.-P. Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *Nondestructive Testing and Evaluation International* 41 (2008), pp. 44–52

- [95] CODATA : Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants. http://physics.nist.gov/cuu/Constants/
- [96] PLACKO, D.; LIEBEAUX, N.; CRUAU, A.; KUNDU, T.: Procédé universel de modélisation des interactions entre au moins une onde et au moins un objet, la surface de chaque objet définissant une interface entre au moins deux milieux. 2005. – Brevet français FR2895584
- [97] PLACKO, D.; KUNDU, T. DPSM Distributed Point Source Method for Modeling Engineering Problems. John Wiley & Sons Publication, 2007
- [98] PLACKO, D.; LIEBEAUX, N.; KUNDU, T. : Method of Evaluating a Physical Representative of an Interaction between a Wave and an Obstacle. 2008. – US Patent No. US 7,403,879,B2
- [99] YAN, H.; SHAO, F.; WANG, S. Simulation study of capacitance tomography sensors. 1st World Congress on Industrial Tomography, 1999
- [100] SABOUROUX, P.; BOSCHI, P. EpsiMu un nouvel outil pour déterminer les caractéristiques électromagnétiques de matériaux dans le domaine des hyperfréquences. *Revue Electricité Electronique* 10 (2005), pp. 58–62
- [101] NICOLSON, A. M.; ROSS, G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 17 (1968), pp. 395–402
- [102] WEIR, W. W. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. Proc. IEEE 62 (1974), pp. 33–36
- [103] BAKER-JARVIS, J.; VANZURA, E. J.; KISSICK, W. A. Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission /Reflection Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 38 (1990), pp. 1096–1103
- [104] DEBYE, P. Polar molecules. Chemical cathalog company, 1929
- [105] COLE, K. S.; COLE, R. H. Dispersion and adsorption in dielectrics : I alternating current characteristics. J. Chemical Phys. 9 (1941), pp. 341–351
- [106] KAATZE, U. Microwave aquametry. IEEE Press, 1996
- [107] AYARI, M. Y. Marine oil-spills electromagnetic scattering model using twoscale model. ECPS 2005 Conference, 2005
- [108] HASTED, J. B. Aqueous dielectrics. Chapman and Hall, 1973
- [109] AL-QADI, I. L.; RIAD, S. M.; MOSTAF, R.; SU, W. Design and Evaluation of a Coaxial Transmission Line Fixture to Characterize Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials* 11 (1997), pp. 163–173
- [110] DAVIS, B.; GROSVENOR, C.; JOHNK, R.; NOVOTNY, D.; BAKER-JARVIS, J.; JA-NEZIC, M. Complex Permittivity of Planar Building Materials Measured With an Ultra-Wideband Free-Field Antenna Measurement System. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 112 (2007), pp. 67–73
- [111] KRETZ, T.; LACOMBE, J.-M.; GODART, B. Information note to raise awareness of existing structures with external prestressing protected by cement grout in contact with the tensile elements. *Information note No 29* (2007)

# Annexes

# Annexe A

# Curriculum Vitae

# A.1 Civilité

Frédéric TAILLADE

100 rue Pierre Brossolette 92 140 CLAMART

Né le 27 janvier 1971 à Talence (Gironde), Marié, 3 enfants

Téléphone professionnel : 01 40 43 51 24

 $Courriel\ professionnel: frederic.taillade@lcpc.fr$ 

# A.2 Expériences professionnelles

depuis 2003	Chargé de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris
2002	Ingénieur de Recherche au CNRS au Laboratoire de Météorologie Dynamique, Palaiseau
2001	Ingénieur de Recherche Post-Doctorant à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, Châtillon
de 1997 à 2000	Thèse de doctorat à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, Châtillon
de 1996 à 1997	Mémoire d'ingénieur au Bureau National de Métrologie Institut National de Métrologie - Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris
de 1991 à 1995	Maître Auxiliaire attaché de laboratoire à l'Ecole Nationale de Chi- mie Physique Biologie, Paris

# A.3 Formation

2000	Docteur en science spécialité : Lasers, Métrologie, Communication du Conservatoire National des Arts et Métiers. <i>Mention très honorable</i>
1997	Diplôme d'Etudes Approfondies : Lasers, Métrologie, Communication du Conservatoire National des Arts et Métiers. <i>Mention bien</i>
1997	Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers spécialité : Instrumentation Mesure Optique. <i>Mention très bien</i>

# A.4 Compétences

### Management

- Responsable d'un thème de recherche au LCPC sur le développement des méthodes optiques pour le génie civil et la sécurité routière (2005-2009),
- Responsable de la métrologie du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées : étalonnage d'instruments, qualification des matériels (2002-2005),
- Encadrement de cinq doctorants dont trois thèses CIFRE et d'un post-doctorant.

## Modélisation

- Simulation de scène de brouillard dans le visible et l'infrarouge,
- Simulation de la rétrodiffusion de la lumière par un brouillard : modèle analytique,
- Simulation numérique de mesures par interférométrie de speckle (holographie, shearographie) : création d'une boite à outil sous MATLAB,
- Calculs aux éléments finis sous COMSOL : mécanique, thermique, électrostatique,
- Modélisation et conception d'instruments optiques sous ZEMAX.

## Instrumentation

- Imagerie en milieu diffusant : tomographie à cohérence optique, crénelage temporel, vision active infrarouge,
- Diagnostic du collage composite/béton par thermographie et shearographie,
- Diagnostic des conduits de précontrainte extérieure par sonde capacitive,
- Mesure plein champ de déformation : shearographie, corrélation, projection de franges,
- Capteurs à fibres optiques,
- Caractérisation radiométrique d'instruments pour l'observation du climat.

## Enseignement

- Physique appliquée : électromagnétisme, IUT VITRY, 22h/an (2008-2010)
- Instrumentation-vision, Licence Pro, IUT Saint-Denis, 6h/an (2007-2010)
- Métrologie, ing. & tech., ENTPE Vaux-en-Velin, 6h/an (2002-2006)
- Métrologie, ing. & tech., formation interne LCPC-RST, 16h/an (2003-2005)
- Optique, ingénieurs, CNAM Paris, 28h/an (1998-1999)
- Optique, techniques du vide, informatique, BTS, ENCPB Paris, 250h/an (1991-1995)

# Annexe B

# Activités de recherche

## **B.1** Publications

#### B.1.1 Brevets

- [B1] TAILLADE, F.; DUMOULIN, J.; BOUCHER, V.: Dispositif de vision actif en infrarouge pour la vision dans le brouillard. 2010. – en cours de dépôt
- [B2] TAILLADE, F.; BELIN, E.: Capteur et système d'imagerie pour la détection à distance d'un objet. 2008. – n° 0858758

#### B.1.2 Articles dans des revues à comité de lecture

- [A1] BORE, T.; PLACKO, D.; TAILLADE, F. Capteur capacitif pour le contrôle non destructif de conduits de précontrainte dans les ouvrages d'art. Instrumentation Mesure Métrologie 10 (2010), pp. 9–32
- [A2] TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K.; AUBAGNAC, C.; MOSER, E. Shearography applied to the non destructive evaluation of bonded interfaces between concrete and CFRP overlays : From the laboratory to the field. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2010). accepté le 27 mai 2010
- [A3] HENAULT, J.-M.; MOREAU, G.; BLAIRON, S.; SALIN, J.; COURIVAUD, J.-R.; TAILLADE, F.; MERLIOT, E.; DUBOIS, J.-P.; BERTRAND, J.; BUSCHAERT, S.; MAYER, S.; DELEPINE-LESOILLE, S. Truly distributed optical fiber sensors for structural health monitoring : from the telecommunication optical fiber drawling tower to water leakage detection and concrete structure strain monitoring. Advances in Civil Engineering, special issue Structural Health Monitoring for Civil Structures : From the Lab to the Field (2010). – Article ID 930796, doi:10.1155/2010/930796
- [A4] TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K.; AUBAGNAC, C. Shearography and Pulsed Stimulated Infrared Thermography applied to a Nondestructive Evaluation of bonded FRP strengthening systems on concrete structures. *Construction and Building Materials* (2010). – accepté le 19 février 2010
- [A5] LANTICQ, V.; JIANG, S.; GABET, R.; JAOUËN, Y.; TAILLADE, F.; MOREAU, G.; AGRAWAL, G. P. Self-Referenced and Single-Ended Method to measure Brillouin Gain in Monomode Optical Fibers. *Optics Letters* 34(7) (2009), pp. 1018–1020

- [A6] TAILLADE, F.; AUBAGNAC, C.; LACROIX, C.; MALATERRE, D.; SAUSSOL, J.-L.; COTTINEAU, L.-M. Sonde capacitive : un outil de diagnostic des conduits de précontrainte extérieure. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées numéro spécial Instrumentation 272 (2008), pp. 107–122
- [A7] TAILLADE, F.; BELIN, E.; DUMONT, E. An analytical model for backscattered luminance in fog : comparisons with Monte Carlo computations and experimental results. *Measurement Science and Technology* 19:055302 (2008)
- [A8] TAILLADE, F. Metrological Analysis of Shearography. European Physical Journal -Applied Physic 35(2) (2006), pp. 145–148
- [A9] KRAPEZ, J.-C.; TAILLADE, F.; BALAGEAS, D. Ultrasound-lockin-thermography NDE of Composite plates with low power actuators. Experimental investigation of the influence of the Lamb wave frequency. *Quantitative Infra Red Thermography* Journal 2 (2005), pp. 191–206
- [A10] TAILLADE, F.; N.N.HOANG; JUMEL, J.; LEPOUTRE, F. Autofocusing system for a photothermal microscope. *Review of Scientific Instruments* (2003), pp. 543–544
- [A11] PANET, M.; TAILLADE, F. Simulation de la mesure par shearographie du taux de fissuration des aéroréfrigérants. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées 239 (2003), pp. 137–147
- [A12] JUMEL, J.; TAILLADE, F.; LEPOUTRE, F. Thermo-elastic properties characterisation by photothermal microscopy. European Physical Journal - Applied Physic 23(3) (2003), pp. 217–225
- [A13] TAILLADE, F.; SILVA, M. Z.; LEPOUTRE, F.; LECOLLINET, M.; PINOT, P. The mirage effect to probe the adsorption of organic molecules on the surface of the mass standards. *Metrologia* 38(3) (2001), pp. 107–114
- [A14] TAILLADE, F.; KRAPEZ, J.-C.; LEPOUTRE, F.; BALAGEAS, D. Shearographic visualization of Lamb waves in carbon epoxy plates interaction with delaminations. *The European Physical Journal-Applied Physics* 9 (2000), pp. 69–73
- [A15] TAILLADE, F.; CANIT, J.-C.; LEPOUTRE, F.; SILVA, M.; LECOLLINET, M.; PI-NOT, P. Une méthode purement optique pour évaluer la pollution lors du nettoyage de la surface des étalons de masse. Bulletin du Bureau national de métrologie 115 (1999), pp. 17–26

#### B.1.3 Livres et Chapitres de livres

- [L1] Chap. 9 Distributed Optical Fiber Sensors for Structural Health Monitoring : Upcoming challenges, LANTICQ, V.; GABET, R.; TAILLADE, F.; LESOILLE, S. Optical Fibre, New Developments. IN-TECH, Olajnica 19/2, 32000 Vukovar, Croatia, 2010, pp. 177–199
- [L2] Chap. B8 Méthodes optiques d'END, TAILLADE, F. Méthodologie d'évaluation non destructives de l'état d'altération des ouvrages en béton. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2005, pp. 329–352

#### B.1.4 Actes de congrès internationaux

[CI1] SIKALI MAMDEM, Y.; PHÉRON, X.; TAILLADE, F.; JAOUEN, Y.; GABET, R.; LANTICQ, V.; MOREAU, G.; BOUKENTER, A.; OUERDANE, Y. Two-dimensional FEM analysis of Brillouin gain spectra in acoustic guiding and acoustic antiguiding single mode optical fibers. *Comsol Conference*, 2010

- [CI2] HENAULT, J.-M.; SALIN, J.; MOREAU, G.; LESOILLE, S.; BERTAND, J.; TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K. Qualification of a truly distributed fiber optic technique for strain measurement in concrete structures. Ageing-Management of Nuclear Power Plants and Waste Disposal Structures (AMP 2010), 2010
- [CI3] HENAULT, J.-M.; SALIN, J.; MOREAU, G.; LESOILLE, S.; BERTAND, J.; TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K. Concrete structure monitoring by OFDR technique. 37th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2010
- [CI4] CHRISTNACHER, F.; POYET, J.-M.; LAURENZISA, M.; MOEGLINA, J.-P.; TAILLADE, F. Bistatic range-gated active imaging for vehicles by controlling of the headlights. SPIE Defense Security and Sensors, 2010
- [CI5] DUMOULIN, J.; IBARRA-CASTANEDO, C.; QUIERTANT, M.; TAILLADE, F.; BEN-DADA, A.; MALDAGUE, X. Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography. *Quantitative InfraRed Thermography*, 2010
- [CI6] TAILLADE, F.; DUMOULIN, J.; QUIERTANT, M.; IBARRA-CASTANEDO, C.; AU-BAGNAC, Ch.; MALDAGUE, X.; BENDADA, A. Active Infrared Thermography and Shearography applied to non destructive testing of bonded FRP strengthening systems on concrete structures. 10th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA2009), 2009
- [CI7] BORE, T.; TAILLADE, F.; PLACKO, D.; HIMBERT, M. Capacitive probe for non destructive inspection of external post-tensioned ducts : Modeling by DPSM Technique. 36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2009
- [CI8] TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K.; AUBAGNAC, C. Evaluation of bonded FRP strengthening systems for concrete structures using Infrared Thermography and Shearography. Proceedings of the 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering - NDTCE'09, 2009, pp. 385-390
- [CI9] TAILLADE, F.; AUBAGNAC, C.; COTTINEAU, L.-M. Capacitive probe for non destructive inspection of external post-tensioned ducts. 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2008, pp. 1512–1519
- [CI10] BELIN, E.; CHRISTNACHER, F.; TAILLADE, F.; LAURENZIS, M. Two full-field imaging systems for vision in fog based on a temporal and spatial selection of ballistic photons. SPIE Optics+Photonics 7088, 2008, pp. O880
- [CI11] TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; TOURNEUR, C. Non destructive evaluation of FRP bonding by shearography. *Third International Conference on FRP Composites* in Civil Engineering, 2006, pp. 327–330
- [CI12] TAILLADE, F.; KRAPEZ, J.-C.; OSMONT, D.; BALAGEAS, D. Shearographic imaging of Lamb waves interaction with damage in composite. Workshop : Frontiers of Structural Health Monitoring, 2004
- [CI13] BOURQUIN, F.; CAUSSIGNAC, J.-M.; DELEPINE-LESOILLE, S.; LE CAM, V.; TAILLADE, F. Advances in acoustic emission, fiber optics sensing and global optical methods for civil structures. Workshop ESF/NSF, 2003

- [CI14] TAILLADE, F.; KRAPEZ, J.-C.; OSMONT, D. Simulation fo shearography applied to the assement of cracks in an air cooler. 3rd International Conference on Emerging Technologies in non-Destructive Testing, 2003
- [CI15] TAILLADE, F.; N.N.HOANG; JUMEL, J.; LEPOUTRE, F. Autofocusing system for a photothermal microscope. 12th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 2002, pp. 543–544
- [CI16] OSMONT, D.; DEVILLERS, D.; TAILLADE, F. Health monitoring of sandwich plates based on the analysis of the interaction of Lamb waves with damages. SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials 4327, 2001, pp. 290–301
- [CI17] JUMEL, J.; LEPOUTRE, F.; TAILLADE, F. A new photothermal microscope for microscopic thermo elastic characterization. 28th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2001, pp. 1110–1117
- [CI18] OSMONT, D.; DEVILLERS, D.; TAILLADE, F. A piezoelectric based health monitoring system for sandwich plates submitted to damaging impacts. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering 3986, 2000, pp. 85–92
- [CI19] OSMONT, D.; TAILLADE, F.; DEVILLERS, D.; LEPOUTRE, F.; BALAGEAS, D. Shearographic imaging of the ultrasonic wave and defect interaction in plates : Comparison between computation and experiment. 26th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 509, 2000, pp. 853–857
- [CI20] DEVILLERS, D.; TAILLADE, F.; OSMONT, D.; BALAGEAS, D.; ROYER, D. Interaction of Lamb waves with defects in composite sandwich structures. European Congress COST F3 on Health monitoring and damage detection, 2000
- [CI21] HERMOSILLA-LARA, S.; POULAIN, L.; KRAPEZ, J.-C.; TAILLADE, F. Measurements of Strains by Optical Interferometry. International conference on Trends in Optical Nondestructive Testing, 2000, pp. 343–349
- [CI22] DEVILLERS, D.; TAILLADE, F.; OSMONT, D.; KRAPEZ, J.-C.; LEMISTRE, M.; LEPOUTRE, F. Shearographic imgaging of the interaction of ultrasonic waves and defects in plates. SPIE 5th Annual International Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure 3993, 2000, pp. 142–149
- [CI23] TAILLADE, F.; SILVA, M. Z.; LEPOUTRE, F.; LECOLLINET, M.; PINOT, P. The mirage effect to probe the adsorption of organic molecules on the surface of the mass standards. 26th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 509, 2000, pp. 1873–1880
- [CI24] TAILLADE, F.; KRAPEZ, J.-C.; LAMARQUE, T.; BALAGEAS, D. Shearographic : a tool for imaging Lamb waves in composites and their interaction with delamination. *Review of Progress in Quantititative Nondestrutive Evaluation* 18, 1998, pp. 905– 912

#### B.1.5 Actes de congrès nationaux

[CN1] SIKALI MAMDEM, Y.; PHÉRON, X.; TAILLADE, F.; JAOUEN, Y.; GABET, R.; LANTICQ, V.; MOREAU, G.; BOUKENTER, A.; OUERDANE, Y. Prise en compte du profil de dopage pour l'analyse modale des spectres Brillouin de fibres optiques monomodes. *Journées Nationales d'Optique Guidée*, 2010

- [CN2] TAILLADE, F.; BELIN, E.; DUMOULIN, J.; DUMONT, E.; CHRISTNACHER, F.; BOUCHER, V. Dispositifs de vision tout temps - Aide à la conduite. *Prévention des Risques et Aides à la Conduite*, 2010
- [CN3] BORE, T.; TAILLADE, F.; PLACKO, D.; HIMBERT, M. Contrôle des conduits de précontraintes des ouvrages d'art par sondes capacitives : approches expérimentale et théorique comparées. *Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation* 1, 2010.
   – conférence invitée, pp. 38–46
- [CN4] TAILLADE, F. Analyse métrologique de la shearographie. Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation 1, 2004, pp. 109–116
- [CN5] TAILLADE, F.; GOYAT, Y.; MUZET, V.; GUILLARD, Y.; CAUSSIGNAC, J.-M. La shearographie une méthode optique plein champ pour l'auscultation des ouvrages d'art. Journée des Sciences de l'Ingénieur, 2003, pp. 463–468
- [CN6] TAILLADE, F. Analyse métrologique de la shearographie. Colloque Contrôles et Mesures Optique dans l'Industrie, 2003, pp. 303-309
- [CN7] TAILLADE, F.; OSMONT, D.; KRAPEZ, J.-C. Visualisation par shearographie de l'interaction ondes de Lamb/défauts dans des plaques composites : comparaison calculs et expériences. *Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation*, 2001
- [CN8] JUMEL, J.; TAILLADE, F.; LEPOUTRE, F.; ROGER, J.-P.; FOURNIER, D. Un microscope photothermique pour caractériser les propriétés thermoélastiques microscopiques. *Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation*, 2001
- [CN9] TAILLADE, F.; OSMONT, D.; KRAPEZ, J.-C. Visualisation par shearographie de l'interaction ondes de Lamb / défauts dans des plaques composites : comparaison calculs et expériences. Colloque Contrôles et Mesures Optique dans l'Industrie, 2000

#### B.1.6 Articles dans des revues technico-professionnelles

[RT1] TAILLADE, F. Mesure de phase par shearographie : estimation de son incertitudetype. Revue de l'Electricité et de l'Electronique, 2007, pp. 61–66

#### **B.1.7** Autres communications

- [C1] TAILLADE, F. Vision à travers les milieux diffusants : de la simulation au développement de dispositifs. Journée de clôture de l'opération de recherche « Méthodes Optiques en Génie Civil », 2009
- [C2] TAILLADE, F.; BENZARTI, K.; QUIERTANT, M.; AUBAGNAC, C.; DUMOULIN, J.; MOSER, E. Evaluation non destructive des joints collés par Shearographie et Thermographie Infrarouge. Journée de clôture de l'opération de recherche « Durabilité des renforcements par composites collés », 2009
- [C3] TAILLADE, F.; BENZARTI, K.; QUIERTANT, M.; AUBAGNAC, C.; DUMOULIN, J. Evaluation non destructive du collage composite-béton, par shearographie et thermographie infrarouge. Journée Contrôle de Santé Structurale des Matériaux Composites, Nantes, 2008

- [C4] DUMONT, E.; HAUTIÈRE, N.; DUMOULIN, J.; TAILLADE, F.; BOUCHER, V.; AU-BERT, D.; COLOMB, M.; MARCHETTI, M. Visibilité météorologique perception dégradée et techniques avancées. *Journées Techniques Routes*, *LCPC*, *Nantes*, 2008
- [C5] TAILLADE, F.; AUBAGNAC, C.; MALATERRE, D.; SAUSSOL, J.-L. Auscultation des gaines de précontraintes externes : apport de la sonde capacitive, Journées Techniques Ouvrages d'Arts. Journées Techniques Ouvrages d'Arts, Sétra-LCPC, Nancy, 2007
- [C6] TAILLADE, F. Méthodes Non Destructives pour l'Auscultation des Ouvrages en Béton Armé et Béton Précontraint : Apport des méthodes optiques. Ecole d'été LCPC-EDF, Lyon, 2006
- [C7] TAILLADE, F. Techniques d'imagerie pour voir à travers les milieux diffusants (pluie, neige, brouillard). Journées Techniques Routes, Nantes, 2005

## **B.2** Encadrements Scientifiques

Les listes ci-dessous ne concernent que des étudiants pour lesquels j'ai exercée officiellement un encadrement scientifique, en excluant les collaborations ponctuelles ou les encadrements partiels officieux.

#### **B.2.1** Encadrement de chercheurs

#### **Post-Doctorants**

- En cours de montage (2010-2012), taux d'encadrement : 50% Co-encadrement avec Dominique Placko (50% ENS-Cachan).
  Elaboration d'un système d'étalonnage pour la technologie TDR en vue de la mesure de la teneur en eau des sols
  Financement ANDRA
- Salima Bennaceur à partir de septembre 2010 (1 an), taux d'encadrement : 100% Auscultation de structures par imagerie non conventionnelle embarquée sur un drone Financement sur projet FUI : Aide au Diagnostic d'Ouvrages Par Imagerie non Conventionnelle (ADOPIC)
- Bastien Roucariès (2009-2010), taux d'encadrement : 100%
   Diagnostic temps réel de l'endommagement des conduits de précontrainte extérieure par méthode électromagnétique
   Financement sur projet Européen : Integrated System for Transport Infrastructures surveillance and Monitoring by Electromagnetic Sensing (ISTIMES)

#### **Doctorants**

Jean-Marie Hénault (2009-2012), taux d'encadrement : 30% Co-encadrement avec Karim Benzarti (30% LCPC) directeur de thèse, Marc Quiertant (30% CR LCPC) et Jean Salin (10% IR EDF).
Mise au point et qualification d'un câble à fibre optique dédié à la mesure de déformation et de température continûment répartie dans le béton Financement EDF, Jean Marie Hénault étant ingénieur de recherche à EDF

- Yolande Sikali (2009-2011), taux d'encadrement : 30%
   Co-encadrement avec Yves Jaouen (30% Télécom Paristech) directeur de thèse, Renaud Gabet (30% MCF Télécom Paristech) et Gautier Moreau (10% IR EDF). Mesure distribuée de température et de déformation par effet Brillouin dans les fibres optiques appliquée au génie civil
   Financement CIFRE EDF, Télécom Paristech, LCPC
- Thierry Bore (2007-2010), taux d'encadrement : 40%
   Co-encadrement avec Marc Himbert (20% CNAM) et Dominique Placko (40% ENS-Cachan) directeurs de thèse.
   Amélioration du diagnostic de l'endommagement des conduits de précontrainte extérieure par sonde capacitive
   Financement allocation LCPC
- Vincent Lanticq (2006-2009), taux d'encadrement : 30% Co-encadrement avec Yves Jaouen (30% Télécom Paristech) directeur de thèse, Renaud Gabet (30% MCF Télécom Paristech) et Gautier Moreau (10% IR EDF). Mesure distribuée de température et de déformation par effet Brillouin dans les fibres optiques appliquée au génie civil Financement CIFRE EDF, Télécom Paristech, LCPC Soutenu le 12 juin 2009. Fonction ultérieure depuis le 1er septembre 2009, Ingénieur R & D, CEMENTYS, Choisy-le-Roi
- Etienne Belin (2005-2008), taux d'encadrement : 40% Co-encadrement avec François Sanchez (20% Université d'Angers) directeur de thèse et Vincent Boucher (40% CR LRPC Angers). Utilisation de nouvelles techniques d'imagerie pour la vision en milieux diffusants Financement allocation LCPC et Pays de la Loire Soutenu le 19 décembre 2008. Fonction ultérieure depuis le 1er févier 2009, Post-Doctorant projet PHENOTIC, Laboratoire INRA - UMR PMS, Angers.

## B.2.2 Animation d'équipe

- Responsable du thème de recherche Méthodes optiques en génie civil (2005-2009) :
  - Optique guidée : capteur à fibres optiques pour la mesure de déformation et de température (Bragg, effet Brillouin) : thèse de Vincent Lanticq (2006-2009)
  - Optique cohérente :
    - mise en oeuvre des techniques interférométriques pour la mesure plein champ des déformations  $(10nm \ge 10\mu m)$
    - mise au point de techniques d'imagerie à grande distance (100m) pour la vision dans les milieux diffusants (pluie, neige, brouillard, fumée) : thèse de Etienne Belin (2005-2008)
  - Optique géomètrique :
    - mise en œuvre de la lumière structurée pour la mesure plein champ des déformations  $(10\mu m \text{ à } 1mm)$

- Responsable du volet Méthodes d'évaluation non destructive des joints collés du thème de recherche Renforcement par matériaux composites et assemblages collés en génie civil pilotée conjointement par K. Benzarti et M. Quiertant (2009-2012)
- Responsable du volet Capteurs à Fibre Optique du thème de recherche Système d'instrumentation pour la prévention des risques environnementaux pilotée conjointement par F. Derkx et F. Bourquin (2010-2013)

# B.3 Contrats de recherche - Collaborations

### B.3.1 Projet européen

 Integrated System for Transport Infrastructures surveillance and Monitoring by Electromagnetic Sensing (Istimes), Projet du 7e PCRD, (2008-2011)
 WP4 : Diagnostic temps réel de l'endommagement des conduits de précontrainte extérieure par une méthode électromagnétique

### B.3.2 Projets nationaux

- Aide au Diagnostic d'Ouvrages Par Imagerie non Conventionnelle (ADOPIC), FUI (2009-2011)
   Développement d'une instrumentation et des traitements d'images associées pour l'auscultation sans contact des ouvrages d'arts
- Système d'Aide au Roulage Tout temps (SART), FUI (2009-2012)
   Simulation de scènes aéroportuaires en conditions de brouillard
   Contrat de recherche avec Latécoère
- Dialogue Infrastructure Véhicules pour Améliorer la Sécurité routière (DIVAS), ANR, (2006-2010)
  Sujet 2B : Mesure embarquée de la texture des chaussées par rétrodiffusion d'ondes Sujet 2C : Détection et caractérisation du brouillard par analyse de la lumière rétrodiffusée

### **B.3.3** Collaborations scientifiques

Auscultation et surveillance des ouvrages et des réseaux relèvant du secteur de la construction

Contrat cadre avec Advitam, en cours de montage

- Auscultation par shearographie de composites collés sur du béton Collaboration avec Dantec Dynamics, depuis 2009
- Système d'Aide au Roulage Tout temps : Simulation de scènes aéroportuaires en conditions de brouillard
   Contrat de recherche avec Latécoère, depuis 2009
- Mesure de la permittivité électrique des matériaux
   Contrat de recherche avec l'Institut Fresnel, depuis 2008

- Auscultation des conduits de précontrainte extérieure par sonde capacitive : modélisation électrostatique par DPSM Contrat de collaboration avec le SATIE (ENS-Cachan), depuis 2007
- Amélioration de la visibilité à travers les brouillards : Apport de l'imagerie active Contrat de recherche avec l'Institut de recherche franco-allemand de Saint-Louis (ISL), depuis 2006

# **B.4** Valorisations

## **B.4.1** Expertises

- Auscultation de conduits de câbles de haubans d'un ouvrage en Grèce, en préparation avec Advitam, 2010
- Apports des méthodes optiques de CND pour le diagnostic du gonflement des structures de génie civil atteins d'alcali-réaction, Rapport d'expertise, EDF, 2008-2009
- Instrumentation des sites de stockage des déchets radioactifs, Rapport d'expertise, ANDRA, 2008-2009
- Auscultation des gaines de précontraintes extérieures par sonde capacitive, Inspections d'ouvrages d'art, SETRA, 2006

# B.4.2 Développements

#### Dispositifs de mesures

- Développement d'une plateforme de vision active pour voir en conditions météorologiques dégradées, 2009.
- Participation au développement et à la qualification métrologique d'une sonde capacitive de terrain pour l'auscultation des conduits de précontraintes extérieures, 2008.
- Développement d'un projecteur de franges pour la mesure de déformation en centrifugeuse (80g), 2008.
- Développement d'un dispositif de tomographie par cohérence optique utilisant un cristal photoréfractif pour la vision en milieu diffusant, 2006.
- Développement d'un interféromètre à dédoublement vidéo (shearographie), 2004.

### Logiciels

- Logiciel de traitement d'images utilisant la corrélation d'images pour la mesure d'un champ de déplacement, Labview, 2009-2010.
- Logiciel d'acquisition et de traitement d'image pour l'interférométrie de speckle (holographie, shearographie) et la projection de franges, Labview, 2005-2008.
- Boite à outils sous MatLab dédiées à la shearographie : simulation d'une expérience de mesure de phase par shearographie et analyse de résultats (cisaillement,

décisaillement, mesure de déformation en 3D utilisant des méthodes d'inversion (Tikhonov-Morrozov)), 2002-2005.

# Annexe C

# **Principales Publications**

Cette annexe regroupe les principaux articles correspondant au travail présenté dans ce manuscrit.

## Liste

- [A6] TAILLADE, F.; BELIN, E.; DUMONT, E. An analytical model for backscattered luminance in fog : comparisons with Monte Carlo computations and experimental results. *Measurement Science and Technology* 19 :055302 (2008)
- [A3] TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K.; AUBAGNAC, C. Shearography and Pulsed Stimulated Infrared Thermography applied to a Nondestructive Evaluation of bonded FRP strengthening systems on concrete structures. *Construction and Building Materials* (2010). - accepté le 19 février 2010
- [A1] TAILLADE, F.; QUIERTANT, M.; BENZARTI, K.; AUBAGNAC, C.; MOSER, E. Shearography applied to the non destructive evaluation of bonded interfaces between concrete and CFRP overlays : From the laboratory to the field. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2010). accepté le 27 mai 2010
- [A7] TAILLADE, F. Metrological Analysis of Shearography. European Physical Journal -Applied Physic 35(2) (2006), pp. 145-148
- [A5] TAILLADE, F.; AUBAGNAC, C.; LACROIX, C.; MALATERRE, D.; SAUSSOL, J.-L.; COTTINEAU, L.-M. Sonde capacitive : un outil de diagnostic des conduits de précontrainte extérieure. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées numéro spécial Instrumentation 272 (2008), pp. 107-122