HAL
open science

Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique

Edouard Buchoud

To cite this version:

Edouard Buchoud. Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2014. Français. NNT : 2014GRENU021 . tel-01099629v2

HAL Id: tel-01099629

https://theses.hal.science/tel-01099629v2

Submitted on 24 Nov 2015

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.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Edouard BUCHOUD

Thèse dirigée par **Jérôme MARS** et **Valeriu VRABIE**
codirigée par **Sylvain BLAIRON**

préparée au sein du **Laboratoire Grenoble Image, Parole, Signal, Automatique (GIPSA-lab)**
dans **l'École Doctorale Terre, Univers, Environnement (TUE)**

Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique

Thèse soutenue publiquement le **13/10/2014**,
devant le jury composé de :

Monsieur Fréderic DUFOUR
Professeur à Grenoble INP (Président)
Monsieur Jean-Jacques FRY
Professeur à l'Ecole Centrale de Lyon (Rapporteur)
Monsieur Philippe RAVIER
Maître de Conférences à l'Université d'Orléans (Rapporteur)
Monsieur Salah BOURENNANE
Professeur à l'Ecole Centrale de Marseille (Membre)
Monsieur Jérôme MARS
Professeur à Grenoble INP (Membre)
Monsieur Valeriu VRABIE
Maître de conférences à l'Université de Reims (Membre)
Monsieur Sylvain BLAIRON
Ingénieur de recherche à EDF (Membre)
Monsieur Jean-Robert COURIVAUD
Ingénieur à EDF (Membre)

Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France / Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP

Remerciements

Je souhaiterais tout d'abord remercier les membres du jury : Jean-Jacques Fry, Jean-Robert Courivaud, Philippe Ravier, Salah Bourennane, Frédéric Dufour, et Yves-Laurent Beck pour leurs remarques, réflexions et suggestions sur mon travail de thèse qui m'assureront une prise de recul importante pour entreprendre les perspectives de ce travail et les autres sujets de recherche auxquels je serait confronté.

Je suis également très reconnaissants envers les encadrants universitaires avec lesquels j'ai eu la chance et le privilège de travailler : Jérôme Mars qui m'a transmis la passion du traitement du signal appliqué sur des problématiques concrètes lors de ces cours, qui a su m'épauler (et me remettre en place) sur le parcours sinueux de la thèse, et qui a pu me remplacer lors des présentations auxquelles je n'ai pu assister. Valeriu Vrabie qui était à l'écoute, a su me manœuvrer pour l'écriture (parfois difficile) d'articles, et m'a éclairé de son expérience en traitement du signal et dans la gestion d'une thèse. Je te remercie tout particulièrement de l'accueil chaleureux à Reims chez toi et des visites de caves.

Depuis le début de stage Master 2, mes encadrants d'EDF ont suivi et forgé ma formation et ma personnalité pour le métier d'ingénieur chercheur : Jean-Marie Hénault et Sylvain Blairon ont eu la patience et le courage de m'enseigner les termes métrologiques, mais également l'art de la présentation, de la rédaction et bien plus encore. Jean Salin m'a apporté sa précision sur les petits détails, dans lesquels réside le diable. Guy D'Urso et Alexandre Girard m'ont apporté leurs inestimables expériences sur des problèmes complexes en traitement du signal pour mener à bien le projet.

J'ai toujours apprécié le fait de collaborer avec cette équipe dans laquelle la liberté d'expression scientifique est primordiale, et où chaque personne citée apporte une expérience accrue dans sa spécialité. Si j'en suis là, c'est aussi grâce à vous.

J'ai également aimé interagir et échanger avec les personnes gravitant autour de mon sujet : Gautier Moreau, Rémi Béguin, Olivier Marin, Cyril Guidoux, et Yves-Laurent Beck pour leur vision et expérience du terrain ; Olivier Artieres, et les personnes responsables des maquettes d'Ijkdijk et ERINOH grâce auxquelles j'ai pu participer aux expériences.

Mon infini gratitude revient aux personnes ayant fait preuve de courage pour relire le manuscrit et les différentes productions scientifiques produites lors la thèse : Marie et Jean, Joëlle, Cindy, Mémère, Emeuh, Pierrot et évidemment mes encadrants.

J'ai eu la chance de travailler dans une ambiance unique aussi bien en entreprise qu'en laboratoire qui s'est créée autour d'apéros, repas, de partie de baby-foot endiablée, de rando, sortie ski, squashs et autres activités ludiques ! Merci donc aux agents des groupes P1E et P1B d'EDF mais également aux doctorants du DIS et du Gipsa-doc. Spécial dédicace à mon presque coloc Manu, mon Q, la Radasse, Flo, Romain, Thomas, Tim, et mes futurs co-bureau et collègues qui vont regretter de m'avoir offert un joujou qui augmente la pénibilité au travail.

Les Youkers et mes potes en général ont eu la gentillesse d'essayer de comprendre le sujet de ma thèse. Sur l'ensemble la plupart ont saisis, ou bien cachés leurs jeux. Mais comme on dit, il n'y a pas de mauvais élèves que des mauvais profs.

Mes avant - derniers mots vont à mes parents, Gérard et Nathalie, mes sœurs et beaufs. Si j'en suis là, c'est surtout grâce à vous tous. Finalement, les derniers vont à ma Poupoule avec qui c'est Noel tous les jours et que j'aime de tout mon cœur.

Table des matières :

Introduction 1
Partie I : Surveillance et aide au diagnostic d'un ouvrage 1
I. 1. Vieillissement d'un ouvrage génie civil 2
I.1.1. Problématique 2
I.1.2. Les différents mécanismes d'endommagement 4
I. 2. Les moyens de surveillance conventionnels 8
I.2.3. Les capteurs conventionnels pour la mesure de déplacement et de déformation 10
I. 3. Les moyens d'auscultation alternatifs 12
I.3.1. Les capteurs basés sur l'imagerie 12
I.3.2. Les capteurs à fibres optiques 14
I.3.3. Les capteurs à fibre optique répartis 17
I.3.3.1. Phénomènes de diffusion dans la silice 17
I.3.3.2. Télémétrie optique 18
I.3.3.2.1. L'OTDR 18
I.3.3.2.2. L'OFDR 20
I.3.3.3. Mesures réparties de déformation et de température 21
I.3.3.3.1. Par retro-diffusion Rayleigh 21
I.3.3.3.2. Par rétro-diffusion Brillouin 22
I.3.3.3.3. Par rétro-diffusion Raman 23
I.3.3.3.4. Problématiques et applications 24
I.3.3.3.5. Interprétation des mesures de déformations : exemple pour la surveillance de digues 27
I. 4. Spécificités et contraintes des différentes expériences 28
I.4.1. CER de Rouen 28
I.4.2. Surveillance d'une digue : site de Contrisson 32
I.4.3. Récapitulatif des données 33
Partie II : Des spectres Brillouin à l'amélioration du pas de mesure de la fréquence Brillouin 36
Chapitre 1 : Le fonctionnement d'un appareil Brillouin 37
Introduction : 38
II.1.1. De la diffusion Brillouin à la mesure de la fréquence Brillouin 39
II.1.1.1. La diffusion Brillouin 39
II.1.1.2. Les différentes techniques de mesure 39
II.1.1.2.1. B-OTDR 39
II.1.1.2.2. B-OTDA 40

II.1.1.3. Les techniques alternatives 42
II.1.1.4. Les performances métrologiques des interrogateurs industriels 44
II.1.2. Etude du B-OTDA 45
II.1.2.1. Interaction des ondes pompe et sonde 45
II.1.2.2. Algorithme d'optimisation pour la détermination de la fréquence Brillouin 48
II.1.2.3. Phénomène de distorsion du spectre Brillouin : limites de l'algorithme d'optimisation 49
II.1.3. Modélisation de la chaîne de mesure et interprétation de la distorsion 49
II.1.3.1. Présentation du modèle de la chaîne de mesure 49
II.1.3.2. Validation du modèle 52
II.1.4. Exploitation du phénomène de distorsion Brillouin 52
II.1.4.1. Détection et localisation de déformations locales 52
II.1.4.2. Amélioration de la résolution spatiale 54
II.1.4.3. Comparaison des paramètres de forme 54
II.1.4.3.1. Estimation de la déformation 55
II.1.4.3.2. Application des paramètres de forme 56
II.1.5. Conclusion 57
Chapitre 2 : 58
Reconstruction du profil de fréquence Brillouin pour l'amélioration de la résolution spatiale 58
II.2.1. Introduction et présentation du problème 59
II.2.1.1. Introduction 59
II.2.1.2. Principes pour l'amélioration du pas de mesure 59
II.2.2. Reconstruction du profil de fréquences Brillouin par déconvolution 61
II.2.2.1. Les techniques de séparation de sources 61
II.2.2.2. Décomposition en matrices positives 63
II.2.2.2.1. Factorisation en matrices non négatives avec parcimonie 63
II.2.2.2.2. Méthode des Moindres Carrés à coefficients positifs 66
II.2.2.2.3. Méthodes de reconstruction 68
II.2.2.2.4. Reconstruction empirique 69
II.2.2.2.5. Reconstruction statistique 71
II.2.3. Inversion paramétrique itérative 74
II.2.3.1. Principe 74
II.2.3.2. Détermination du coefficient de régularisation : méthode de la *L-curve* 75
II.2.4. Comparaison des méthodes 76
II.2.4.1. Simulation 76
II.2.4.2. Application des algorithmes de séparation de sources 77

II.2.4.3. Comparaison des algorithmes de reconstruction 79
II.2.4.4. Discussion 82
II.2.4.5. Conclusion sur les données simulées. 84
II.2.4.6. Application sur des données expérimentales : CER de Rouen 84
II.2.5. Conclusion et perspectives 86
Partie III : De la mesure de la déformation à l'estimation du déplacement 89
Introduction 90
Chapitre 1 : 91
Correction de l'effet thermique sur les mesures de déformations acquises par des capteurs à fibre optique 91
III.1.1. Influence de la température sur la mesure de déformation 92
III.1.1.1. Problématique 92
III.1.1.2. Identification des sources thermiques influençant la déformation 93
III.1.1.3. Les solutions existantes 96
III.1.2. Correction des effets thermiques sur les mesures de déformations 97
III.1.2.1. Soustracteur de bruit 98
III.1.2.1.1. Elimination de l'influence des facteurs internes 98
III.1.2.1.2. Filtre de Wiener 98
III.1.2.1.3. Les différentes observations possibles de la température 99
III.1.2.2. La décomposition modale empirique 100
III.1.3. Etude de cas : la digue de Contrisson 101
III.1.3.1. Présentation du site et des données 101
III.1.3.1.1. Présentation du site 101
III.1.3.1.2. Données de déformation 102
III.1.3.1.3. Données de température 103
III.1.3.2. Applications des méthodes proposées 104
III.1.3.2.1. Soustraction de la température interne 104
III.1.3.2.2. Soustraction de bruit : Filtre de Wiener 105
III.1.3.2.3. Discussions sur les références de température 106
III.1.3.2.4. Décomposition modale empirique 107
III.1.4. Conclusion et perspectives 109
Chapitre 2 : 111
Quantification des déplacements grâce à un capteur à fibre optique 111
III.2.1. Introduction 112
III.2.2. Influence de la chaîne de mesure sur la mesure de déformation 112
III.2.2.1. Introduction de la fonction de transfert mécanique du câble à fibre optique 112

III.2.2.2. Suivi de l'évolution des fissures 113
III.2.3. Quantification de tassements dans un ouvrage hydraulique en terre 114
III.2.3.1. Modèles empiriques de déplacement 115
III.2.3.1.1. Modèle gaussien 115
III.2.3.1.2. Modèle gaussien modifié 115
III.2.3.1.3. Modèle pseudo-Voigt 116
III.2.3.2. Expression de la déformation dans la fibre optique 116
III.2.3.3. Procédé d'estimation du déplacement 118
III.2.3.3.1. Inversion paramétrique 118
III.2.3.3.2. Estimation de la profondeur de la cavité 118
III.2.3.4. Application sur les données du CER de Rouen 120
III.2.3.4.1. Présentation de l'expérience 120
III.2.3.4.2. Estimation de la profondeur et du tassement 121
III.2.3.4.3. Influence de la chaîne de mesure 125
III.2.4. Conclusion et perspectives 128
Conclusions et perspectives : 131
Annexe A : Présentation des autres sites étudiés 134
A. 1. Maquette ERINOH : étude de la propagation d'un renard hydraulique 134
A. 1. 1. Description de l'essai et de l'instrumentation 134
A. 1. 2. Mesures de déformations issues des capteurs à fibre optique 135
A. 2. Projet européen Ijkdijk : 137
A. 3. Canal de Curbans : 139
Annexe B : Validation du modèle de la chaîne de mesure 141
Annexe C : Application des méthodes de séparation de température / déformation sur les données du site de Contrisson 145
C. 1. Crête de digue 145
C. 2. Bas du talus 147
C. 3. Milieu de talus 149
Bibliographie : 152

Liste des symboles :

F : force [N]

S : surface [m^2]

σ : contrainte [Pa]

ε : déformation [µm/m ou µε]

$\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$: matrice de déformation dues aux variations thermiques dans une structure [µm/m]

$\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}$: matrice de déformation dues aux variations liées à la dilatation dans une structure [µm/m]

$\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}$: matrice de déformation dues aux variations réversibles du phénomène de la dilatation dans une structure [µm/m]

$\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}$: estimation de la matrice de déformation athermique dans la fibre optique [µm/m]

$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}$: estimation de matrice de déformation athermique après soustraction des variations de température internes [µm/m]

$\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{th}}^{\mathrm{tot}}$: estimation de matrice de déformation induite par les variations thermiques des phénomènes de diffusion et dilatation [µm/m]

$\boldsymbol{\varepsilon}_{st}$: matrice de déformation dans la structure [µm/m]

$\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{B-OTDA}$: matrice de déformation en fonction du temps et de la distance mesurée par un interrogateur B-OTDA [µm/m]

$\vec{\boldsymbol{u}}$: vecteur de déplacement [m]

$\boldsymbol{u_z}$: composante du déplacement selon l'axe z

$\boldsymbol{u_x}$: composante du déplacement selon l'axe x

$\boldsymbol{u_z}^{\mathrm{gauss}}$: modèle de la composante selon l'axe z du déplacement suivant une loi gaussienne

$\boldsymbol{u_z}^{mod}$: modèle de la composante selon l'axe z du déplacement suivant une loi gaussienne modifiée

$\boldsymbol{u_z}^{voigt}$: modèle de la composante selon l'axe z du déplacement suivant une loi pseudo-Voigt

i_x : étalement de la signature du déplacement selon l'axe x [m]

$\boldsymbol{s_{max}}$: tassement vertical maximal d'un déplacement [m]

ρ : masse volumique [$kg{\cdot}m^{-3}$]

α : coefficient d'atténuation de la fibre optique m^{-1}

c : célérité de la lumière dans le vide ($2.998.10^8$ $m.s^{-1}$)

$\Delta\tau$: durée de l'impulsion de l'onde lumineuse [s]

w : base de mesure [m]

z_k : distance dans la fibre optique par rapport à l'interrogateur [m]

Δz ou Δx : pas de mesure d'un interrogateur [m]

$\boldsymbol{z}$: distance répartie dans la fibre optique échantillonnée avec le pas de mesure Δz, vecteur

ν_B : fréquence Brillouin [GHz]

ν_{Bi} : fréquence Brillouin locale [GHz]

V_a : vitesse des ondes acoustiques [m.s^{-1}]

λ_0 : longueur d'onde d'une onde lumineuse [Hz^{-1}]

ν_0 : fréquence de l'onde lumineuse [Hz]

κ : coefficient de Poisson d'un matériau

L : longueur de la fibre optique [m]

h : constante de Planck égale à 6,63.10^{-34}m^2.kg.s^{-1}

k : constante de Boltzmann, égale à 1,38.10^{-23}m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}

C_T^R : coefficient de calibration lié à l'interrogateur Rayleigh et la température [GHz/°C]

C_ε^R : coefficient de calibration lié à l'interrogateur Rayleigh et la déformation [GHz/$\mu\varepsilon$]

C_T^B ou C_T : coefficient de calibration lié à l'interrogateur Brillouin et la température [GHz/°C]

C_ε^B ou C_ε : coefficient de calibration lié à l'interrogateur Brillouin et la déformation [GHz/$\mu\varepsilon$]

$C_T{}'$: coefficient de calibration d'un capteur à fibre optique lié à la température mais également à un coefficient de dilatation

ν_p : fréquence de l'onde pompe [Hz]

$\boldsymbol{I_p}$: intensité de l'onde pompe

$\boldsymbol{\nu}_S$: vecteur de fréquence de l'onde sonde [Hz]

$\boldsymbol{I_{CW}}$: intensité de l'onde sonde

$\boldsymbol{g_t}$: vecteur de spectre Brillouin transitoire

$\boldsymbol{f(\nu)}$: spectre de l'onde pompe

ER : ratio d'extinction de l'onde pompe

$\boldsymbol{\Delta T}$: matrice de température relative entre deux états [°C]

$\boldsymbol{T}_{int}$: matrice de température des facteurs internes d'une structure [°C]

$\boldsymbol{T}_{ext}$: matrice de température des facteurs externes d'une structure [°C]

$\boldsymbol{T}_{surf}$: vecteur de température à la surface d'une structure [°C]

$\Delta\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}^{Raman}$: matrice de température mesuré par un interrogateur Raman

$\boldsymbol{g_B}$: spectre Brillouin spontané

$\boldsymbol{G}$: matrice de spectres Brillouin stimulés

$\boldsymbol{g}_k = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$: spectre Brillouin stimulé à la position z_k

N_{pk} : nombre de composantes spectrales contenues dans le spectre $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$

$\boldsymbol{v}$: support fréquentiel du spectre Brillouin

$\boldsymbol{V}$: loi pseudo-Voigt

δl : portion élémentaire de w

δv_B : écart de fréquence Brillouin

$\boldsymbol{d}$: fonction de transfert de la chaîne de mesure

$\boldsymbol{s_e}$: spectre Brillouin stimulé élémentaire

N_x : nombre de spectres élémentaires dans la base de mesure w

$\widetilde{\boldsymbol{s_e}}$: estimation du spectre Brillouin stimulé élémentaire

$\boldsymbol{h}_k$: histogramme des fréquences Brillouin $\boldsymbol{v_B}$ au sein de la base de mesure w à la position z_k.

$\mathbf{R_A}$: facteur d'asymétrie du spectre Brillouin

$\mathbf{R_B}$: facteur d'élargissement du spectre Brillouin

I : fonction indicatrice

H : modèle direct de la chaîne de mesure

$\boldsymbol{A}$: matrice des amplitudes des composantes spectrales

$\boldsymbol{S}$: dictionnaire de sources

$\boldsymbol{a}_k$: vecteur d'amplitudes à la position z_k

$\boldsymbol{E}$: bruit de mesure lié à la chaîne de mesure d'un capteur à fibre optique de type B-OTDA

$spa(\boldsymbol{a})$: critère de parcimonie d'un vecteur.

$\widetilde{spa}(\boldsymbol{a})$: estimation du critère de parcimonie $spa(\boldsymbol{a})$

z_f : profondeur de la fibre optique [m]

z_c : profondeur de la cavité [m]

α_{dil} : coefficient de dilatation d'une structure [m.°C^{-1}]

$\boldsymbol{\alpha}_{dil}$: vecteur de coefficient de dilatation d'une structure [m.°C^{-1}]

$\boldsymbol{FMI}$: vecteur représentant un mode fréquentiel après décomposition d'un signal par l'EMD

FTM_{cable} : fonction de transfert mécanique d'un câble à fibre optique

$\Pi_{\text{interrogateur}}$: fonction de transfert de l'interrogateur

δ : fonction Dirac

Acronymes :

ASN	: Autorité de Sûreté Nucléaire
B-OCDA	: Brillouin Optical Coherent Domain Analyzer
B-OFDA	: Brillouin Optical Frequency Domain Analyzer
B-OTDA	: Brillouin Optical Time Domain Analyzer
B-OTDR	: Brillouin OTDR
BRGM	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CER	: Centre d'Equipement de Rouen
CFBR	: Comité Français des Barrages et Réservoirs
CIGB	: Commission Internationale des Grands Barrages
CNR	: Compagnie Nationale du Rhône
DBS	: Diffusion Brillouin Stimulée
DiTest	: Distributed Temperature and Strain analyzer
DME	: Décomposition Modale Empirique
DS	: Capteur à Câble
EAM	: Erreur Absolue Moyenne
EDF	: Electricité De France
EQM	: Erreur Quadratique Moyenne
ERINOH	: Etude de l'Erosion INterne d'un Ouvrage Hydraulique
FastNNLS	: Fast Non Negative Least Square
FMN	: Factorisation en Matrice Non-négatives
IMF	: Intrinsic Mode Function
IQOA	: l'Image Qualité des Ouvrages d'Art
IREX	: Institut de recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil
LiDAR	: Light Detection and Ranging
LMH	: Largeur à Mi-Hauteur
LVDT	: Linear Variable Differential Tranformer
MCN	: Moindres Carrés non Négatifs.
MOA	: Maître d'Ouvrage d'Art
OBR	: Optical Backscatter Reflectometer
OFDR	: Optical Frequency Domain Reflectometry
OHT	: Ouvrages Hydrauliques en Terre
OTDR	: Optical Time Domain Reflectometry
PCA	: Principal Component Analysis
RSB	: Rapport Signal sur Bruit
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SBS	: Spectre Brillouin Stimulé
SOFO	: Surveillance d'Ouvrages par Fibre Optique
SVD	: Singular Value Decomposition
VNF	: Voies Navigables de France

Introduction

Les effets de l'exploitation industrielle, des conditions climatiques, des mouvements de terrain se conjuguent et augmentent la fragilité des ouvrages de site tels que les ponts, les bâtiments, les réacteurs, et des ouvrages de grandes dimensions comme les digues, canaux, conduites, etc. Lors d'une surexploitation, des évènements dramatiques générant d'importants dégâts humains, matériels et environnementaux peuvent survenir si ces ouvrages ne sont pas surveillés. A titre d'illustration, nous pouvons citer la rupture du barrage de Malpasset en 1959. Ces tragédies amenèrent au renforcement de la réglementation sur la surveillance et le suivi de ces infrastructures afin d'assurer un risque minimal pour la population. Par ailleurs, le problème du vieillissement pour l'ensemble des grands ouvrages se pose actuellement. Une surveillance préventive des ouvrages soumis à des exigences en termes de fréquences de mesures, de seuils critiques, permet d'avoir un suivi précis d'indicateurs sur l'état de la structure.

La surveillance d'ouvrages consiste d'abord à effectuer une auscultation visuelle rigoureuse puis à mesurer plusieurs grandeurs physiques dans le but de mettre en évidence les différentes sources d'anomalies possibles. Les grandeurs physiques à prendre en considération pour la mesure du comportement mécanique de la structure sont la pression interne, la température, le taux d'humidité, le déplacement, la déformation, etc. La fissuration du béton peut être par exemple mise en évidence par des mesures de déformation qui donnent alors des indications sur la fragilité d'un ouvrage en béton armé. Pour les ouvrages en géomatériaux comme les digues en terre, la présence de fuites ou de tassements du sol, mise en évidence par exemple par des mesures de température, permet de réévaluer la stabilité de l'ouvrage. La détection de ces évènements, à travers l'analyse des grandeurs physiques mesurées, devient alors un indicateur essentiel sur l'état de l'ouvrage surveillé. Leur localisation permet d'optimiser et diminuer les coûts de maintenance et leur quantification est primordiale pour déterminer si la stabilité de l'ouvrage est en jeu.

Afin d'assurer une surveillance complète des grands ouvrages linéaires, la première difficulté réside dans leur longueur, souvent de l'ordre du kilomètre. Un réseau de capteurs ponctuels (sonde de température, piézomètres, etc.) installés sur un site par exemple, va collecter les mesures vers un centre d'expertise permettant, après analyse, d'alerter si nécessaire l'utilisateur ou l'exploitant. Toutefois, avec un tel système fournissant des informations intégrées en distance, tout phénomène ponctuel tel que l'apparition d'un fontis, risque de ne pas être identifiable. Les coûts d'installation de ces systèmes ponctuels d'auscultation sont proportionnels à la longueur de l'ouvrage surveillé. Une nouvelle technologie d'acquisition peu onéreuse est apparue depuis une dizaine d'années avec les capteurs repartis à fibre optique, permettant d'obtenir des mesures de déformation et/ou de température le long d'ouvrages. Leur principal avantage, en plus du bas prix dû à l'utilisation de fibres optiques de télécommunication classiques, est leur capacité à fournir une mesure de manière répartie le long de la fibre, avec des pas de mesure de l'ordre du mètre sur des dizaines de kilomètres. L'industrie pétrolière (surveillance de pipelines, de casing ou de puits), l'aéronautique (contrôles de résistance des fuselages d'avion et de l'ensemble des pièces mécaniques), le génie civil (surveillance de structures, détection de fuites ou d'incendies) sont autant de domaines d'applications pour ces types de capteurs, domaines qui ne cessent de s'élargir.

Les capteurs repartis à fibre optique sont constitués d'un appareil optoélectronique, également appelé interrogateur, relié à un câble à fibre optique - élément sensible du système de mesure. Plusieurs technologies d'interrogateurs existent basées sur la réflexion de la lumière au sein de la fibre. Celles utilisant la rétrodiffusion de Rayleigh ou Brillouin sont sensibles aux variations de déformation et de

température. Les technologies utilisant la rétrodiffusion Raman sont sensibles uniquement à la température. Les résolutions spatiales et les longueurs d'auscultation varient selon les types de technologies utilisées. La technologie Rayleigh permet d'avoir une résolution spatiale centimétrique pour des longueurs de câble de l'ordre de la centaine de mètres, alors que les technologies Brillouin et Raman conduisent à une résolution spatiale métrique pour des longueurs de plusieurs kilomètres de câble. La première est donc adaptée à des sites peu étendus (avions, ponts, etc.), alors que les deux autres sont plus appropriées aux grands ouvrages ou à un déploiement industriel.

Les travaux récents effectués par l'Electricité de France (EDF) sur les méthodes de détection de fuites dans des digues en terre grâce aux mesures thermométriques fournies par des capteurs repartis de technologie Raman ont permis de confirmer les bas coûts d'installations, la robustesse et l'efficacité de ce système de mesure. Ainsi, la surveillance de digues en France est actuellement opérationnelle. Les capteurs répartis de déformation (technologie Brillouin) offrant la possibilité de surveiller le déplacement dans les ouvrages, il serait possible de détecter, localiser et quantifier les déformations dans les ouvrages surveillés. Liés à ces objectifs, plusieurs verrous se présentent alors. On sait que la technologie Brillouin n'est pas assez résolue spatialement pour une localisation précise d'un évènement. La première problématique est d'améliorer le pas de mesure d'un tel appareil. D'autre part, les capteurs répartis de technologie Rayleigh et Brillouin sont sensibles à la température et la déformation au sein de la fibre optique. Les variations de température engendrent des erreurs sur la mesure de déformation. Un deuxième verrou est donc de découpler ces deux mesurandes dans le but d'améliorer l'analyse et l'interprétation des mesures de déformation. L'intérêt par la suite est de fixer un seuil d'alarme le plus fiable possible. Le dernier verrou est de quantifier le déplacement à partir de ces mesures de déformation corrigées car il est primordial de suivre l'évolution des tassements verticaux ou l'ouverture de fissures dans une structure pour connaître sa tenue dans le temps. Afin de lever ces verrous et ainsi d'améliorer l'interprétation des mesures et notamment la précision de la quantification du déplacement, j'ai développé dans le cadre de cette thèse plusieurs méthodologies répondant aux problématiques exposées ci-dessus.

Articulé autour de trois parties principales, le mémoire de thèse se présente de la manière suivante :

La première partie est consacrée à l'introduction de la problématique de surveillance d'ouvrages en génie civil, centrée sur la détection de déplacements. La présentation des différents mécanismes d'endommagement des ouvrages, tels que la fissuration pour le béton ou la création de cavités souterraines pour les digues, permet d'identifier les indicateurs recherchés. Ainsi, les différentes grandeurs physiques associées sont présentées et associées aux moyens permettant de les mesurer. Comme ce travail traite des mesures réparties, nous étudions ensuite les différents capteurs à fibre optique en présentant leur principe de mesure, les paramètres associés et les performances des différentes technologies. Après cet état de l'art sur la surveillance d'ouvrages, nous nous penchons sur les différentes applications sur lesquelles EDF se focalise. Il est primordial d'expliciter les spécificités, les contraintes et les objectifs de chaque expérimentation, ainsi que de détailler les jeux de données acquis par les capteurs répartis à fibre optique et les mesures complémentaires fournies par des capteurs supplémentaires.

La deuxième partie, articulée autour de deux chapitres, traite de l'amélioration de la résolution spatiale des capteurs de technologie Brillouin. Dans le premier chapitre, nous nous penchons sur le fonctionnement des différents interrogateurs utilisant la rétrodiffusion Brillouin et nous comparons leurs performances. En termes de résolution spatiale, de longueur d'auscultation et de précision, l'interrogateur Brillouin Optical Time Domain Analyzer (B-OTDA) est actuellement le plus performant. Il permet de mesurer des spectres Brillouin sur une base de mesure de 1 mètre avec une

résolution spatiale de 40 cm sur 25 km et avec une précision de + / - 20 µm/m. L'état de l'art, principalement dans le domaine de la physique optique, montre qu'il est possible d'améliorer ces performances. Toutefois, ces solutions technologiques sont contraignantes ou dans un stade d'industrialisation peu avancé. De ce fait, nous nous intéressons à améliorer la résolution spatiale des interrogateurs industriels B-OTDA actuels. Partant du fait que la forme du spectre Brillouin dépend de la distribution de la déformation dans la base de mesure, nous proposons dans ce chapitre un modèle de la chaine de mesure. Le deuxième chapitre est centré sur l'utilisation des méthodes de traitement du signal et de séparation de sources en vue d'obtenir un profil de déformation avec un pas d'échantillonnage centimétrique choisi par l'utilisateur, tout en gardant les mêmes performances en longueur d'auscultation et en sensibilité. Plusieurs jeux de données simulées et expérimentales nous permettront de valider et de comparer ces méthodes en termes de facilité d'emploi, de temps de calcul, etc.

La troisième partie, composée également de deux chapitres, est dédiée à la séparation de l'influence des variations de température sur la mesure de déformation et à la quantification du déplacement. En effet, des variations de température peuvent engendrer des erreurs d'interprétation des mesures de déformations et donc influencer les seuils d'alarme ou l'estimation du déplacement de l'ouvrage. Le cas d'étude d'un site d'exploitation dans lequel plusieurs câbles à fibre optique ont été installés permet de proposer une méthodologie pour la suppression des déformations réversibles subies par une structure géotechnique. Ces déformations peuvent dépendre des variations de température externe, des fuites d'eau, de la dilatation thermique des matériaux de la structure, etc. Fondé sur le concept général de séparation de sources, le filtrage adaptatif de Wiener permet d'accéder uniquement aux déformations irréversibles d'intérêt qui sont décorrélées de la température. Comme nous le verrons, le prétraitement et le choix de la référence pour le filtrage de Wiener sont primordiaux dans la mise en œuvre d'une telle méthodologie. Mais si aucune référence n'est disponible sur site, nous proposerons alors d'utiliser une méthode appelée « décomposition modale empirique » efficace pour supprimer les variations périodiques (journalière et saisonnière) extrinsèques présentes dans les mesures. Des perspectives pour une validation in situ de ces méthodes sont proposées. Le deuxième chapitre de cette partie est consacré à la quantification du déplacement à partir des mesures de déformations. Nous constatons que selon les domaines d'application (surveillances de glissement de terrain, déformation en tunnel, dilatation de pipeline, etc.), plusieurs modèles permettant d'interpréter les signatures particulières de déformations existent. Dans notre cas lié à l'existence d'une cavité souterraine, le déplacement vertical d'une colonne des matériaux composant la structure induit des déformations longitudinales dans la fibre optique. Ce déplacement se traduit par l'apparition d'une signature caractéristique du fontis. Nous étudions l'influence de la chaine de mesure sur cette signature et proposons une méthode permettant de quantifier le déplacement vertical de la structure. Son application sur une expérience réelle contrôlée en laboratoire permet de comparer la précision de quantification du déplacement par rapport à des mesures de déformations fournies par des capteurs ponctuels de référence.

Des spécifications précises et indispensables quant aux futures installations de câbles à fibre optique dans les ouvrages en géomatériaux pour la quantification des déplacements sont discutées en conclusion. L'application à d'autres ouvrages, et la gestion des données importantes générées par de tels capteurs font l'objet de perspectives de ce travail.

Partie I : Surveillance et aide au diagnostic d'un ouvrage

I. 1. Vieillissement d'un ouvrage génie civil 2

I.1.1. Problématique 2

I.1.2. Les différents mécanismes d'endommagement 4

I. 2. Les moyens de surveillance conventionnels 8

I.2.3. Les capteurs conventionnels pour la mesure de déplacement et de déformation 10

I. 3. Les moyens d'auscultation alternatifs 12

I.3.1. Les capteurs basés sur l'imagerie 12

I.3.2. Les capteurs à fibres optiques 14

I.3.3. Les capteurs à fibre optique répartis 17

I.3.3.1. Phénomènes de diffusion dans la silice 17

I.3.3.2. Télémétrie optique 18

I.3.3.2.1. L'OTDR 18

I.3.3.2.2. L'OFDR 20

I.3.3.3. Mesures réparties de déformation et de température 21

I.3.3.3.1. Par retro-diffusion Rayleigh 21

I.3.3.3.2. Par rétro-diffusion Brillouin 22

I.3.3.3.3. Par rétro-diffusion Raman 23

I.3.3.3.4. Problématiques et applications 24

I.3.3.3.5. Interprétation des mesures de déformations : exemple pour la surveillance de digues 27

I. 4. Spécificités et contraintes des différentes expériences 28

I.4.1. CER de Rouen 28

I.4.2. Surveillance d'une digue : site de Contrisson 32

I.4.3. Récapitulatif des données 33

I. 1. Vieillissement d'un ouvrage génie civil

I.1.1. Problématique

Les effets de l'exploitation industrielle et des aléas climatiques se conjuguent et augmentent la fragilité des ouvrages génie civil que sont les infrastructures routières, industrielles, urbaines, et hydrauliques. Ces ouvrages sont construits principalement en béton armé ou en géomatériaux[1]. Or un évènement dramatique peut survenir générant d'importants dégâts humains, matériels et peut-être environnementaux. Les ouvrages les plus sensibles sont les ponts, les tunnels, les chemins de fer, les ouvrages destinés à la production d'électricité tels que les ouvrages hydrauliques ou nucléaires. Dernièrement, les incidents de Fukushima ont amené l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) à renforcer les exigences en terme de sécurité des infrastructures nucléaires. Dans ce contexte, les Maitres d'Ouvrages d'Art (MOA) se doivent de gérer de manière pérenne leur patrimoine en assurant un fonctionnement sûr des installations, tout en garantissant la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement.

Dans le domaine de la production d'électricité, le parc d'ouvrages en génie civil d'Electricité de France (EDF) comprend le parc hydraulique composé de plus de 500 km de digues et canaux d'amenée d'eau et de plus de 160 grands barrages de classe A, dont l'âge moyen atteint les 68 ans (CFBR). Quant au parc nucléaire, il contient 58 réacteurs nucléaires en activité avec un âge moyen de 25 ans (ASN). EDF doit donc assurer le bon fonctionnement de chacune de ses installations. Pour cela, il existe plusieurs stratégies permettant d'allier la surveillance de la structure avec une politique de maintenance répondant aux exigences fonctionnelles, réglementaires et aux contraintes futures.

Pour chaque ouvrage, ces stratégies se basent sur une analyse de risques qui prend en compte la sûreté, les conditions d'exploitation, l'environnement humain et sociétal, la connaissance du comportement et des pathologies des matériaux, l'historique de la structure, les coûts de perte d'exploitation et la durée de vie de l'ouvrage. En fonction des résultats de l'analyse, des dispositions doivent être prises sur la sécurité, la côte d'exploitation, les travaux de réparation, etc.

Pour les ouvrages en génie civil du parc d'EDF, la stratégie utilisée est illustrée sur la Figure 1. La surveillance de l'ouvrage est l'ensemble des examens établis permettant de suivre l'état de la structure. L'examen traditionnel est l'inspection visuelle détaillée et périodique de la surface de la structure menée suivant la méthodologie de l'Image Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA). Les défauts apparents de l'ouvrage sont notés suivant leur gravité et leur étendue. Si ces défauts sont supposés pathologiques, une auscultation et/ou une étude numérique sont programmées en parallèle. Les examens complémentaires sont alors les mesures de grandeurs d'intérêt permettant de détecter, localiser et quantifier les défauts pathologiques.

Ces mesures permettent de connaitre l'état interne de la structure grâce au prélèvement d'échantillons ou à des techniques non destructives basées d'une part sur la propagation d'ondes mécaniques, électromagnétiques ou acoustiques, et d'autre part sur des mesures thermiques, chimiques, radiographiques, etc. Un bilan complet de la stabilité de la structure avec l'aide de modèles mécaniques avancés est dressé. Cette évaluation conclut au diagnostic de l'ouvrage et au pronostic de son évolution. Les décisions concernant les moyens d'auscultation supplémentaires (ajout de capteurs, augmentation de la fréquence de mesures, etc.) ou concernant les rénovations sont prises dans les meilleures conditions possibles.

[1] Les géomatériaux désignent une famille de matériaux comprenant les sols (matériaux meubles) et les roches (matériaux rigides).

Dans la plupart des cas et par commodité, l'instrumentation est placée en surface de la structure. Pour les ouvrages à caractère exceptionnel, elle peut être insérée dans la structure dès la conception : noyée dans le béton, pour les barrages ou les enceintes de confinement des centrales nucléaires. Ces ouvrages sont équipés de systèmes de mesure des grandeurs physiques pertinentes : la température, la pression, le déplacement et la déformation. Pour les digues et les canaux, des piézomètres et des drains collecteurs permettent de connaitre le comportement hydraulique global de la structure. Les mesures sont réalisées de manière périodique (tous les 15 jours à 3 mois) ou lors de fortes sollicitations (épreuve hydraulique de l'enceinte des centrales nucléaires effectuée tous les 10 ans).

Plusieurs mécanismes d'endommagement ont été identifiés comme des indicateurs de la fragilité d'un ouvrage en génie civil. Pour un ouvrage en béton, la fissuration et la corrosion des armatures facilitent et indiquent la présence d'agents chimiques agressifs. Pour les ouvrages en terre, la présence de fuites ou le tassement du sol témoignent d'une tenue amoindrie. La détection de ces évènements devient un indicateur essentiel sur l'état interne de la structure.

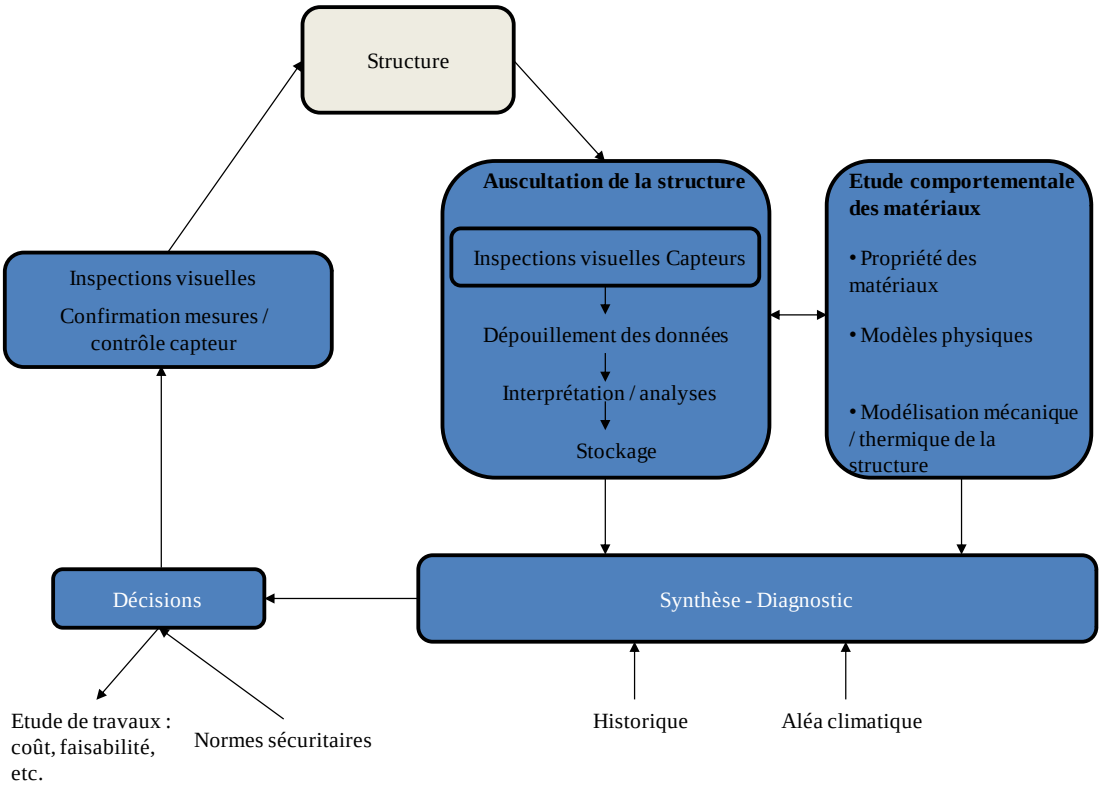


Figure 1 : Stratégie de suivi d'un ouvrage en génie civil et processus de décision.

Afin d'assurer une surveillance complète de l'ouvrage, la première difficulté pour son auscultation est sa taille, de l'ordre de la centaine de mètres ou du kilomètre. Actuellement, le cluster de systèmes ponctuels d'auscultation installé sur site permet de faire converger les mesures vers un centre d'expertise qui va alerter si nécessaire l'utilisateur ou l'exploitant. L'utilisation de plusieurs techniques de mesure pour l'estimation d'un même paramètre permet d'assurer la redondance et la continuité des séries de mesure.

Nous allons identifier dans ce chapitre les différents mécanismes d'endommagement liés aux structures de génie civil et les grandeurs physiques d'intérêt permettant de les détecter. La déformation et le déplacement permettent de dresser un comportement mécanique de la structure étudiée. Les capteurs traditionnels associés sont étudiés dans cette partie.

I.1.2. Les différents mécanismes d'endommagement

Les ouvrages étudiés sont composés de béton armé ou de géomatériaux. Lors d'un changement d'état, plusieurs sortes d'évènements apparaissent tels que le fluage pour le béton, le tassement de structures en géomatériaux, etc. Les plus dangereux sont ceux remettant en cause la stabilité de l'ouvrage. Nous nous focaliserons ici sur quelques phénomènes altérant soit les bétons armés, comme la fissuration et la corrosion, soit les ouvrages hydrauliques en terre, comme le fontis ou le renard hydraulique.

Les ouvrages en béton armé

Le béton armé est largement utilisé pour la construction des bâtiments d'habitation actuels, des infrastructures routières, industrielles, etc. Les Etats-Unis présentent un inventaire de ponts autoroutiers des plus importants (environ 586 000), dont 15 % sont considérés comme déficients, essentiellement par corrosion avancée. Dix milliards de dollars par an au cours des dix prochaines années devraient être dépensés pour compenser le retard pris en termes de maintenance - réparation (Conciatori, 2005).

En France, le parc d'ouvrages d'EDF est composé de nombreux ouvrages d'art en béton armé : barrages, enceintes de confinement, aéroréfrigérants, etc. La détection et la surveillance de l'évolution des fissures dans le temps sont donc primordiales pour préserver l'intégrité de ces structures et permettre d'optimiser les coûts de maintenance. La fissuration du béton est indissociable du fonctionnement du béton et elle est intégrée au calcul des ouvrages (Olliver, 2008). Une fissure peut apparaître à des instants différents de la vie du béton : soit à la mise en œuvre lors du retrait de l'eau dès le jeune âge, soit après une contrainte importante (traction par exemple) lors d'une sollicitation de la structure pendant son fonctionnement.

Le béton est un matériau composé de granulats naturels (sable, graviers) et d'un liant appelé ciment. Le béton est connu pour résister à de fortes compressions ; lorsqu'il est soumis à des phénomènes de traction, si la force dépasse le seuil d'élasticité limite, alors des fissures apparaissent. Il est donc souvent associé à des inserts en acier pour assurer la tenue mécanique de la structure. Ils sont passifs et servent à assurer l'assemblage, et actifs, comme les câbles de précontrainte qui maintiennent le béton en compression. Le béton étant globalement chimiquement basique, il assure la passivation des aciers. La corrosion par des agents chimiques est la principale pathologie du béton armé. Une porosité ou une fissuration élevée du matériau va faciliter la pénétration du dioxyde de carbone, de chlorures, etc. Ces éléments vont attaquer l'acier et le corroder entraînant la diminution de leur section efficace ce qui peut à terme affecter la stabilité de la structure. Les produits de corrosion entrainent l'expansion de l'armature et l'augmentation de la fissuration existante. Ces fissures engendrent l'interconnexion des pores déjà présents au cœur de la matrice, ainsi sa perméabilité augmente. La présence d'agents chimiques agressifs véhiculés par de l'eau par exemple devient de plus en plus probable et facilite sa détérioration. Une fissure peut être considérée comme pathologique quand son ouverture atteint 0,3 mm.

Plusieurs techniques de surveillance sont utilisées pour essayer de détecter, localiser et quantifier des fissures dans les bétons : inspections visuelles, techniques non destructives à base d'ultra-sons (Quiviger, 2012), fissuromètres, etc. De plus amples explications et informations sur le problème de la surveillance de la fissuration sont proposées dans la thèse de J-M Hénault (Hénault, 2013). Cette étude se focalise sur l'aide au diagnostic des ouvrages hydrauliques en terre.

Les Ouvrages Hydrauliques en Terre (OHT)

Les ouvrages hydrauliques sont classés en deux catégories : la première comprend les ouvrages en maçonnerie, dont les barrages ; la seconde concerne les Ouvrages Hydrauliques en Terre (OHT), dont les barrages en remblai et les digues. Le nombre d'OHT de plus de 15m de hauteur dans le monde est de plus de 40 000 aujourd'hui contre un millier avant 1900 (CFBR).

Les OHT sont des ouvrages linéaires étendus sur plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Les propriétaires ou exploitants (des collectivités locales, des organismes d'état ou des entreprises comme l'établissement public Voies Navigables de France (VNF), la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), et l'EDF ont pour responsabilité la prise en charge de leur surveillance et leur réparation (Décret n° 2007-1735).

D'après le retour d'expérience des accidents effectué en 2004 par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), sur un ensemble de 17 500 barrages au niveau mondial construits avant 1986, 105 ruptures ont été relevées (Barthelemy, 2004). Pour les digues, les problèmes sont principalement liés à l'ancienneté de l'ouvrage, à des rehaussements successifs et à la qualité du compactage des matériaux trouvés sur place.

Il existe plusieurs typologies d'OHT (Foster, 2000), mais trois exigences fondamentales doivent être respectées :

- les OHT ne doivent pas être rompus par une surverse en période de crue,
- les infiltrations ne doivent pas provoquer d'érosion interne,
- les talus doivent respecter une certaine pente.

Leurs caractéristiques communes comprennent des parements amont et aval (hors eau) avec la présence possible d'un contre-canal, recueillant les percolations du canal principal, comme illustré sur la Figure 2. La crête de digue peut être de quelques mètres à des dizaines de mètres de largeur et de hauteur.

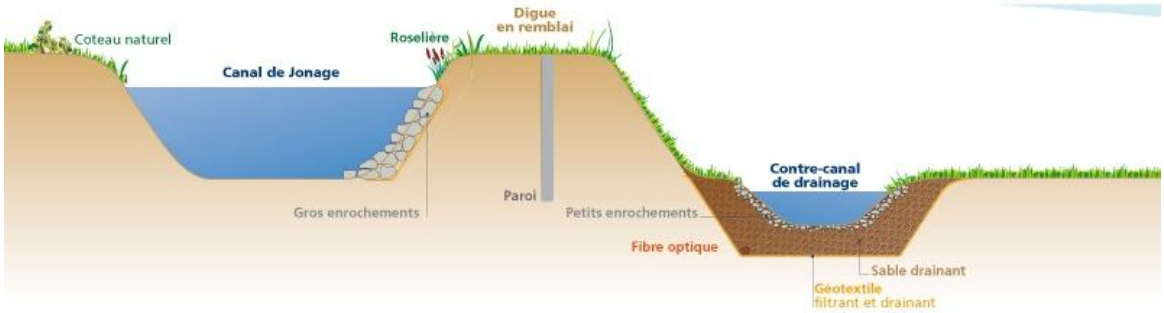


Figure 2 : Illustration d'une typologie d'OHT : schéma du canal d'amenée d'eau de Jonage avec présence d'un contre-canal et d'une fibre optique. Le parement aval est un enrochement ; le parement amont est enherbé et une paroi étanche permet d'assurer la stabilité du remblai (EDF).

Pour se prémunir de la rupture d'OHT, des études ont été effectuées pour déterminer les modes principaux de rupture et ainsi comprendre les différentes pathologies fragilisant les ouvrages hydrauliques en terre. Toujours d'après Foster *et al.* (Foster, 2000), les pathologies à l'origine de la rupture, illustrées sur la Figure 3.a., sont (en % de ruptures identifiées) :

- l'érosion interne : 46.5 %,
- l'érosion externe : 48 %,

- la rupture par cisaillement : 6 %,
- le tremblement de terre : 1,5 %.

L'étude a été réalisée sur 10 000 barrages, dont 128 cas de ruptures ont été identifiés. Plusieurs pathologies pouvant être à l'origine des ruptures, le total dépasse donc les 100%. Les différents types de ruptures sont expliqués ci-après.

Rupture par cisaillement

Lorsque la contrainte de cisaillement du remblai dépasse un seuil limite de résistance du sol, la rupture intervient de manière transversale à la digue sous la forme d'une **loupe de glissement** décrite par un arc de cercle. Le sol se met à glisser vers l'aval, avec un déplacement circulaire d'une partie du remblai. Cela provoque un bombement de la base du sol et la partie haute s'affaisse. Des brèches apparaissent sur la crête de digue et un pan de digue peut s'affaisser suivant le volume de sol mis en jeu (Figure 3. b.). Pour anticiper ce phénomène, les indicateurs importants à maîtriser sont : l'apparition d'une **loupe de glissement**, le **bombement du pied de digue** et **l'affaissement de la partie haute**.

Rupture par érosion externe

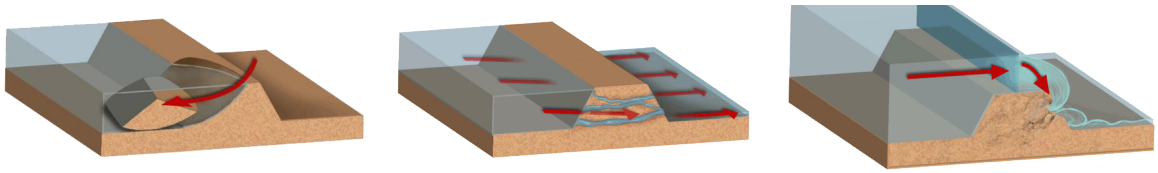
Les phénomènes intervenant dans ce mode de rupture sont les suivants : la **surverse**, et l'**affouillement du talus**. Lorsque le niveau d'eau est supérieur à la crête de digue, le débordement de la retenue sur le talus (**surverse**) va induire une sollicitation hydraulique. Si l'écoulement (dont la vitesse et la turbulence sont les caractéristiques) est supérieur à la résistance du remblai, alors une érosion de surface intervient. Le remblai peut alors se creuser, l'évacuation naturelle de l'eau crée des ravines puis des brèches menant à la rupture de l'ouvrage.

L'**affouillement** correspond à l'érosion en surface de la digue au niveau du contact sol-eau : la vitesse de l'eau et sa turbulence peuvent engendrer un creusement superficiel, puis provoquer des glissements au sein du talus amont, pour enfin créer une brèche. Ce risque est largement dépendant du revêtement du parement amont : enrochements, dalles en béton, etc.

Rupture par érosion interne

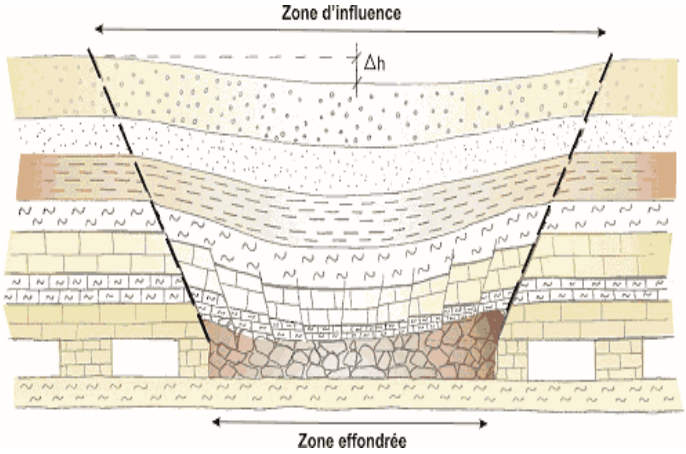
Ce mode de rupture concentre plusieurs phénomènes : **la suffusion**, **l'érosion de contact**, **l'érosion régressive** et finalement **l'érosion de trou**.

La suffusion se développe dans un sol géométriquement instable, c'est-à-dire contenant une fraction fine pouvant être érodée et transportée à travers la fraction grossière. Elle peut se développer dans le remblai ou la fondation, là où un sol instable est soumis à une sollicitation hydraulique suffisamment intense. Le départ de la fraction fine peut engendrer des tassements du matériau, soit la formation de fontis, mais peut engendrer aussi une augmentation de perméabilité ayant des conséquences à l'aval : augmentation de la pression qui favorise un glissement, augmentation du débit de fuite générant un ravinement du parement, claquage hydraulique, etc.



a. *Cisaillement* *Erosion interne* *Erosion externe*

b.



c.

d.

Figure 3 : a. Les principaux mécanismes d'endommagements d'une digue en terre (Beek, 2011). b. Exemple d'une rupture de cisaillement générée lors du projet européen Ijkdijk Macrostability 2011 (Photo Edouard Buchoud). c. Affaissement d'une cavité souterraine d'après le BRGM. d. Mise en évidence d'un fontis sur une digue de l'Isère par l'Association Départementale Isère Drac Romanche.

L'érosion de contact se développe au niveau de l'interface entre deux couches de sol de granulométries différentes lorsque le sol le plus fin (sable, limon…) est entraîné par l'écoulement à travers les pores du sol le plus grossier (graviers…). Ce départ de matériaux a pour conséquence la propagation de tassements au-dessus de la zone d'érosion et peut aussi favoriser la formation d'un renard hydraulique au sein de la couche de sol fin (Béguin, 2012).

L'érosion régressive se développe lorsque des écoulements sortant de l'ouvrage à travers le parement aval ou en pied de talus entraînent des particules du remblai. Le phénomène progresse vers l'amont en générant soit des ravines lorsque le matériau est pulvérulent, soit un conduit lorsque le matériau érodé est surmonté d'un matériau rigide pouvant supporter la formation d'un « toit » (argile, béton, etc.).

Une **érosion de trou** se développe par détachement de particules de sol dans un défaut préexistant du remblai (terrier, fissures, racines…) et peut mener à la formation **d'un renard hydraulique** (conduit) traversant le remblai et/ou la fondation. Le débit de la fuite augmente de manière exponentielle dans la

plupart des cas ou diminuer en fonction du temps, si le conduit s'effondre. La pression interne au sein du parement aval augmente, pouvant favoriser un glissement. Le conduit peut également engendrer des **fontis** c'est-à-dire un effondrement localisé se manifestant sous la forme d'un entonnoir ou d'un cratère, suite au transport de matériaux (Figure 3. c.).

Dans l'environnement de la digue, certains facteurs extérieurs peuvent également être responsables de la fragilité de la structure (construction humaine, végétation, hétérogénéité du substrat, etc.). En effet, les digues sont parfois construites sur des zones géologiques présentant de grandes variétés de couches de terrains. Ainsi, la présence de noyaux de gypse ou de craie, par exemple couplée avec la présence d'eau, peut créer des cavités naturelles (Figure 3. c.). La rupture progressive du toit de ces cavités engendre une cloche remontant plus ou moins lentement à la surface jusqu'à la résurgence d'un cratère pseudo-circulaire à la surface (Figure 3. d.). Plusieurs accidents graves sont survenus suite à l'apparition de fontis au-dessus d'anciennes mines ou souterrains. C'est l'un des indicateurs d'une dégradation importante dans l'ouvrage qui doit être identifiée le plus tôt possible pour mettre des actions adéquates en place.

En résumé, les indicateurs d'une dégradation de la tenue de la structure sont : le fontis, le renard hydraulique, le tassement ou affaissement sur un long linéaire (supérieur à 10 m), la loupe de glissement et la fissuration du radier (en béton, argile) ou des joints du parement. Nous allons voir quelles sont les grandeurs physiques mesurables, les moyens conventionnels de surveillance associés et leurs lacunes, ainsi que les moyens alternatifs de surveillance.

I. 2. Les moyens de surveillance conventionnels

Après avoir présenté les différents défauts pathologiques présents dans les ouvrages en béton et les ouvrages hydrauliques en terre, cette partie est dédiée à l'établissement d'une liste non exhaustive des moyens d'auscultations conventionnels. Nous allons d'abord présenter quelles sont les grandeurs d'intérêt permettant de détecter les différents défauts cités. Dans le cadre de notre étude, nous allons maintenant identifier les différents moyens conventionnels d'auscultation permettant de mesurer la déformation et le déplacement d'une structure.

I.2.1. Les grandeurs physiques d'intérêt

Pour un même phénomène, plusieurs grandeurs synthétisées dans le Tableau 1 peuvent être intéressantes à mesurer. Par exemple, pour la formation d'un renard hydraulique, et donc d'une fuite, la température est une grandeur qui a été prouvée fiable pour leur détection (Khan, 2009). La teneur en eau, et donc le potentiel électrique du béton (Mitzithra, 2013), est une grandeur qui permet de détecter la corrosion des armatures du béton armé, mais également la présence de fuites au sein d'ouvrages hydrauliques (Al-Saigh, 1994 ; Fargier, 2011).

Les grandeurs physiques liées à la présence d'eau ne peuvent pas quantifier le gonflement ou la fissuration dans une structure, seules les mesures de déformation ou de déplacement en sont capables. En effet, le comportement mécanique d'une structure est lié aux contraintes appliquées, notées σ. Une contrainte s'exprime comme le rapport entre la force imposée F et la surface S sur laquelle elle est appliquée : $\sigma = \frac{F}{S}$, étant donc homogène à la pression. Une contrainte est exprimée en Pa ou MPa.

La déformation ε correspond à la différence relative de longueur L entre deux états de l'échantillon de matériau étudié telle que $\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$. Elle est exprimée en % ou en µm/m. Si le matériau s'est allongé,

alors la déformation est positive et on parle de phénomènes de « traction » ou aussi de « dilatation ». Si la déformation est négative, le matériau s'est contracté et on parle d'une « compression ».

Tableau 1: Les différentes grandeurs physiques permettant de quantifier les indicateurs identifiés lors des phénomènes de rupture dans des ouvrages de génie civil.

Phénomène	Température	Déformation	Déplacement / Tassement	Pression	Teneur en eau	Débit	Potentiel électrique
Fissure		x	x	x			
Corrosion					x		x
Renard Hydraulique / Fuite	x	x	x	x	x	x	x
Fontis		x	x	x			
Loupe de glissement		x	x	x			

Plus généralement, les déformations et les contraintes sont des tenseurs notés ε_{ij} et σ_{ij} se référant aux indices des repères utilisés. Le tenseur des déformations est défini à partir du vecteur de déplacement $\vec{u}$ selon : $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$. Il est symétrique par définition : les ε_{ii} sont les déformations provenant de la dilatation ou de la compression, alors que les ε_{ij} $(i \neq j)$ correspondent au cisaillement (Figure 4).

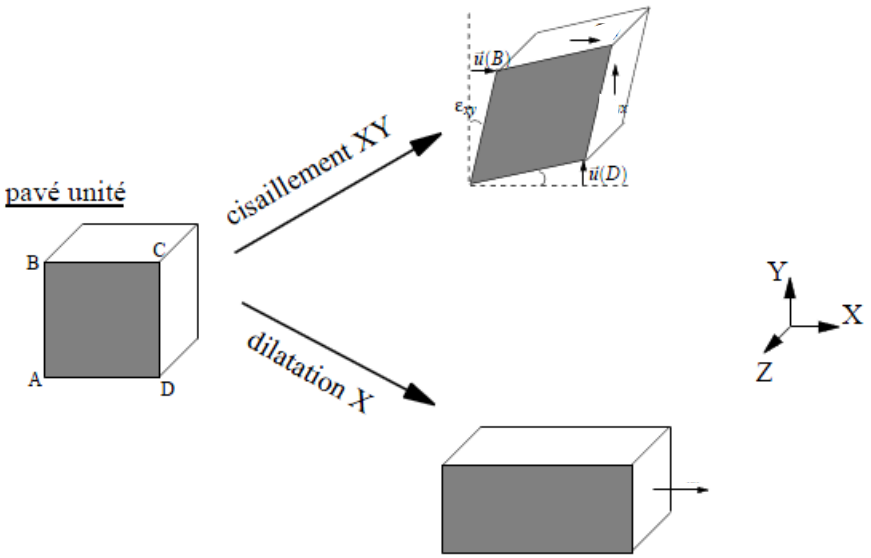


Figure 4 : Effet d'un cisaillement et d'une dilatation sur un cube unité (Lanticq, 2009).

Le cahier des charges des maîtres d'ouvrages pour la détection, localisation et la quantification de déplacements pour les défauts cités est présentés dans le Tableau 2. Il permet de comprendre les spécifications souhaitées pour la détection d'un défaut (de l'ordre du centimètre) et sa quantification (de l'ordre du millimètre). Nous allons alors étudier les différentes solutions permettant de mesurer le déplacement et la déformation dans une structure en génie civil.

Tableau 2 : Cahier des charges pour la détection, la localisation et la quantification des défauts pathologiques identifiés.

Défauts pathologiques à détecter	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Déplacement minimal à quantifier
Fissures	10 cm (maille de ferraillage)	1 mois (hors épreuve enceinte)	0.3 mm
Fontis	40-50 cm	1 mois (toutes les deux semaines si fontis détecté)	3 mm
Renard hydraulique	5 – 10 cm	2 semaine (si fuite avérée hebdomadaire)	1 mm
Glissement	1 – 5 cm	Mensuel - annuel	Détection uniquement (seuil à déterminer)
Tassements	5 m	Mensuel - annuel	De l'ordre du mm

I.2.2. Définition des grandeurs métrologiques d'un capteur

Un capteur est composé d'un transducteur dont la fonction est de transformer la grandeur physique d'intérêt en information mesurable. Il peut être couplé avec un interrogateur ou instrument de mesure qui comporte un affichage et / ou un traitement de données.

La définition de grandeurs métrologiques est nécessaire pour effectuer une comparaison des performances métrologiques des capteurs utilisés :

Le mesurande est la grandeur physique à mesurer.

L'erreur (de mesure) ou la *justesse* est la différence entre la véritable valeur du mesurande et le résultat fourni par l'appareil de mesure.

La grandeur d'influence est une grandeur physique qui influence la mesure.

La fidélité est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications voisines lors de mesures successives dans les mêmes conditions. Elle peut être quantifiée par la répétabilité.

La justesse et la fidélité permettent d'estimer l'incertitude du système. Un système de mesure juste et fidèle est dit exact.

L'étendue de mesure est le domaine de variation dans lequel l'appareil est opérationnel.

I.2.3. Les capteurs conventionnels pour la mesure de déplacement et de déformation

Les capteurs de déplacements

Les jauges extensométriques

Les jauges extensométriques de type LVDT (pour Linear Variable Differential Tranformer) sont composées d'un transformateur (constitué de trois bobines) et d'un noyau magnétique. La Figure 5.a.

schématise une jauge LVDT. La tension dans les bobines est proportionnelle au déplacement du noyau. Si celui-ci bouge, alors la différence de tension entre les bobines permet de remonter au déplacement subi par le noyau. L'avantage de ce type de capteur est l'absence de contact électrique entre les éléments, ce qui lui confère une grande répétabilité, une durée de vie importante et une incertitude de l'ordre de 0.1 µm.

Les capteurs à câbles

Issu d'un principe de fonctionnement très simple, le capteur transforme le déplacement linéaire du câble en déplacement rotatif grâce à un tambour relié à un ressort de rappel. Par l'intermédiaire d'un potentiomètre solidaire de l'axe du tambour, le signal fourni (courant ou tension) est proportionnel au déplacement du câble (Figure 5.b.). Leur précision est de l'ordre de 1 % de l'étendue de mesure. Leur résistance à la traction et à des conditions de températures extrêmes leur permet d'être utilisés pour la mesure de niveaux de liquides dans des puits et réservoirs, mais aussi dans l'industrie pétrolière et gazière.

Les capteurs de déformation

Les capteurs à corde vibrante

Un capteur à corde vibrante mesure la déformation d'une corde en acier fixée entre deux points. La fréquence fondamentale f d'une corde augmente en fonction de sa tension, selon l'équation :

$$f = \frac{1}{2.l}\sqrt{\frac{E.\varepsilon}{\rho}} \qquad \text{(I-1)}$$

où l est sa longueur, E son module d'Young, ε la déformation (exprimée en µm/m) et ρ sa masse volumique.

Les capteurs à corde vibrante sont composés d'une corde vibrante, d'une partie transmettant la force exercée au capteur sur la corde et d'une partie électronique permettant de mesurer la fréquence fondamentale de la corde (Figure 5.c.). Les capteurs à corde vibrante sont aussi sensibles à la température. Une sonde de température est donc nécessaire pour corriger la mesure de déplacement.

Dans le contexte où il est nécessaire d'avoir une sécurité maximale (par exemple, pour surveiller les contraintes et les déplacements au niveau d'une route près d'une mine en construction ou de ponts (Vurpillot, 1999 ; Shen, 2008)), on multiplie les capteurs de déplacement avec l'utilisation des capteurs à corde vibrante et LVDT.

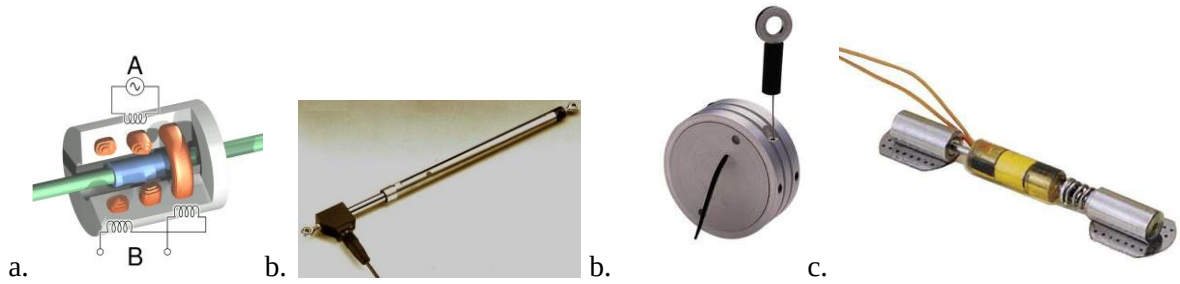


Figure 5 : a. Principe de fonctionnement d'une LVDT : A est le transformateur primaire ; B le secondaire. Le noyau est l'élément cylindrique (Lanticq, 2009). b. LVDT industriel commercialisé par Sensorex. c. Capteur à câble commercialisé par Direct Industry. d. Capteur à corde vibrante commercialisé par Stump FORATEC.

Ces capteurs sont considérés comme des capteurs de référence dans le domaine de surveillance. Ils peuvent être noyés dans le béton pour faire une mesure périodique selon la fréquence demandée. Toutefois, ces capteurs ne sont pas adaptés pour la mesure de déplacement sur un ouvrage en terre de grandes dimensions. Les mesures de déplacements / tassements sont effectuées périodiquement (tous les 5 à 10 ans sur les digues) par topographie. Selon les techniques de mesure, cela permet de quantifier des déplacements verticaux centimétriques ou décimétriques.

Le lieu d'apparition des fissures dans le béton n'étant pas forcément prévisible, les systèmes ponctuels ne sont pas adaptés à leur détection. En général, l'exploitant détecte leur présence par inspection visuelle des parties accessibles du parement et assure leur suivi en installant des fissuromètres à base de LVDT.

La particularité des structures de génie civil est qu'elles présentent de grands linéaires ou de grandes surfaces. Un enjeu majeur de leur surveillance est la représentativité des mesures. Le Maitre d'Ouvrage doit disposer d'un nombre suffisant de capteurs à des emplacements adaptés afin de disposer d'une image représentative du comportement de la structure et de son évolution. D'autre part, afin d'optimiser les coûts d'installation et de maintenance, le nombre de capteurs à installer est souvent limité.

I. 3. Les moyens d'auscultation alternatifs

Les moyens de mesure traditionnels ne permettent qu'une faible représentativité du comportement mécanique des structures instrumentées. Pour répondre au cahier des charges discuté avec EDF (Tableau 2), les techniques de mesure à grand rendement sont particulièrement intéressantes pour avoir des mesures de déformations ou de déplacements échantillonnées avec un pas métrique sur plusieurs dizaines de mètres ou kilomètres. Il en existe deux familles fondées sur les techniques d'imagerie aéroportée ou satellitaire et sur des techniques optiques et qui feront l'objet des paragraphes suivants.

I.3.1. Les capteurs basés sur l'imagerie

La photogrammétrie

Cette technique consiste à prendre une photographie de la surface de l'ouvrage à plusieurs instants. L'intercorrélation des images permet alors de comparer les images entre elles. En identifiant des points de référence naturels (fissures, irrégularités, …) ou artificiels (mouchetis lorsque la surface est lisse), il est possible alors de mesurer le déplacement de ces points entre deux instants de prise de vue. Grâce à l'amélioration de la qualité des appareils photographiques ou des caméras, il est actuellement possible de détecter l'apparition de fissures dans du béton de l'ordre de 10 µm (Küntz, 2006). Cette technique est efficace pour des ouvrages en béton d'une surface de l'ordre de la centaine de mètres carrés (aéroréfrigérant) et de petits ouvrages en géomatériaux (Béguin, 2012).

Scanneur laser

Les scanners laser émettent un faisceau lumineux (domaine du visible ou infrarouge) en vue d'effectuer une mesure de distance sans contact grâce à deux techniques :

- Les mesures de temps de vol : cela consiste à mesurer le temps de vol des pulses laser émis par l'appareil puis réfléchis par l'objet sur lequel on veut acquérir les coordonnées de points

par rapport à l'origine du scanner. La vitesse de la lumière dans l'air étant connue, la mesure permet de déterminer la distance parcourue.

- Mesures de décalage de phase : le signal laser est modulé et la phase du signal réfléchi est mesurée et comparée à la phase du signal émis.

Pour ces deux principes, un miroir balaye la scène et produit un ensemble de points échantillonnant en trois dimensions les surfaces des objets ou de l'ouvrage. Il existe deux modes d'acquisition : statique ou dynamique. Le premier consiste à faire un ou plusieurs scans de la structure de proche en proche pour couvrir la surface de la structure. La mesure du déplacement se fait à intervalles de temps réguliers, en corrélant des points d'intérêt préalablement choisis. Les performances de cette technique sont : une incertitude de mesure de + /- 1.1 mm à 25 m de l'ouvrage. La performance de la mesure se dégrade peu avec la distance à l'ouvrage (jusqu'à 80 m pour l'appareil le plus performant). La deuxième technique consiste à effectuer les mesures en mouvement pour surveiller une surface plus importante. Pour cela, les opérateurs utilisent le LiDAR (pour Light Detection and Ranging) qui possède une résolution spatiale de 10 cm. Ces systèmes commencent à être utilisés pour la surveillance d'ouvrages autoroutiers, de pans de montagnes, ainsi que des digues (Gomes, 1999) avec différents modes d'acquisition : aéroporté ou au sol. Mériaux *et al.* (Mériaux, 2013) a décrit une méthodologie d'exploitation des données de télédétection d'un LiDAR héliporté pour le diagnostic de digues fluviales. Pour aboutir à un diagnostic complet, la complémentarité avec d'autres moyens d'auscultation demeure indispensable. En cas de digue en crue ou post-crue, cette méthode peut être potentiellement efficace malgré un coût assez élevé dû au mode de transport, de l'ordre de 1500 à 2000 euros / km pour l'hélicoptère (Mériaux, 2013).

Imagerie Radar

Basé sur la même technique que les scanneurs laser, le système radar envoie une onde électromagnétique pouvant varier du MHz au GHz selon le domaine d'application. Pour la surveillance d'ouvrages, la bande X est la plus souvent utilisée (8-12GHz). Grâce à la réflexion de l'onde radar sur des cibles (cônes de réflexion), il est possible de mesurer la position de la cible avec une incertitude de l'ordre du µm (Durville, 2009). Néanmoins, dû à l'hétérogénéité du milieu de propagation de l'onde, qui est en général l'atmosphère, un biais est introduit. Pour le corriger, des cibles fixes sont installées près du site étudié afin de calibrer le système d'acquisition.

Certains types de capteurs radars sont basés sur le principe de l'ouverture synthétique radar (en anglais : synthetic aperture radar (SAR)) qui permet d'obtenir des images radar avec une résolution spatiale de l'ordre du décimètre, mais une précision de déplacement de surface inférieure au millimètre. L'image peut couvrir plusieurs centaines de mètres carrés, voire des kilomètres carrés, selon le mode de mesure (satellitaire, aéroporté, au sol, etc.).

Imagerie interférométrique radar

Le principe de la technique d'interférométrie consiste à combiner deux images radar prises à deux instants. L'analyse de la phase permet d'estimer le déplacement relatif entre les deux instants. La résolution de l'image est de l'ordre de la dizaine de mètres carrés pour un pixel. L'application principale est la surveillance de villes (Carnec, 2002), de glissements de terrain (Delacourt, 2004) ou de glaciers (Vasile, 2012). Ces capteurs à grand rendement permettent de mesurer de manière assez précise les déplacements de points de référence (corners réflecteurs) de surface de l'ordre du millimètre. La technique d'interférométrie radar satellitaire permet de mettre en place une solution de surveillance d'ouvrages ayant pour avantages : un faible coût financier à moyen et long terme, une

densité spatiale de mesure importante, une fréquence de mesure pouvant s'échelonner entre 4 et 11 jours au minimum selon le satellite utilisé. Cette méthode, nécessitant peu voire pas de matériel installé sur site, est particulièrement intéressante pour la problématique de surveillance de barrages (Hochard, 2012).

Toutes ces techniques de mesure concilient mesures de déformations surfaciques de très haute résolution et grand rendement. Leur utilisation occasionnelle en complément des capteurs conventionnels est intéressante pour faire un bilan précis de la structure suite à un aléa naturel tel qu'un séisme ou une crue, sans une logistique importante. Toutefois, dans le cas de mode de rupture lents (érosion interne ou externe), une détection précoce des phénomènes est nécessaire au sein de la structure, et non en surface. Leur utilisation n'est donc pas adaptée.

I.3.2. Les capteurs à fibres optiques

Nous avons vu que la plupart des pathologies identifiées trouvent leur origine dans l'érosion interne de la structure. Lorsqu'un défaut apparait au sein de la structure, telle une fissure dans le béton ou un affaissement de la surface du remblai lors de fontis, la déformation alors induite est irréversible. Pour une détection anticipée de ces phénomènes, il est donc nécessaire de mesurer les déformations ou les déplacements au sein des structures de manière à compléter les capteurs conventionnels. Une option intéressante est l'utilisation d'un capteur à fibre optique. Dans le secteur des télécommunications, les fibres optiques ont l'avantage de transporter de l'information sur des kilomètres. Des techniques de mesure utilisant comme élément sensible la fibre optique ont été mises au point. Nous allons étudier leur fonctionnement pour comprendre l'intérêt de les intégrer dans le système de surveillance d'ouvrages.

En complément des capteurs traditionnels, il est désormais possible d'instrumenter les ouvrages avec des capteurs à fibre optique. Leur apparition coïncide avec l'intérêt porté au développement de systèmes de communications longues distances dans les années 60 grâce au développement de la technologie conjointe du laser et de la fibre optique.

La fibre optique

Une fibre optique est un cylindre en silice qui permet de guider une onde électromagnétique en la confinant entre deux couches d'indices de réfraction différents : le cœur à un diamètre de 9 à 50 µm et la gaine optique de l'ordre de 125 µm (Figure 6). Elle est largement utilisée en télécommunications (Fowles, 1975), car elle permet de transmettre de l'information sur de très longues distances avec un débit important grâce à la possibilité de multiplexage.

Selon le diamètre du cœur, il existe plusieurs types de fibres :

- Les fibres monomodes (diamètre de cœur < 10µm) conçues pour guider une seule onde électromagnétique (appelé aussi mode). Ceci a pour conséquence de faire disparaître le phénomène de dispersion intermodale, ce qui induit moins de pertes au niveau de l'information optique.
- Les fibres multimodes (diamètre de cœur > 10µm), à saut d'indice, qui permettent le multiplexage de plusieurs modes, mais avec pour conséquence l'apparition d'une dispersion intermodale, ce qui induit une réduction de la bande passante de la fibre.

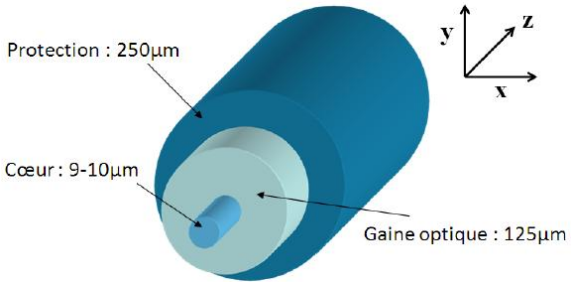


Figure 6 : Structure interne d'une fibre optique monomode.

Les fibres optiques sont fabriquées à partir d'un barreau de verre étiré à haute température, puis recouvert d'un revêtement primaire, qui le protège des agressions chimiques. Elles ont l'avantage d'être insensibles aux champs électromagnétiques, légères, peu encombrantes et donc peu intrusives. Grâce à leur faible atténuation de la puissance optique injectée, le transport d'information sur longues distances en fait leur principale fonction dans le domaine des télécommunications. Leurs propriétés sont peu impactées dans des conditions de très hautes températures, et elles présentent une bonne résistance aux rayonnements nucléaires (dépendant de la protection des fibres). La fabrication d'une fibre optique est également très peu coûteuse.

Les différentes familles de capteurs à fibre optique

Un capteur à fibre optique est composé d'un transducteur optique ou « interrogateur » qui va interroger l'élément sensible (ou « corps d'épreuve ») qui réagit au mesurande. L'appareil va alors fournir une grandeur physique mesurable.

On distingue deux familles de capteurs à fibre optique :

- **Extrinsèque** : la fibre optique sert à transmettre l'information entre le capteur et le transducteur,
- **Intrinsèque** : la fibre optique est l'élément sensible du capteur, tout en assurant la transmission au détecteur du mesurande.

Dans notre étude, nous nous intéresserons qu'aux capteurs à fibre optique intrinsèques. Il en existe trois types : **les capteurs ponctuels**, les **capteurs de longue base de mesure** et **les capteurs répartis**, distinguables par la limitation de la zone sensible de mesure dans la fibre optique. Les premiers sont limités à quelques centimètres (capteurs à réseau de Bragg), les deuxièmes à quelques mètres (capteurs interférométriques) et, enfin, les derniers permettent l'acquisition d'un profil continu sur une portée kilométrique.

Les capteurs à réseau de Bragg

Un réseau de Bragg implique une variation de l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique, réalisée à intervalle régulier par photo-inscription (Ferdinand, 1999). Le réseau réfléchit la lumière à une certaine longueur d'onde, appelée longueur d'onde de Bragg, qui est fonction du pas du réseau. Lorsque le réseau est sollicité mécaniquement ou thermiquement, ses caractéristiques influent sur la longueur d'onde de Bragg (Ferdinand, 1999). Ce principe permet de mesurer à l'endroit où est positionné le réseau la déformation et / ou la température dans la fibre optique. Plusieurs réseaux peuvent être inscrits avec des espacements allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. Un compromis doit être trouvé entre l'étendue de mesure souhaitée et le nombre de réseaux.

Un même interrogateur peut être relié à plusieurs fibres, soit plusieurs centaines de réseaux et donc de points de mesure.

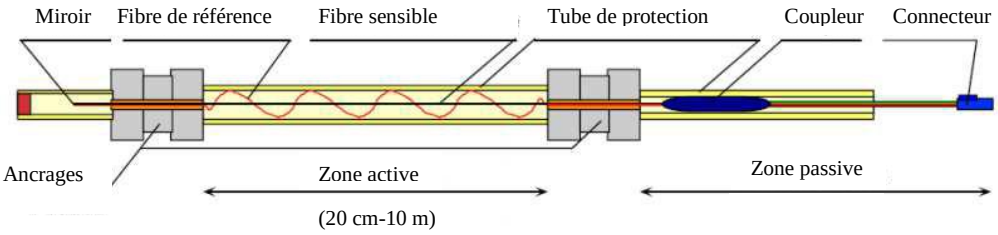
Les capteurs à réseaux de Bragg (Figure 7) sont composés de fibres comportant des réseaux de Bragg encapsulés dans des revêtements, pouvant servir à mesurer la température (la fibre optique est libre dans le revêtement) ou la déformation (la fibre optique est alors liée au revêtement).

L'étendue de mesure en déformation peut éteindre ± 10 000 µm/m avec une erreur relative de l'ordre de quelques pourcents (caractéristique d'un capteur industrialisé HBM). Grâce à la diminution des coûts des produits et un multiplexage important, ils peuvent concurrencer les capteurs traditionnels dans le domaine du génie civil à des fins de surveillance de structures (CEMENTYS).

Figure 7 : Capteurs à réseaux de Bragg adaptés à la surveillance de structures en génie civil noyés dans le béton (photo CEMENTYS).

Les capteurs interférométriques :

Le fonctionnement de ces capteurs de longue base de mesure repose sur le phénomène d'interférence de la lumière. Les capteurs interférométriques de type Michelson reposent sur l'interférence des signaux issus de deux bras de fibre optique terminés par des miroirs : une fibre liée à des ancrages, l'autre restant libre dans le capteur (Figure 8. a.). Ce dispositif permet d'estimer la déformation en ayant l'avantage d'être auto-compensé en température grâce à la fibre optique libre. Le capteur SOFO a été développé spécifiquement sur ce principe pour une application de génie civil en l'insérant dans le béton. Cette technique d'installation est la même pour l'extensomètre à corde vibrante (Cumunel, 2008). Ce système de mesure intègre le mesurande sur toute la longueur de la fibre optique. Pour ce type de capteurs, il est possible d'avoir une mesure de déformation pour une base de 1 m à plusieurs mètres (Figure 8. b.). Cette technique ne permet pas de multiplexage dans les fibres sensibles ; par contre si plusieurs SOFO sont placés dans la structure, il est possible de les interroger séparément avec le même interrogateur (Roctest Group).



a.

b.

Figure 8 : a. Principe d'un capteur interférométrique de type Michelson. b. Application d'un capteur SOFO sur une poutre en acier (Images extraites de Cumunel, 2008).

I.3.3. Les capteurs à fibre optique répartis

La dernière famille de capteurs à fibre optique permet des mesures réparties continûment au sein de la fibre optique et sur des longueurs de fibre importantes. Ce sont des avantages indéniables par rapport aux autres techniques lorsqu'on s'intéresse à la surveillance d'ouvrages de grandes dimensions. La technique de mesure est basée sur le phénomène de la diffusion de la lumière au sein de la fibre.

I.3.3.1. Phénomènes de diffusion dans la silice

Le laser injecté dans la fibre optique est une onde monochromatique caractérisée par une fréquence v_0, donc de longueur d'onde λ_0. A l'encontre des aspérités de la silice, une partie de l'onde est diffusée de manière isotrope dans le milieu, l'autre étant absorbée par le matériau. Comme la fibre optique est un guide d'onde privilégiant les deux sens de propagation, seules les parties diffusées et rétrodiffusées par rapport au sens de la propagation de l'onde incidente se propageront dans le milieu.

A l'échelle microscopique, l'étude du spectre de l'onde diffusée met alors en évidence trois phénomènes types d'interaction lumière – matière : Rayleigh, Brillouin et Raman (Figure 9).

Le phénomène Rayleigh est dû à la diffusion élastique entre les molécules de silice et les photons incidents. Le photon rétrodiffusé conserve alors une fréquence identique.

Le phénomène Brillouin est dû au mécanisme de diffusion inélastique dans un matériau. L'échange d'énergie entre la matière et la lumière implique un décalage de longueur d'onde entre les lumières incidente et rétrodiffusée. Dans le domaine fréquentiel, cela se manifeste par :

- Le décalage Stokes : la fréquence de la lumière est décalée vers une fréquence supérieure à la fréquence incidente. Au niveau atomique, cela se traduit par la création du photon par la matière.
- Le décalage anti-Stokes : la fréquence de la lumière est décalée vers une fréquence inférieure à la fréquence incidente. Cela se traduit par l'absorption d'un photon.

La valeur du décalage de fréquence dépend des caractéristiques du milieu étudié, et elle est de l'ordre du GHz dans la silice. Selon l'agitation thermique de la silice et sa structure cristalline, le décalage de fréquence peut varier sur quelques MHz. Ce décalage est sensible à la température et à la déformation dans la silice, puisque ces phénomènes influent sur l'agitation thermique de la silice.

Le phénomène Raman est également dû au mécanisme de diffusion inélastique, mais il n'est sensible qu'aux vibrations moléculaires (essentiellement dues à la température du matériau). En termes

d'énergie dans la silice, ce mécanisme est beaucoup plus important que celui engendrant le phénomène Brillouin et va donc se traduire par un décalage fréquentiel plus important d'environ 13 THz. L'amplitude des composants anti-Stokes n'est sensible qu'à la température.

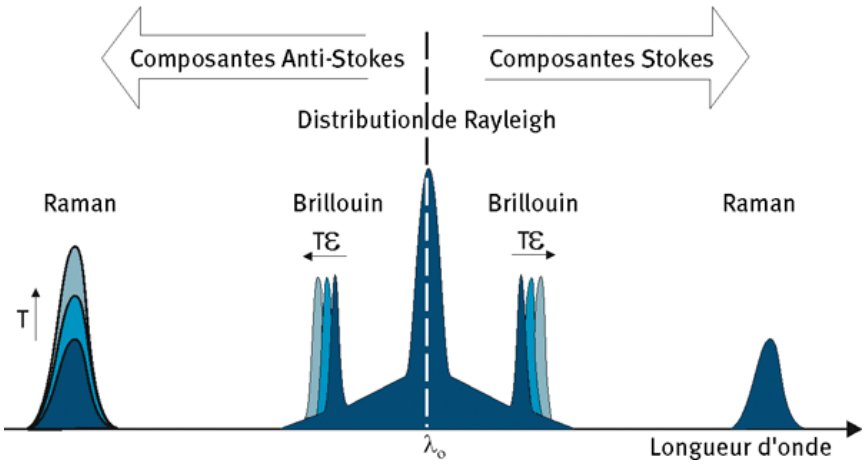


Figure 9 : Illustration des phénomènes de diffusion présents dans le spectre de lumière rétro-diffusée dans la silice (Artières, 2012).

Ces interactions s'effectuent à chaque point d'incidence de la lumière. En analysant le spectre rétrodiffusé de la lumière, il est alors possible d'obtenir des informations sur la température et la déformation à chaque endroit de la silice. Basés sur ce principe, les capteurs à fibre optique utilisent plusieurs techniques de télémétrie optique que nous allons étudier.

I.3.3.2. Télémétrie optique

I.3.3.2.1. L'OTDR

La technique de réflectométrie optique dans le domaine temporel (OTDR pour Optical Time Domain Reflectometry) est la plus utilisée. Cette technique exploite la rétrodiffusion de la même façon qu'un radar ou un LiDAR. Le principe de mesure est illustré sur la Figure 10. Une impulsion lumineuse incidente est envoyée à une extrémité de la fibre optique. La lumière rétrodiffusée revient vers celle-ci où sa puissance P_s est mesurée en fonction du temps t :

$$\boldsymbol{P_s(t)} = P_o.\boldsymbol{r(z)}.e^{-\int_0^z 2.\boldsymbol{\alpha(z)}.dz}, \qquad \text{(I-2)}$$

avec P_o une constante dépendant de l'énergie de l'impulsion incidente et du rapport de division de puissance du coupleur, $\boldsymbol{r(z)}$ le coefficient effectif de rétrodiffusion par unité de longueur, α le coefficient d'atténuation de la fibre optique et z la distance répartie dans la fibre optique fournie par la relation suivante :

$$\boldsymbol{z} = \frac{c.\boldsymbol{t}}{2.n}, \qquad \text{(I-3)}$$

où c est la célérité de la lumière dans le milieu et n l'indice de réfraction de la silice.

L'analyse du logarithme de la puissance de la lumière en fonction du temps permet la détection et localisation de défauts dans la fibre et de soudures optiques (Wuilpart, 2007). Dans le cas idéal où la fibre est soumise à un environnement uniforme, le logarithme de la puissance de l'onde envoyée décroit de manière linéaire avec le temps à cause des pertes intrinsèques. Une perte ou un gain

d'atténuation de l'intensité lumineuse rétrodiffusée dans la fibre équivaut à un défaut dans la structure de la fibre optique ou à une soudure optique (Barnoski, 1978).

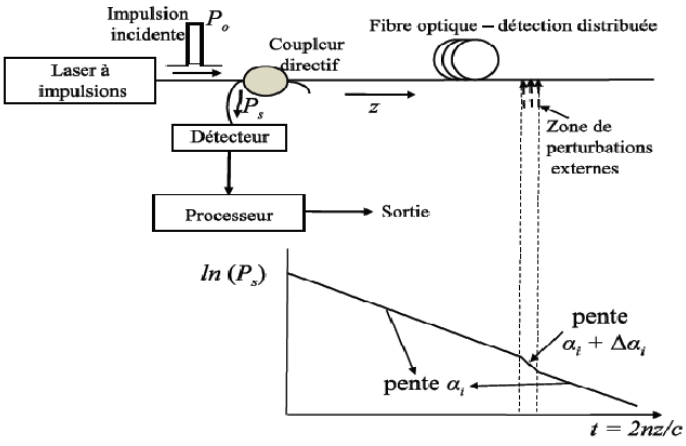


Figure 10 : Configuration expérimentale de mesure d'un OTDR (Lanticq, 2009).

Cette technique de mesure introduit des nouvelles notions pour caractériser les performances des mesures réparties :

L'excursion de mesure (ou longueur d'auscultation)

Pour les capteurs à fibre optique en général, l'excursion est la longueur totale de transducteur interrogeable avec un laser. Si la zone à mesurer ne commence pas immédiatement après l'appareil, nous indiquerons les positions de début et fin. L'excursion de mesure est limitée par les pertes linéaires dans la fibre lors de la propagation de l'onde, quantifiées par α. Pour les fibres utilisées dans les télécommunications, le coefficient d'atténuation vaut $\alpha = 4.5\ 10^{-5} m^{-1}$ (Lanticq, 2009). L'excursion maximale est proportionnelle à un rapport signal sur bruit (RSB) minimal (fixé par les constructeurs à 2 pour un OTDR classique) :

$$L_{max} = \frac{1}{2.\alpha.RSB_{min}} \approx 20km. \qquad \text{(I-4)}$$

La base de mesure

C'est la longueur sur laquelle le mesurande est moyenné par l'interrogateur (Figure 11). Dans le cas de l'OTDR, cette longueur est liée à la durée de l'impulsion de l'onde lumineuse $\Delta\tau$ par la relation :

$$w = \frac{c.\Delta\tau}{2.n}, \qquad \text{(I-5)}$$

où c est la célérité de l'onde dans la fibre optique et n l'indice de réfraction de la silice. Typiquement, pour une fibre optique standard de télécommunication, et une impulsion de durée de 10ns, la base de mesure sera de 1 m.

Le pas de mesure Δz est le décalage spatial entre deux bases de mesure. Si le pas de mesure est inférieur à la base de mesure, alors il y a forcément redondance d'information entre les deux mesures du mesurande.

L'incertitude de localisation est spécifique au capteur réparti. Lorsque l'excursion de mesure augmente, l'incertitude augmente à cause de la variabilité de la valeur de l'indice du milieu *n* (Eq. I-3), qui est due à l'inhomogénéité de la fibre optique et des conditions rencontrées (déformation, température) lors de son utilisation.

Finalement le résultat d'une mesure répartie correspond à un profil du mesurande en fonction de la distance avec un point de mesure tous les pas de mesure *Δz*, chaque point correspondant au moyennage de la mesure sur la base de mesure *w*.

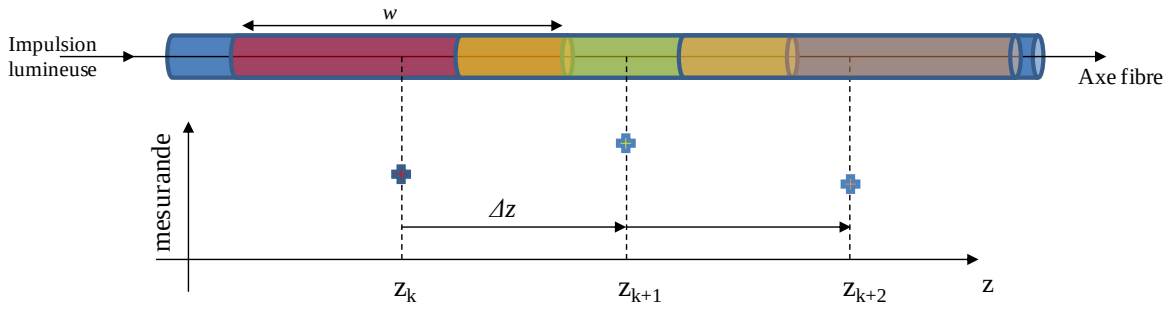


Figure 11 : Illustration de la mesure distribuée par OTDR et de ses spécificités.

I.3.3.2.2. L'OFDR

La réflectométrie par modulation de fréquence (OFDR pour Optical Frequency Domain Reflectometry) repose sur la génération d'une modulation de la fréquence de l'onde lumineuse quasi-continue (Figure 12). La transformée de Fourier du signal retour correspond à une trace temporelle d'intensité de rétrodiffusion. Il a été démontré que la résolution spatiale Δz d'un tel capteur est inversement proportionnelle à l'excursion en fréquence Δv du laser accordable qui le compose (Glombitza, 1993) tel que :

$$\Delta z = \frac{c}{2.n_G.\Delta v}, \qquad \text{(I-6)}$$

où n_G est l'indice de groupe du milieu. Plus Δv est grand, plus le pas de mesure est petit, ce qui permet d'atteindre une résolution spatiale de 1 mm (Soller, 2005). On comprend ainsi l'avantage de ce type de technologie.

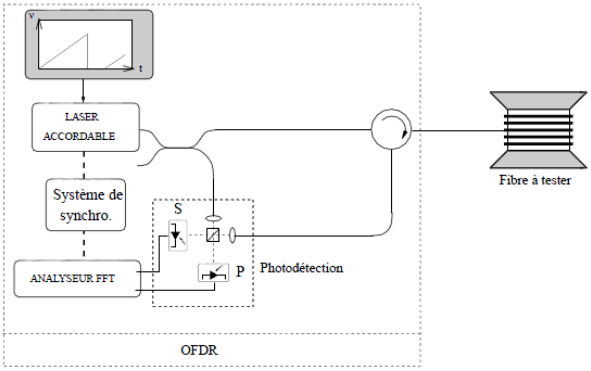


Figure 12 : Configuration expérimentale de mesure d'un OFDR (Lanticq, 2009).

I.3.3.3. Mesures réparties de déformation et de température

I.3.3.3.1. Par retro-diffusion Rayleigh

S'appuyant sur le principe de l'OFDR, il est possible de mesurer la déformation et la température dans la fibre optique grâce à la mesure du spectre Rayleigh du signal rétrodiffusé. Comme celui-ci est sensible aux modifications locales de la fibre optique, la comparaison de deux mesures pour deux états (de référence, en rouge, et modifié, en bleu) de la fibre permet d'obtenir une mesure répartie de la déformation ou de la température relative. Ce principe de mesure est illustré sur la Figure 13. En sélectionnant une base de mesure *SR*, on applique la transformée de Fourier aux données mesurées dans cette zone. Un pic à fréquence $\Delta\nu_R$ apparaît dans le résultat de l'intercorrélation entre les deux transformées de Fourier. Cette fréquence est relative à la déformation et la température dans la fibre optique (Frogatt, 1995).

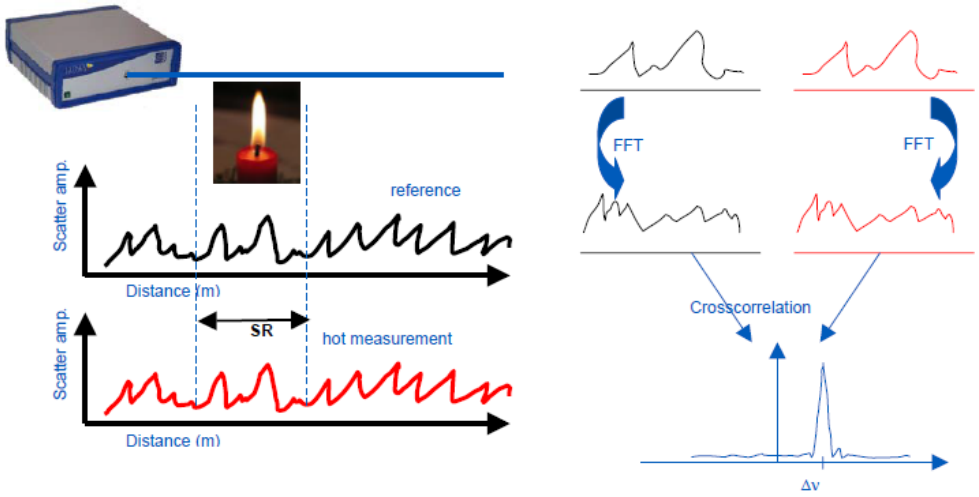


Figure 13 : Principe de mesure de la déformation ou la température relative dans la fibre optique par diffusion Rayleigh (Hénault, 2013).

En translatant du pas de mesure Δz la zone d'intercorrelation, un profil de décalage fréquentiel est obtenu tout au long de la fibre. La dépendance du décalage fréquentiel à la déformation $\boldsymbol{\varepsilon(z)}$ et à la variation de température $\boldsymbol{\Delta T(z)}$ est décrite par la relation suivante (Frogatt, 1995) :

$$\boldsymbol{\Delta\nu_R(z)} = C_T^R.\boldsymbol{\Delta T(z)} + C_\varepsilon^R.\boldsymbol{\varepsilon(z)} \qquad \text{(I-7)}$$

où $\boldsymbol{z}$ est l'abscisse curviligne dans la fibre optique échantillonnée avec le pas de mesure Δz, C_T^R et C_ε^R sont des coefficients de calibration qui dépendent de la fibre optique et de la longueur d'onde du laser utilisé. Pour une fibre monomode standard de type G.652, les coefficients ont été calibrés à -1,25GHz/°C et -0.15GHz/$\mu\varepsilon$, pour une longueur d'onde de 1550 nm. De par la valeur des coefficients de calibration, cette technique de mesure est bien plus sensible à la variation de température qu'à une variation de déformation. C'est l'un des principaux points faibles de ce type de capteur dans le contexte d'une application de mesure de déformation.

Les mesures réparties par technologie Rayleigh présentent des performances intéressantes en termes de pas de mesure (jusqu'au millimètre) et d'incertitudes de mesure en température (+ /- 0.1 °C) et en déformation (+ /- 1 µm/m). Néanmoins, à cause d'un problème de cohérence de signaux, la longueur

d'auscultation maximale est de 70 m pour un pas de mesure centimétrique et les mêmes performances métrologiques. Les applications sont donc limitées à l'étude en laboratoire de structures de taille limitée comme celles des poutres en béton (Hénault, 2012 ; Villalba, 2012), ou des pales d'éolienne en composites (Guemes, 2010), etc.

I.3.3.3.2. Par rétro-diffusion Brillouin

La rétro-diffusion Brillouin est due à l'interaction de la lumière avec les ondes acoustiques qui se propagent dans la fibre. Cela entraîne un décalage fréquentiel du spectre Brillouin (Figure 14) : le spectre est centré en une fréquence v_B, appelée fréquence Brillouin, qui s'exprime par :

$$v_B = \frac{2.n.V_a}{\lambda_0} \qquad \text{(I-8)}$$

où V_a est la vitesse des ondes acoustiques dans le milieu, n l'indice de réfraction et λ_0 la longueur d'onde incidente. Pour une longueur d'onde de 1550nm, la fréquence Brillouin est de l'ordre de 11GHz. La vitesse acoustique dépend du module d'Young E et de Poisson κ du matériau (Sikali, 2013) :

$$V_a = \sqrt{\frac{E(1-\kappa)}{\rho(1+\kappa)(1-2\kappa)}} \qquad \text{(I-9)}$$

avec ρ qui est la densité volumique du matériau. Par conséquent, v_B dépend de la température et la déformation dans la silice,

S'appuyant sur le principe de l'OTDR, et grâce à un laser de fréquence accordable, il est possible de mesurer les spectres Brillouin en fonction de la distance dans la fibre optique. Il existe plusieurs techniques pour mesurer le spectre Brillouin : le B-OTDR (pour Brillouin OTDR), le Brillouin Optical Time Domain Analyzer (B-OTDA), le Brillouin Optical Coherent Domain Analyzer (B-OCDA), Brillouin Optical Frequency Domain Analyzer (B-OFDA), etc. qui sont des dérivés du principe de l'OTDR (Bao, 2011).

Quelles que soient les techniques utilisées, l'appareil mesure un spectre Brillouin localisé dans la fibre optique au niveau de la base de mesure associée w, et centrée en z (Figure 11). Le nombre de spectres alors mesurés dépend du pas de mesure Δz et de la longueur d'auscultation L. La fréquence Brillouin $v_B(z)$ est déterminée pour chaque spectre comme étant l'abscisse du maximum du spectre. Le spectre étant échantillonné d'un pas fréquentiel Δv (en général autour du MHz), l'incertitude sur la mesure de la fréquence Brillouin est dépendante de cet échantillonnage.

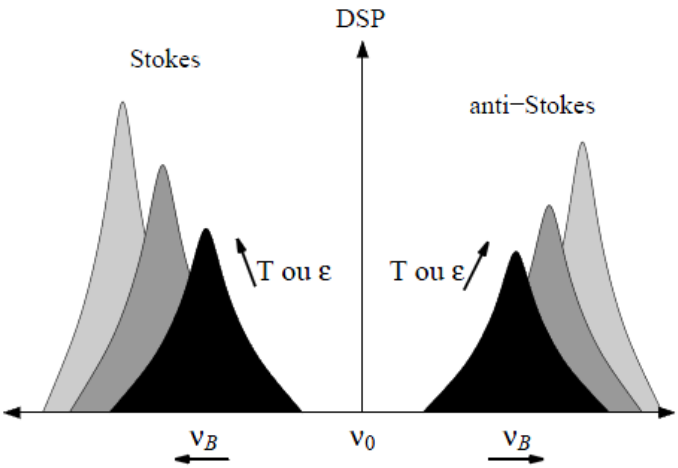


Figure 14 : Evolution du décalage spectral du spectre Brillouin en fonction de la température et de la déformation (Lanticq, 2009).

On en déduit expérimentalement que le profil de fréquences Brillouin à un état de la fibre *m*, $\boldsymbol{\nu_{Bm}(z)}$ dépend du profil de fréquence Brillouin à l'état initial *0*, $\boldsymbol{\nu_{B0}(z)}$, et de l'évolution de la déformation relative $\boldsymbol{\varepsilon_{0\to m}(z)}$ et de la température relative $\boldsymbol{\Delta T_{0\to m}(z)}$ dans la fibre optique (Bao, 1995) :

$$\boldsymbol{\nu_{Bm}(z)} = \boldsymbol{\nu_{B0}(z)} + C_T^B.\boldsymbol{\Delta T_{0\to m}(z)} + C_\varepsilon^B.\boldsymbol{\varepsilon_{0\to m}(z)}, \qquad \text{(I-10)}$$

$\boldsymbol{z}$ étant l'abscisse curviligne de la fibre optique échantillonnée avec le pas de mesure Δz. Les coefficients de calibration C_T^B et C_ε^B sont respectivement les coefficients de calibration de la fibre optique en température et déformation pour la technologie Brillouin. Typiquement, pour une fibre monomode standard type SMF28 et à la longueur d'onde de 1550 nm, ils valent 1 MHz/°C et 0.05 MHz/µε (Sikali, 2012). La fréquence Brillouin varie donc beaucoup plus selon une variation de température que de déformation, la proportion étant plus importante que dans le cas de la technologie Rayleigh. C'est le principal verrou de ce type de technologie pour obtenir une déformation athermique. Nous verrons dans la Partie III, les moyens de parvenir à séparer les deux grandeurs.

Cette technique permet néanmoins d'effectuer des mesures de spectres Brillouin sur des longueurs allant jusqu'à 50 km avec un pas de mesure de 1 m et des résolutions en température et déformation de +/- 1 °C et +/- 20 µm/m (Bao, 2011). Dans la partie II, nous verrons les fonctionnements spécifiques de chaque interrogateur basés sur la mesure de spectres Brillouin. Nous nous intéresserons plus particulièrement au B-OTDA qui, à ce jour, fournit la meilleure combinaison résolution – longueur d'auscultation et nous aurons pour objectif d'améliorer son pas de mesure.

I.3.3.3.3. Par rétro-diffusion Raman

L'interaction entre la lumière et les vibrations moléculaires, dépendante uniquement de la température au sein de la silice, induit la diffusion Raman qui implique un décalage spectral et une augmentation de puissance. La puissance portée par une onde anti-Stokes I_{AS} de rétro-diffusion Raman, centrée à la longueur d'onde λ_{AS}, est fortement dépendante de la température dans la fibre optique (Figure 15), contrairement à sa composante Stokes qui ne l'est que très peu (Dakin, 1985).

En prenant comme référence l'intensité de la composante Stokes I_S, de longueur d'onde λ_S, l'équation suivante permet de relier la température dans la fibre aux intensités des deux composantes de la rétrodiffusion Raman:

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \left[\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}}\right]^4 e^{-\frac{h\nu_0}{kT}} \qquad \text{(I-11)}$$

avec h = 6,63.10^{-34}m^2.kg.s^{-1} la constante de Planck, k = 1,38.10^{-23}m^2.kg.s^{-2}.K^{-1} la constante de Boltzmann, T la température absolue et ν_0 la fréquence de l'onde incidente.

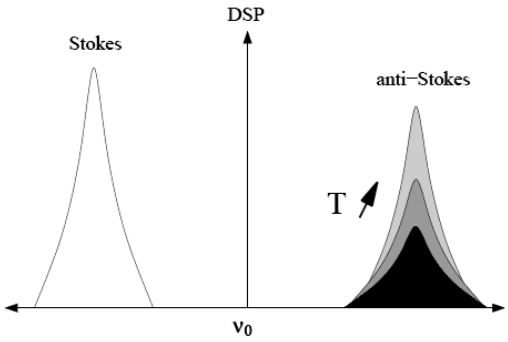


Figure 15 : Evolution de la puissance du spectre Raman en fonction de la température (Lanticq, 2009).

Un problème inhérent à la diffusion Raman est la faible amplitude du signal rétrodiffusé. L'utilisation d'un laser puissant à l'entrée, couplée avec les fibres multimodes, est privilégiée malgré les forts effets d'atténuation qui limitent la longueur d'auscultation.

Contrairement aux deux techniques précédentes, celle-ci présente l'avantage d'obtenir une mesure de température indépendante d'autres grandeurs physiques. Elle est de nos jours mature et présente un pas de mesure d'au moins 1 mètre avec une longueur d'auscultation de 30 km. Certains appareils sur le marché présentent des répétabilités de 0.1 °C pour une longueur d'auscultation de moins de 4 km avec un temps d'acquisition de plusieurs minutes (Khan, 2011).

I.3.3.3.4. Problématiques et applications

Les capteurs à fibre optique répartis présentent le net avantage d'avoir une mesure à tout endroit de la fibre sur une portée de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres tout en ayant une résolution métrique, voire centimétrique. Pour la surveillance d'ouvrages de génie civil de grandes dimensions, cette particularité représente un net avantage. Ils sont facilement intégrables dans une structure, insensibles à toute inférence électromagnétique et nécessitent peu de maintenance. Depuis quelques dizaines d'années, leurs applications sont grandissantes :

- Mesures de déformations dans des ouvrages en bétons : ponts (Zhang, 2006), barrages (Zhu, 2011), enceintes (Sang, 2010) ; ou structures géotechniques : pipeline (Nikles, 2009 ; Inaudi, 2010 ; Lopez-Higuera, 2011), tunnel (Klar, 2010), digue (Nöther, 2010) etc.
- Mesures de température dans la surveillance d'incendie (Sensornet, 09), détection de fuites dans les digues (Khan, 2011) ou pipeline (Vogel, 2001).

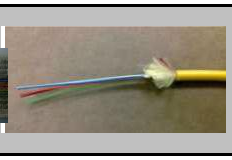
Les différents câbles

Pour les applications citées, l'utilisation dans le milieu d'emploi des fibres nues est problématique à cause de leurs fragilités. Un revêtement protecteur est indispensable afin de préserver l'intégrité de la fibre. Il doit permettre :

- Un transfert optimal à la fibre optique des variations de température et de déformation du milieu,
- Une durabilité dans le temps face aux contraintes mécaniques ou chimiques de l'environnement.

Pour des applications de génie civil, différents câbles à fibre optique sont industrialisés par différents fournisseurs répertoriés dans le Tableau 3 (non exhaustif) :

Tableau 3: Câbles à fibre optique commercialisés pour des applications de capteurs de déformations et de températures.

Fabricants	**GMG**	**Brugg**	**Tencate**	**Sensornet**
Photo				

Dans un même câble, plusieurs fibres optiques mono ou multi modes sont présentes, permettant de mesurer plusieurs grandeurs physiques simultanément. Selon les applications, certains câbles sont renforcés par des brins métalliques (pour résister aux fortes contraintes dans le béton) ou insérés dans des géotextiles (pour les ouvrages en géomatériaux - Artières, 2012). Le revêtement du câble peut avoir une influence sur le résultat de la mesure. Une méthodologie de caractérisation de la fonction de transfert mécanique du câble dans son environnement a été développée (Hénault, 2013) et permet de mieux comprendre l'influence de la composition du câble à fibre optique sur les mesures réparties de déformation. Nous étudierons dans la Partie III leurs influences sur la quantification du déplacement dans un ouvrage en géomatériaux.

Contrainte sur les performances du capteur à fibre optique

Pour optimiser la surveillance de ses ouvrages de génie civil, EDF a fait le choix des capteurs répartis à fibre optique en complément des capteurs traditionnels. Pour la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre, les travaux d'A.A. Khan (Khan, 2011) ont prouvé la possibilité de l'utilisation des capteurs répartis en température. Néanmoins, les mesures nécessitent une interprétation pertinente pour la détection de fuites et d'anomalies thermiques dans l'ouvrage.

Pour les mesures de déformation au sein d'ouvrages en béton, les travaux de J-M. Hénault (Hénault, 2013) ont permis de caractériser la signature d'une fissure mesurée par un capteur à fibre optique de technologie Rayleigh dans des conditions contrôlées. Sur ouvrage réel, cet interrogateur n'est pas adapté car son utilisation est limitée à une portée de mesure de 70 m pour un pas de mesure centimétrique. Pour mesurer des déformations de l'ordre du centimètre sur un ouvrage de l'ordre du kilomètre, il sera préférable de privilégier un interrogateur de type Brillouin puisque sa longueur d'auscultation atteint 50 km, mais avec un pas de mesure de 1 m. Le Tableau 4 rappelle les

performances métrologiques des différents capteurs à fibre optique et fournit la contrainte d'EDF en termes de performances pour la mesure de déformation.

Tableau 4 : Récapitulatif des performances métrologiques importantes pour les différentes technologies de capteurs à fibre optique répartis et du cahier des charges d'EDF en termes de performances métrologiques.

Performances	Raman	Rayleigh	Brillouin	Souhaitée
Base de mesure	1 m	1 cm	1 m	~ 5 cm
Pas de mesure	1 m	1 cm	40 cm	~ 5 cm
Longueur d'auscultation	20 km	70 m	50 km	> 5 km
Résolution Température / déformation	+/- 0.1 °C	+/- 0.1 °C +/- 10 µm/m	+/- 0.5 °C +/-20 µm/m	+/- 10 µm/m
Temps de mesure	~ 5 min	< 1 min	~ 10 min	~ 5 min

Les applications de ce type de capteur sont nombreuses et florissantes dans le domaine de la surveillance d'ouvrages de grands linéaires :

La surveillance de pipelines

Un système de mesures de déformation répartie permet l'auscultation d'un pipeline de plusieurs dizaines de kilomètres. Nikles *et al.* (Nikles, 2011) présentent l'exploitation de ce capteur dans des pipelines enterrés à une faible profondeur pour la surveillance de mouvements de terrain et pour la détection de fuites. Son efficacité en termes de détection et localisation d'événements a ensuite été prouvée (Ravet, 2011). Pour la quantification du déplacement, les premières avancées permettent de retrouver le déplacement vectoriel autour d'un pipeline (Bernini, 2008).

La surveillance de tunnels

La création de tunnels dans des zones fortement urbanisées induit des déplacements du sous-sol important (Janin, 2012) et peut être problématique pour les bâtiments. La nécessité de prévoir et de surveiller l'évolution du déplacement est donc primordiale.

Les travaux de Klar nous montrent l'efficacité de tels capteurs sur le suivi de déplacements de terrain lors de la création de tunnels (Klar, 2010). Ils permettent notamment de confronter les mesures de déformation aux modèles de déplacement du sol et donc d'estimer le déplacement vertical du sol (Klar, 2014) avec une précision de l'ordre du millimètre.

La surveillance des glissements de terrain

En parallèle des techniques d'imagerie à grand rendement présentées précédemment, les capteurs à fibre optique de technologie Brillouin sont assez présents dans la surveillance de glissements de terrain. Comme la sensibilité de la chaine de mesure est importante, la détection des évènements est immédiate (Higuchi, 2007, Iten, 2009, Yin, 2010). En général, les fibres optiques sont posées après une première localisation de la zone de danger. Grâce à un choix judicieux de câbles à fibre optique à ancrages testés lors d'essais en environnement contrôlé, le déplacement du sol peut être estimé grâce à un modèle mécanique simple (Hauswirth, 2010 ; Iten, 2011).

I.3.3.3.5. Interprétation des mesures de déformations : exemple pour la surveillance de digues

Le pas de mesure des appareils Brillouin est limité pour ausculter des ouvrages dont les dimensions sont importantes. Dans un premier temps, l'objectif est de l'améliorer pour détecter des longueurs déformées de l'ordre de la dizaine de centimètres. Comme la fréquence Brillouin est dépendante à la fois de la déformation et de la température dans la fibre optique, la deuxième étape est de séparer ces deux mesurandes. En effet, la thermométrie d'un ouvrage hydraulique en terre est soumise à l'influence de facteurs externes tels que la pluie, l'air, mais également internes comme la présence d'une fuite ou d'une nappe phréatique. Des anomalies thermiques apparaissent (Khan, 2011) et viennent polluer les mesures de déformations. Si, en parallèle, un renard hydraulique ou un fontis apparaissent, il est nécessaire de les différencier pour comprendre le comportement thermomécanique de la structure (Figure 16). Enfin, les déplacements issus de fissures ou de tassements verticaux doivent être quantifiés à partir des mesures de déformation athermique.

C'est pour répondre à ces problématiques que trois axes de recherche ont été définis :

- L'amélioration du pas de mesure de la fréquence Brillouin grâce à l'étude de la forme du spectre Brillouin.
- A partir de ces profils de fréquence Brillouin, l'estimation de la déformation irréversible de la structure grâce à une référence de température.
- Enfin, à partir des informations de déformation, l'estimation de déplacements de l'ordre du millimètre de la structure en s'appuyant sur un modèle de déplacement du sol.

Grâce aux techniques avancées du traitement du signal, nous répondrons à ces problématiques. Plusieurs expériences sur des ouvrages hydrauliques en terre ont été réalisées pour tester les différentes technologies d'interrogateurs, de câbles et valider les traitements proposés. A terme, les algorithmes développés dans la thèse devront être transférables pour l'interprétation de mesures issues d'un ouvrage en béton.

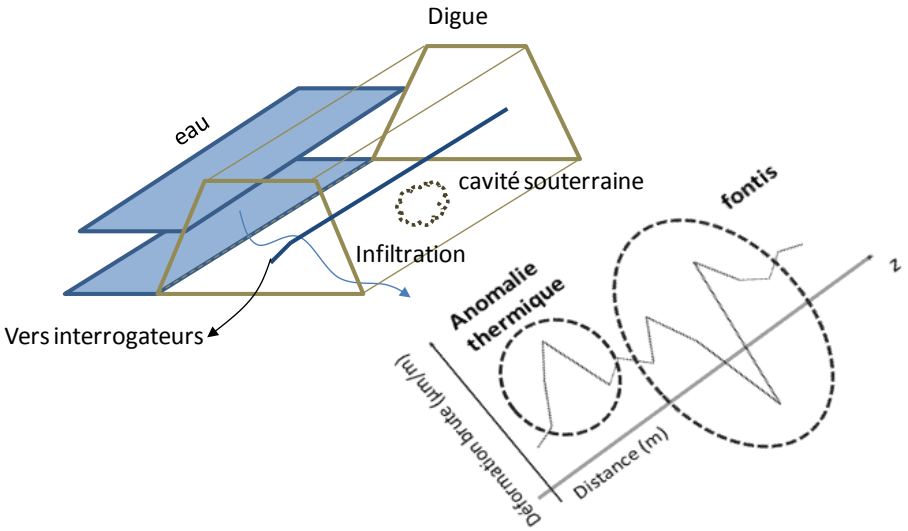


Figure 16 : Exemple de la signature de défauts pathologiques sur la mesure de déformation répartie pour la surveillance d'ouvrage hydraulique en terre.

I. 4. Spécificités et contraintes des différentes expériences

Au cours des trois ans de thèse, nous avons eu l'occasion de travailler sur plusieurs jeux de données issus d'expériences réalisées dans des conditions contrôlées ou industrielles. Nous présentons ici les expériences et les données que nous utiliserons dans la suite du mémoire. Les autres sites étudiés sont décrits dans l'annexe A. Un récapitulatif est disponible dans le dernier paragraphe.

I.4.1. CER de Rouen

Afin de comparer les différents câbles et interrogateurs disponibles sur le marché et d'étudier la sensibilité de la chaine de mesure, EDF, en collaboration avec le Centre d'étude technique de l'Equipement (noté ici CER de Rouen) a réalisé une structure d'essai en vraie grandeur en situation d'effondrement localisé.

Le dispositif de création de fontis

Dans un hangar fermé, une fosse de 21 m de longueur sur 5 m de largeur a été remplie de deux types de matériaux (Figure 17.a.) :

- Du sable argileux 0/5 mm, avec cohésion (de l'ordre de 40 kPa), classé B2 selon la norme NFP 11-300 dans le remblai n°1 (noté R1)
- Du sable propre, grossier 0/5 mm, sans cohésion (de l'ordre de 9 kPa), classé D1 selon la même norme dans le remblai n°2 (noté R2)

Deux caniveaux en béton d'un mètre de profondeur et de longueur, pour 4,4 m de largeeur, sont respectivement équipés de 4 vérins actionnant une plaque d'acier rectangulaire de dimension 1m x 4,4m, d'un mouvement de descente (20 cm maximum) et de montée (10 cm maximum) (Figure 17.b-c.). Un capteur de déplacement permet de contrôler précisément le déplacement de la plaque.

L'abaissement de la plaque permet de générer le déplacement de la colonne de matériau à l'aplomb de celle-ci. Pour de petits abaissements, une cavité au-dessus de la plaque apparait (Figure 17.d-(a)). Ensuite plusieurs scénarios peuvent se présenter selon la granularité du matériau : soit la cavité formée se stabilise à cause de l'effet voûte, soit le déplacement se propage dans la colonne (Figure 17.d-(b)) pour ensuite atteindre la surface pendant que la cavité s'effondre (Figure 17.d-(c)). Cette expérience a déjà été réalisée dans des conditions de laboratoire toutes proportions gardées (Chevalier, 2009 ; Meguid, 2008). Nous avons ici l'avantage d'étudier la formation d'un fontis à échelle 1:1.

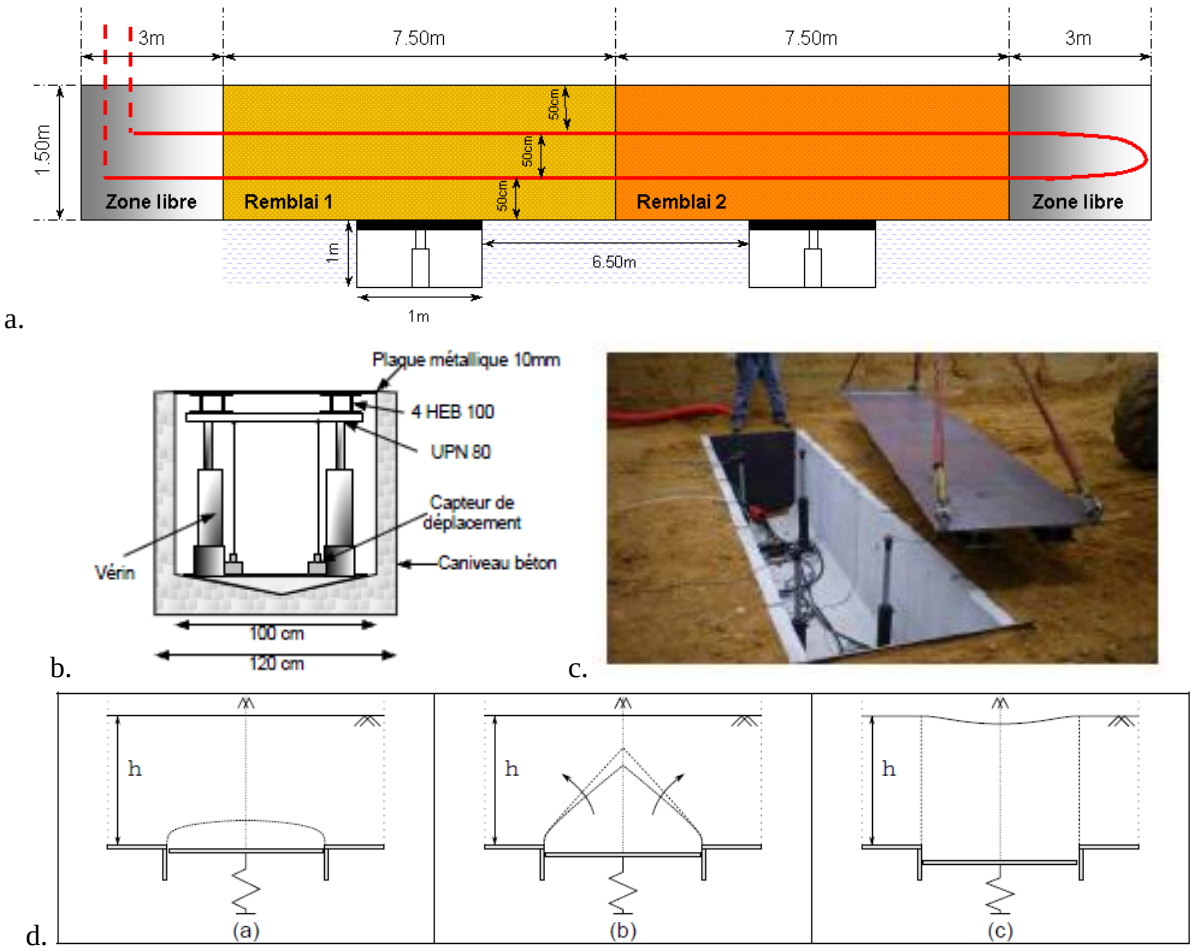


Figure 17 : a. Schéma de principe de la maquette CER Rouen. Dispositif de création de fontis : b. principe, c. photo d. Déplacements du sol selon le mouvement de la plaque : (a) 1ere phase : création d'une cavité. (b) 2ème phase : zone de transition. (c). 3ème phase : déplacement de la surface (Chevalier, 2009).

L'instrumentation

Etant donné que l'expérience était dans un local fermé, les variations de la température de l'air n'a que très peu influencé les mesures de déformations. Néanmoins, des capteurs de température (Figure 18), de type PT100, ont aussi été installés dans la structure pour pouvoir corriger les mesures.
La structure a été instrumentée par plusieurs capteurs de déplacements et de déformations :

- Des capteurs à câbles (nommé ici DS) (Figure 18.a.) permettant de mesurer le déplacement vertical du sol. Ces capteurs ont été positionnés à deux hauteurs différentes du sol $z_f = 0.5$ m et $z_f = 1$ m au-dessus de la plaque. Leur sensibilité au déplacement est de +/-0.1 mm.
- Des capteurs de déplacement LVDT pour mesurer le déplacement de la surface (Figure 18.b.). Leur sensibilité au déplacement est de +/-0.1 mm.
- Des capteurs à fibres optiques, dont les câbles sont positionnés à deux hauteurs $z_f = 0.5$ m et $z_f = 1$ m (Figure 17. a. en rouge). Afin de tester leur sensibilité au déplacement, plusieurs câbles à fibre optique industrialisés ont été installés (Figure 18. c. - Tableau 5), couplés avec différents interrogateurs industriels (Tableau 6).

Tableau 5 : Différents câbles à fibres optiques utilisés.

Fournisseur	Produits
Sensornet	DamSensing Monitoring cable Structure Sensing cable
GMG	Geo-Fibre SCR 30 (ruban polymère) GMG-4D PSGMG-5
Brugg	Brugg v3 Brugg v4 BruSteel
Acome	Acome1D
Tencate	Geodetect

Tableau 6 : Différents interrogateurs utilisés et leurs performances métrologiques.

	Brillouin		Rayleigh
Fournisseur - Produit	Omnisens DiTest	Optics OZ	Luna OBR
Pas de mesure	40 cm	50 cm	3 cm
Base de mesure	1 m	1 m	9 cm
Résolution température déformation	+/- 1 °C +/- 20 µm/m	+/- 1 °C +/- 20 µm/m	+/- 0.1 °C +/- 10 µm/m

Création de fontis et analyse des mesures ponctuelles de déplacement

Dans un premier temps, les abaissements des deux plaques, notés E_i, ont été effectués de manière alternée. Dans le Tableau 7, les déplacements notés E_1 et E_2 correspondent aux abaissements de la plaque gauche située en dessous du remblai 1 (R1). Les déplacements notés E_3 et E_4 correspondent aux déplacements de la plaque située en dessous du remblai 2 (R2). Ensuite, les déplacements des plaques sont effectués de manière simultanée. Les mesures de déplacements du sol effectuées par les capteurs ponctuels DS et LVDT (cf. Figure 18.a.) sont répertoriées dans le Tableau 7.

D'après ces mesures de déplacements, une interprétation des phénomènes de tassement est formulée :

Pour R1, un important déplacement de 14.7 mm a été imposé initialement à la plaque au lieu de 1 mm. Comme constaté sur les mesures de déplacements, cela ne permet pas de mesurer une évolution lente du déplacement dans le sol suite à la création de la cavité. Ensuite, l'effet voûte stabilise la cavité et donc le déplacement dans le sol ne varie que très peu en fonction de l'abaissement de la plaque : de 0.7 mm à 1 mm (Tableau 7 - colonne DS (50 cm)).

Pour R2, pour les deux premières mesures (E_1-E_2), seule la plaque gauche s'abaisse. Cependant, nous constatons une influence au niveau du remblai n°2 avec un déplacement mesuré de 0.2 mm à 50 cm au-dessus de la plaque R2. Ensuite, l'abaissement de la plaque R2 évolue de -2 mm à -29 mm. On constate que l'évolution plus lente de l'abaissement de la plaque permet de mesurer un déplacement vertical à 50 cm plus lent, mais aussi plus important que dans remblai n°1. Pour les capteurs à 1 m et à la surface, le déplacement mesuré n'évolue que très peu. Le déplacement du sol est donc de l'ordre de la sensibilité des capteurs de + /- 0.1 mm.

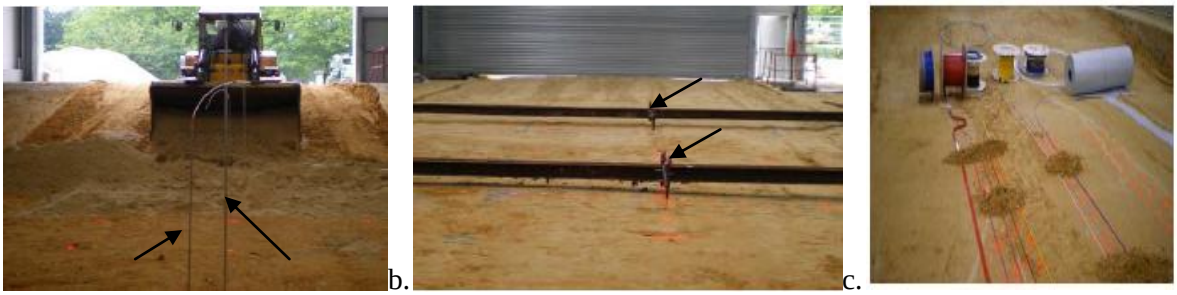


Figure 18 : Photos prises lors de la construction de la maquette CER Rouen :a. Positionnement des câbles de déplacement ; b. Positionnement des LVDT ; c. Les différents câbles à fibre optique utilisés.

Tableau 7 : Récapitulatif des abaissements des deux plaques R1 (gauche) et R2 (droite) pour le sable cohésif (remblai n°1) respectivement non cohésif (remblai n°2). DS : capteurs ponctuels à câbles positionnés à 50 cm respectivement 1 m au-dessus des plaques ; LVDT : capteurs ponctuels de déplacement de la surface.

Déplacements (mm)	**remblai n°1**				**remblai n°2**			
	R1 Plaque	DS (50cm)	DS (1m)	LVDT (surface)	R2 Plaque	DS (50cm)	DS (1m)	LVDT (surface)
E1	-14,7	-0,7	-0,3	-0,4	0	-0,2	-0,1	0,1
E2	-17,3	-0,8	-0,4	-0,4	0	-0,2	-0,1	0,1
E3	-17,3	-0,7	-0,4	-0,4	-2,2	-0,7	-0,1	0
E4	-17,3	-0,8	-0,3	-0,4	-3,8	-1,1	-0,2	0,1
E5	-19,4	-0,8	-0,4	-0,5	-6	-1,1	-0,2	0,1
E6	-29,6	-0,9	-0,5	-0,5	-9,1	-1,1	-0,2	0
E7	-40,7	-0,9	-0,5	-0,5	-14	-1,3	-0,2	0
E8	-50,1	-0,9	-0,5	-0,5	-19	-1,3	-0,2	0
E9	-70	-1	-0,5	-0,5	-29,4	-1,3	-0,2	0

Pour faire apparaitre le fontis à la surface (Figure 19), la voûte formée a été déstabilisée par la remontée de la plaque pour initier les phases décrites dans la Figure 17.d.

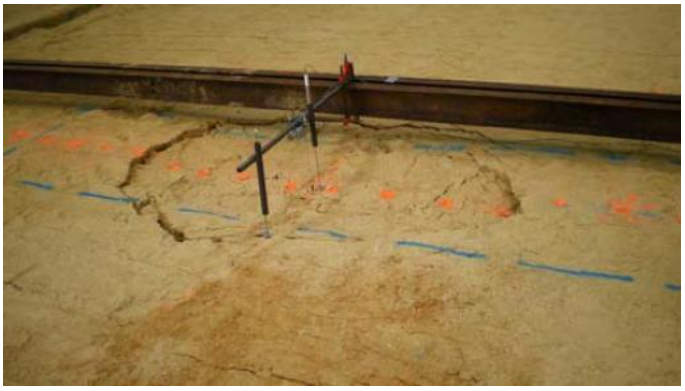


Figure 19: Maquette CER Rouen : apparition du fontis à la surface de la structure.

Mesure de déformations réparties par capteurs à fibres optiques

Blairon *et al.* (Blairon, 2011) ont étudié l'influence des différents câbles sur la signature du fontis. La Figure 20 présente les signatures de fontis mesurées à 1 m sous la surface par les interrogateurs Brillouin (DiTest d'Omnisens) et Rayleigh (OBR Luna). Les pas de mesure respectifs sont de 40 cm et

3 cm (cf. Tableau 6). Nous prenons comme mesure de référence pour la suite les mesures de déformations obtenues avec l'interrogateur Rayleigh et nous les comparons à celles obtenues avec l'interrogateur Brillouin. Le profil de déformation relative mesurée par l'interrogateur Brillouin présente la même signature que la mesure de référence : deux zones de traction encadrant une zone de compression. Néanmoins, les amplitudes des profils ne sont pas identiques de par la différence de valeur des pas de mesure. Comme l'interrogateur Brillouin moyenne le mesurande sur la base de mesure qui est de 1 m, l'estimation de la déformation présente un écart important avec la mesure de l'OBR Luna : le minimum est à -186 µm/m pour la première signature, au lieu de -355 µm/m (mesuré par l'interrogateur Rayleigh).

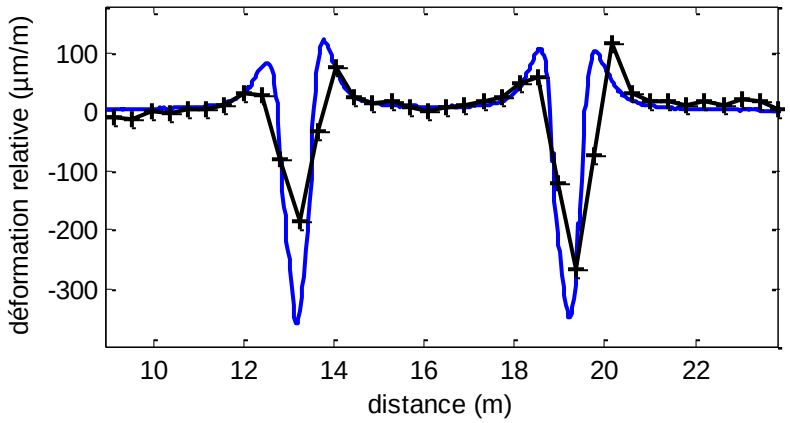
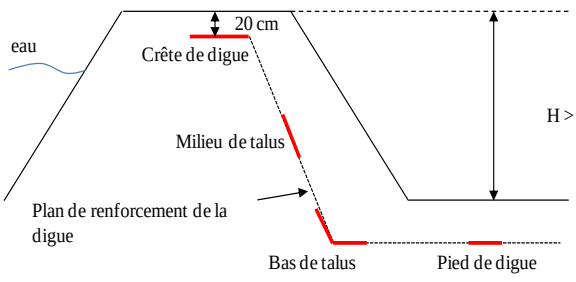


Figure 20 : Exemple de signatures de fontis mesurées par un des câbles avec l'interrogateur Rayleigh OBR Luna (en bleu) et l'interrogateur Brillouin DiTest d'Omnisens (en noir), avec des pas de mesure respectifs de 3 cm et 40 cm, pour une profondeur de 1 m sous la surface de la structure.

Nous exploiterons ces mesures dans la suite du mémoire pour l'étude de l'amélioration du pas de mesure de l'interrogateur de technologie Brillouin dans la Partie II et l'influence du câble sur la quantification de déplacement dans la Partie III. Ces données ne peuvent pas être utilisées pour l'étude de l'estimation de la déformation irréversible de la structure grâce à une référence de température, puisque la température a été constante lors des acquisitions.

I.4.2. Surveillance d'une digue : site de Contrisson

Une digue d'environ 3 m de haut, située en rive droite du canal de la Marne, en France, présentait des signes possibles de dysfonctionnement : présence d'eau en pied aval et zone d'érosion en crête du parement amont. En 2007, il a été décidé de décaper le talus amont pour renforcer la structure. Afin de surveiller par la suite l'évolution de la stabilité de la digue, 4 bandes de géotextile Géodetect ont été placées sous la recharge, au niveau du pied, du milieu, et de la crête de digue ainsi qu'à deux mètres du pied de digue (Figure 21). Une portion de 100 m a été instrumentée et des mesures de température et de déformation ont été acquises pendant 2 mois avec un échantillonnage temporel d'une heure et un pas de mesure de 50 cm pour une base de mesure de 1m (interrogateur Raman et Brillouin).



a.

b.

Figure 21 : Digue instrumentée : canal de la Marne. a. Coupe de la partie amont de la digue, avec positionnement de 4 câbles Géodetect. b. Photo de l'instrumentation de la digue avant la recharge (Géophyconsult).

Les mesures de température et de déformation enregistrées sur ce site nous ont permis de concevoir et de tester des techniques de séparation de l'influence de la température sur les mesures de déformation. Elles seront présentées dans la partie III de ce mémoire. L'absence des capteurs de déplacement de référence ou des acquisitions par technologie Rayleigh ne permet pas d'utiliser ces données pour étudier l'amélioration du pas de mesure de l'interrogateur de technologie Brillouin ni pour la quantification du déplacement.

Les autres sites sont présentés dans l'Annexe A.

I.4.3. Récapitulatif des données

Nous résumons dans le Tableau 8 les différences et les spécificités de chaque site étudié, les paramètres de la mesure répartie et les autres mesurandes disponibles pour un diagnostic complet. Nous nous concentrons notamment sur le site expérimental du CER Rouen (Tableau 8) dans les parties II-2 et III-2 puis sur la digue industrielle de Contrisson dans la partie III-1.

Tableau 8 : Récapitulatif des données acquises lors des différentes campagnes de mesures

Site		**Mesures reparties par capteurs à fibre optique**					**Mesures non réparties complémentaires**		
Nom	Objectifs (condition expérimentale)	Echantillonnage temporel / Durée	Câbles utilisés	Rayleigh (OBR Luna)	Brillouin (Omnisens DiTest)	Raman	Déplacements	Températures	Autres mesurandes
CER Rouen	Création de fontis (condition contrôlée)	Nombre d'affaissements	10 câbles différents (L_{cable} < 100m) à 2 hauteurs	Δz = 0,03 m	w = 1 m, Δz = 0,4 m, $\Delta \nu$ = 1 MHz	Δz = 0,25 m (mêmes câbles)	LVDT surface DS 50 cm et 1 m	Pt 100 dans la terre	Pression
CNR	Création de renard hydraulique (condition contrôlée)	Δt = 30 min 7 jrs	Structure Sensing cable (L_{cable} < 100 m) à 2 hauteurs	Δz = 0,01 m	w = 1 m, Δz = 0,4 m, $\Delta \nu$ = 1MHz	Δz = 0,25 m (même câble)	Photogrammé-trie	Pt 100 dans l'eau	Pression Résistivité Turbidité Débit Acoustique
Ijkdijk	Comparaison des méthodes d'auscultations (condition contrôlée)	Δt = 1 h 7 jrs	Géodetect (L_{cable} > 1 km) à 7 positions différentes	–	w = 1 m, Δz = 0,4 m $\Delta \nu$ = 1 MHz	–	LIDAR Photogrammé-trie inclinomètres jauges de contraintes	–	Pression
Contrisson	Surveillance d'une digue industrielle (condition réelle)	Δt = 1 min 2 mois	Géodetect (L_{cable} > 300 m) à 4 profondeurs	–	w= 1 m, Δz= 0,4 m –	Δz = 0,25 m	–	Météo France (5 km du site étudié)	–
Curbans	Surveillance d'un canal (condition réelle)	Δt = 1 h Tous les 3 mois durant 7 jrs.	Dam Sensing cable (L_{cable} > km)	–	w = 1 m, Δz = 0,4 m, $\Delta \nu$ = 1 MHz	Δz = 1 m	–	Pt 100 dans l'eau	Débit

Partie II : Des spectres Brillouin à l'amélioration du pas de mesure de la fréquence Brillouin

Chapitre 1 : Le fonctionnement d'un appareil Brillouin

Introduction : 38
II.1.1. De la diffusion Brillouin à la mesure de la fréquence Brillouin 39
II.1.1.1. La diffusion Brillouin 39
II.1.1.2. Les différentes techniques de mesure 39
II.1.1.2.1. B-OTDR 39
II.1.1.2.2. B-OTDA 40
II.1.1.3. Les techniques alternatives 42
II.1.1.4. Les performances métrologiques des interrogateurs industriels 44
II.1.2. Etude du B-OTDA 45
II.1.2.1. Interaction des ondes pompe et sonde 45
II.1.2.2. Algorithme d'optimisation pour la détermination de la fréquence Brillouin 48
II.1.2.3. Phénomène de distorsion du spectre Brillouin : limites de l'algorithme d'optimisation 49
II.1.3. Modélisation de la chaîne de mesure et interprétation de la distorsion 49
II.1.3.1. Présentation du modèle de la chaîne de mesure 49
II.1.3.2. Validation du modèle 52
II.1.4. Exploitation du phénomène de distorsion Brillouin 52
II.1.4.1. Détection et localisation de déformations locales 52
II.1.4.2. Amélioration de la résolution spatiale 54
II.1.4.3. Comparaison des paramètres de forme 54
II.1.4.3.1. Estimation de la déformation 55
II.1.4.3.2. Application des paramètres de forme 56
II.1.5. Conclusion 57

Introduction :

Après avoir souligné l'intérêt d'utiliser un interrogateur de technologie Brillouin et les différentes applications pour la surveillance d'ouvrages, nous détaillons dans ce chapitre les différentes méthodes s'appuyant sur le phénomène Brillouin.

Dans un premier temps, nous présentons de manière synthétique les fonctionnements des différents interrogateurs disponibles dans le commerce utilisant la technologie Brillouin. Une première famille d'interrogateurs utilise l'envoi d'une impulsion lumineuse de durée limitée pour la mesure du spectre Brillouin (qu'il soit stimulé ou spontané). La base de mesure minimale est alors de 1 m, limitée par des contraintes physiques dues à l'utilisation d'impulsion de lumière. La deuxième famille comporte quant à elle les techniques de mesure essayant de pallier cette limite en utilisant plusieurs phénomènes de diffusion (Brillouin et Rayleigh) ou des ondes lumineuses continues.

Toutes ces méthodes ont pour objectif de mesurer la fréquence Brillouin en fonction de la distance afin de calculer la déformation et / ou la température relative dans la fibre optique. En effectuant un comparatif de ces techniques, EDF a choisi l'utilisation du capteur B-OTDA sur lequel le retour d'expérience est plus important.

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement d'un interrogateur de type B-OTDA, nous étudions les équations de propagation régissant la mesure des spectres Brillouin stimulés. Un modèle a été développé pour simuler les spectres Brillouin. L'intérêt principal a été de comprendre l'influence des différents paramètres d'acquisition sur la forme du spectre. Une extension de ce modèle permet d'expliquer l'évolution du spectre si la base de mesure est de l'ordre du centimètre (cas pour des interrogateurs expérimentaux). Pour des interrogateurs industriels, certains paramètres de réglage ne sont pas accessibles par les utilisateurs. Nous proposons alors un modèle alternatif simplifié de la chaîne de mesure.

Pour le calcul de la fréquence Brillouin, l'algorithme des interrogateurs présents dans le commerce détermine l'abscisse du maximum en s'affranchissant de la forme du spectre. Néanmoins, lorsque le spectre s'avère distordu à cause d'une non-uniformité de la distribution de la fréquence Brillouin au sein de la base de mesure, la fréquence Brillouin alors estimée par cet algorithme est erronée.

Nous verrons alors les moyens de détecter et localiser les spectres distordus. S'appuyant sur l'aire sous les spectres, des paramètres de forme sont proposés. Ils sont comparés sur des données issues de l'expérience du CER de Rouen avec des paramètres de détection issus de la littérature.

Une méthode de post-traitement (Ravet, 2007) des spectres permet d'améliorer la résolution spatiale de l'appareil du mètre au millimètre. Néanmoins, comme elle s'appuie sur l'utilisation d'un modèle avancé du fonctionnement de l'appareil, et donc de la connaissance des paramètres de réglage avancés de l'appareil, elle n'est pas applicable dans notre cas. Nous verrons alors des méthodes alternatives permettant de reconstruire le profil de fréquence Brillouin local avec un pas centimétrique.

II.1.1. De la diffusion Brillouin à la mesure de la fréquence Brillouin

II.1.1.1. La diffusion Brillouin

Il existe plusieurs types de diffusion Brillouin engendrés par le passage d'une impulsion lumineuse, dans la fibre :

- La diffusion spontanée,
- La diffusion stimulée et amplifiée.

En pratique, ces deux phénomènes apparaissent simultanément au moment du passage de l'impulsion.

La diffusion spontanée

La diffusion spontanée, décrite dans la partie I, est le résultat de la diffraction de l'onde lumineuse dans le réseau cristallin de la fibre optique. Elle engendre la formation de deux ondes se déplaçant à la vitesse V_a, respectivement appelées Stokes de fréquence de $\nu_o - \nu_B$ et anti-Stokes de fréquence $\nu_o + \nu_B$.

La diffusion stimulée et amplifiée

En liaison avec la diffusion spontanée, un autre phénomène est généré lors du passage de l'onde pompe dans la fibre optique. La présence de l'onde Stokes et de l'onde pompe simultanément va créer des interférences électromagnétiques. L'enveloppe de ces interférences se propage à la vitesse V_a dans le sens de la propagation à la fréquence ν_B. Or, dans la silice, ces battements électromagnétiques induisent le phénomène d'électrostriction qui est une propriété de tout matériau non-conducteur, ou diélectrique, avec une structure cristalline. Le réseau cristallin se dilate / se contracte au passage d'une onde électromagnétique (Figure 22). Une onde acoustique, appelée phonon, émane de ce phénomène, se couple à l'onde pompe et va alimenter l'onde Stokes. De manière macroscopique, cela correspond à un transfert d'énergie de l'onde pompe vers l'onde Stokes. Ce phénomène appelé diffusion Brillouin stimulée (DBS), est responsable de l'amplification Brillouin de l'onde Stokes par l'onde pompe. On peut résumer l'interaction grâce au schéma présenté sur la Figure 22. En analysant le spectre de la lumière envoyée dans la fibre optique, la diffusion stimulée et amplifiée induit un spectre Brillouin stimulé (SBS). Celui-ci est alors sensible à la déformation et la température à chaque endroit de la fibre optique.

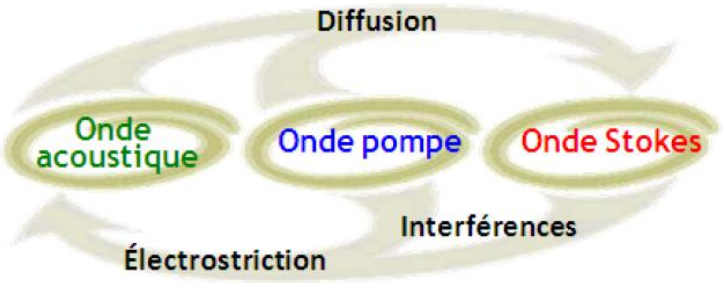


Figure 22 : Principe de l'amplification de la diffusion Brillouin stimulée (d'après (Sikali, 2012)).

II.1.1.2. Les différentes techniques de mesure

II.1.1.2.1. B-OTDR

L'interrogateur B-OTDR envoie une impulsion lumineuse, dite onde pompe, à la fréquence ν_0 dans la fibre (Figure 23). L'intensité de la lumière rétrodiffusée est alors mesurée et localisée grâce au principe du temps de vol. Celle-ci varie selon l'interaction lumière - matière : plus la fréquence ν_0 de

l'onde pompe est proche de la fréquence Brillouin intrinsèque ν_B sur la portion de fibre optique interrogée, plus l'intensité de la lumière rétrodiffusée augmente. Le spectre Brillouin spontané noté $\boldsymbol{g_B(\nu, z)}$ est mesuré pour chaque endroit z de la fibre et est caractérisé par une loi de type lorentzienne, centrée sur la fréquence Brillouin $\boldsymbol{\nu_B(z)}$ (Bao, 2011) :

$$\boldsymbol{g_B(\nu, z)} = \frac{g_{B0}}{1+(\frac{\nu-\nu_B(z)}{\Delta\nu_B(z)/2})^2}, \qquad \text{(II-1-1)}$$

avec g_{B0} l'amplitude du spectre à une distance z, $\Delta\nu_B$ la largeur à mi-hauteur et $\boldsymbol{\nu}$ la fréquence variable de l'onde pompe, comprise dans une plage de fréquence [ν_{S1}, ν_{S2}] préalablement fixée par l'utilisateur et échantillonnée par $\Delta\nu$. En déterminant l'abscisse du maximum du spectre, il est alors possible d'estimer la fréquence Brillouin à chaque endroit de la fibre optique. L'algorithme de l'estimation de la fréquence Brillouin est décrit dans la suite.

L'incertitude sur $\boldsymbol{\nu_B(z)}$ est proportionnelle à l'échantillonnage fréquentiel du spectre $\Delta\nu$. Le pas minimal de fréquence pour de tels appareils est de 1 MHz ; cela conduit à une incertitude en déformation de +/- 20µm/m. Par ailleurs, si le rapport signal sur bruit (RSB) est trop faible lors de la mesure, cela induira évidemment des erreurs de mesure sur la détermination de $\boldsymbol{\nu_B(z)}$.

Pour des raisons pratiques, l'intensité maximale envoyée dans une fibre est limitée par la présence d'effets non linéaires dans la fibre (effet piézoelectrique inverse (Nöther, 2010)) et par l'effet d'amplification du signal rétrodiffusé (diffusion stimulée). Un compromis entre le pas de mesure et la longueur d'auscultation est alors à trouver : ce capteur a une résolution spatiale de 1 m à 20 m sur une fibre de 10 km à 57 km (Bao, 2011). En raison du phénomène dynamique de l'interaction lumière-matière, lié à la durée du phonon (généralement de 10 ns), le pas de mesure minimal pour ce type de capteur est classiquement de 1 m.

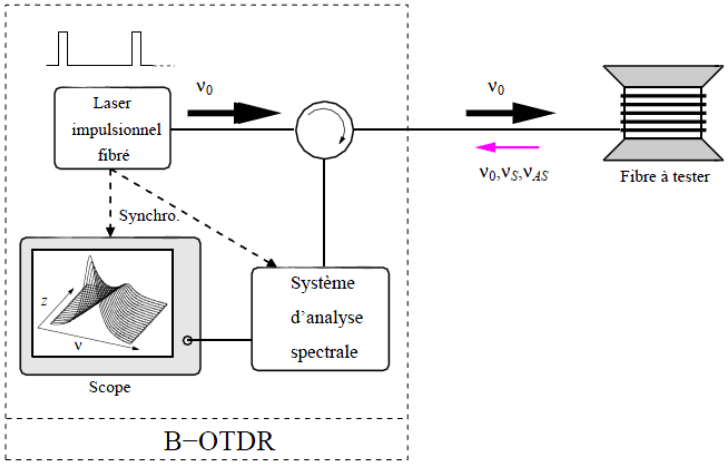


Figure 23 : Schéma de principe d'un B-OTDR (Lanticq, 2009).

II.1.1.2.2. B-OTDA

Le Brillouin Optical Time Domain Analyser (B-OTDA) est un autre type d'interrogateur qui utilise le principe de diffusion Brillouin stimulée à partir de la méthode pompe-sonde présentée par Hotate *et al.* (Hotate, 1989). Une impulsion lumineuse (onde « pompe » ; ou « pump » en anglais) générée par un laser est introduite dans la fibre optique. Les caractéristiques de cette onde pompe sont une fréquence

ν_p, une intensité I_p et une durée τ. Cette durée est directement reliée à la longueur de la base de mesure w selon la relation :

$$w = \frac{c.\tau}{2.n}, \qquad \text{(II-1-2)}$$

avec c la célérité de la lumière, n l'indice du milieu. Une seconde onde **continue** et **contre propagative** (onde « sonde » ou « probe » en anglais) est introduite à l'autre extrémité de la fibre. Les paramètres physiques de cette onde sonde sont : une fréquence ν_S et une intensité I_{cw}.

Selon le principe de la diffusion Brillouin stimulée, lorsque l'onde sonde et l'onde pompe se rencontrent, un échange d'énergie se produit (Figure 24). Comme l'onde sonde est continue, son intensité à l'extrémité de la fibre optique est mesurable en fonction du temps d'après le principe de fonctionnement de l'OTDR. Lors de l'échange d'énergie entre les ondes, deux cas se présentent :

- Soit $\nu_p > \nu_S$, l'onde pompe cède de l'énergie à l'onde sonde, on parle alors de « ***Gain Brillouin*** »
- Soit $\nu_p < \nu_S$, l'onde pompe gagne de l'énergie grâce à l'onde sonde, on parle alors de « ***Perte Brillouin*** »

Expérimentalement, cette dernière configuration (perte Brillouin) est plus efficace en termes d'excursion de mesure. Ceci a été confirmé (Bao, 1999) par des mesures de pertes sur des câbles de 32 km contre 22 km dans les mêmes conditions expérimentales lors des mesures de gain Brillouin, pour une base de mesure fixée.

L'appareil envoie un train d'impulsions avec une période $\Delta\tau$ qui est reliée à l'échantillonnage spatial Δz par la relation :

$$\Delta z = \frac{c.\Delta\tau}{2.n} \qquad \text{(II-1-3)}$$

La fréquence de l'onde sonde varie sur une plage de fréquence [ν_{S1}, ν_{S2}] préalablement fixée par l'utilisateur et échantillonnée par $\Delta\nu$. Lorsque la différence de fréquence $\boldsymbol{\nu}$ entre l'onde sonde et l'onde pompe :

$$\boldsymbol{\nu} = \nu_p - \boldsymbol{\nu_s} \qquad \text{(II-1-4)}$$

est égale à la fréquence Brillouin de la fibre à l'endroit où les deux ondes se superposent, alors l'échange d'énergie est maximal (Figure 24). En la mesurant à l'extrémité de la fibre optique, il est alors possible de mesurer la matrice de spectres stimulés Brillouin ***G(ν,z)*** par la relation suivante :

$$\boldsymbol{G(\nu, z)} = \frac{\boldsymbol{I_{CW}(\nu,z)}}{\boldsymbol{I_{CW}(\nu,0)}} \qquad \text{(II-1-5)}$$

Cette matrice est de dimension (N_f , N_z), avec $N_f = \frac{\nu_{S1} - \nu_{S2}}{\Delta\nu}$ et $N_z = \frac{L-w}{\Delta z}$. Le principal avantage de la mesure B-OTDA par rapport à la mesure B-OTDR est un rapport signal sur bruit souvent nettement supérieur.

De la même manière que le B-OTDR, la fréquence Brillouin est considérée comme l'abscisse du maximum du spectre : en la calculant, le profil de fréquence Brillouin est fourni par l'appareil (Figure 24).

Comme pour le B-OTDR, la durée de vie limitée de l'onde acoustique implique une base de mesure minimale de 1 m. Un compromis est nécessaire à faire pour ausculter de longues distances. Typiquement, les constructeurs recommandent d'avoir une base de mesure de 2 m pour des longueurs d'auscultation supérieures à 20 km. Plusieurs techniques, présentées par la suite, ont pour but d'améliorer la résolution spatiale en s'affranchissant de cette contrainte.

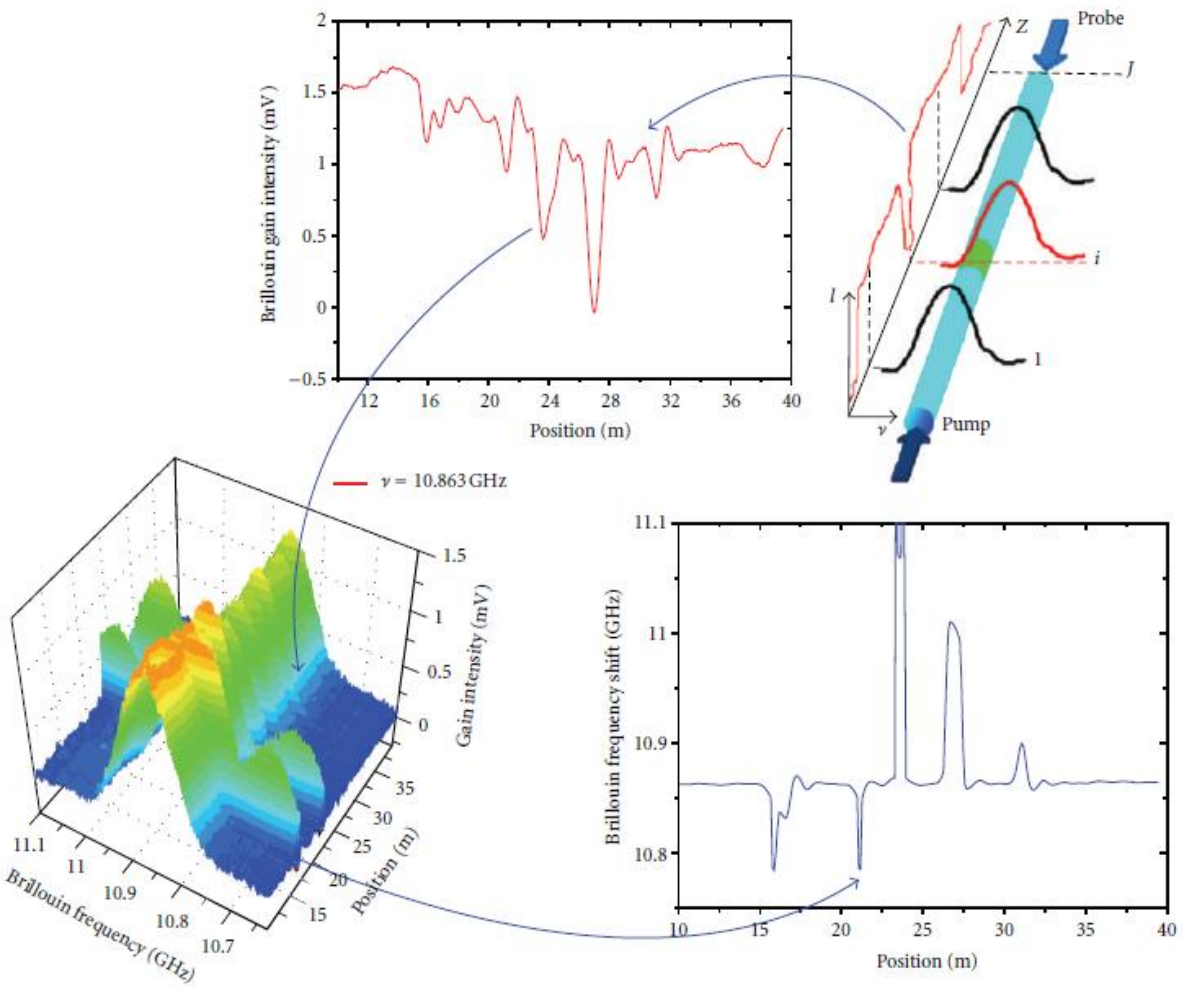


Figure 24 : Illustration de la mesure de spectres Brillouin (Galindez, 2012) : des ondes sonde et pompe sont envoyées dans la fibre optique. L'intensité du gain Brillouin, ***Icw(ν,z)*** (appelé aussi « Brillouin gain intensity » en anglais) est mesurée en fonction de la distance pour une fréquence ν = 10.863 GHz ; La matrice des spectres Brillouin ***G*** est alors mesurée en fonction de la distance et de la fréquence ***ν*** modulée. Ces spectres sont centrés en la fréquence Brillouin (appelé aussi « Brillouin frequency shift » en anglais) $\boldsymbol{\nu_B(z)}$ qui évolue selon la déformation et la température au sein de la fibre.

II.1.1.3. Les techniques alternatives

Dans cette section, trois grandes autres techniques sont présentées :

Le Brillouin Optical Frequency Domain Anayzer (B-OFDA)

Le B-OFDA est basé sur la mesure d'une fonction de transfert passe-bande dans le domaine complexe liant les amplitudes de l'onde sonde et des ondes Stokes le long de la fibre optique. Comme précédemment, une onde pompe et une onde sonde, dont les amplitudes sont mesurées en bout de

ligne, sont envoyées dans la fibre optique. L'onde pompe est modulée en amplitude. La fonction de transfert de la fibre est déterminée par un analyseur de réseau, qui en calculant la transformée de Fourier inverse, fournit une approximation de la réponse impulsionnelle de la fibre optique.

La résolution spatiale dans ce cas est de l'ordre du mètre pour une longueur d'auscultation de 20km (Nöther, 2010). L'avantage de cette technique est le rapport signal sur bruit intéressant dû à l'utilisation d'une bande passante de l'ordre du kHz. Comme le temps d'acquisition est important, cela restreint les applications à des observations de phénomènes statiques.

Toutefois, cette technique, comme les deux autres présentées plus haut, atteint une limite technologique due à la nature dynamique de l'interaction entre la lumière et la matière d'une durée de l'ordre de 10 ns, ce qui correspond à une base de mesure de 1 m.

Le Brillouin Optical Coherent Domain Analyzer (B-OCDA)

Au lieu d'utiliser des pulsations d'ondes lumineuses qui impliquent une limite sur la longueur de la base de mesure, l'emploi d'ondes continues modulées en fréquence a été proposé par Hotate *et al.* (Hotate, 1999). La technique consiste à utiliser un laser continu dont la fréquence est modulée par un signal sinusoïdal de fréquence f_m aux deux extrémités de la fibre (Figure 25). D'un côté, l'onde sonde est décalée par rapport au signal de pompe (autour de ν_B).

La corrélation des deux ondes permet de sélectionner la position de l'excitation du spectre Brillouin stimulé. En faisant varier la différence de fréquence entre les ondes pompe et sonde, aux positions des pics de corrélation, la mesure du spectre Brillouin est alors possible.

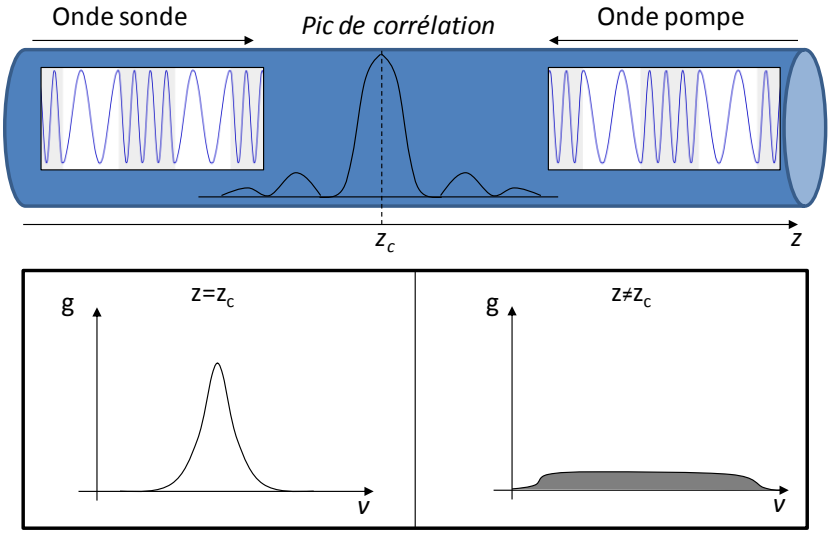


Figure 25 : Principe de fonctionnement du B-OCDA : les deux ondes lumineuses ont leurs fréquences modulées. Le pic de corrélation des ondes est alors localisé à z_c. En changeant l'écart des fréquences, il est possible de changer z_c. Le gain mesuré pour une autre distance de z_c est alors étalé et presque nul.

Ainsi, grâce à la nature de la stimulation du spectre Brillouin, il est possible d'améliorer l'efficacité de la diffusion entre les ondes Stokes et l'onde pompe. En contrôlant leurs fréquences, il est possible de les faire interférer à une position spécifique donnée. Dans ce cas, les ondes interfèrent et, en enregistrant le gain de l'onde sonde, le gain Brillouin est mesurable en fonction de la fréquence : il

correspond au spectre Brillouin stimulé. Au contraire, lorsque la modulation de fréquence des ondes neutralise les interférences, le gain Brillouin mesuré est faible et étalé en fréquence.

La résolution spatiale du B-OCDA peut être de l'ordre de 7 cm pour une longueur d'auscultation de 1 km (Song, 2006). Toutefois, cette technique est assez complexe en termes de mise en œuvre : le temps d'acquisition est de l'ordre de l'heure pour quelques mètres de fibre. Cela restreint les applications à des observations de phénomènes statiques. Cette technique est encore dans un stade de développement et mériterait une attention particulière sur les futures avancées pour augmenter la longueur d'auscultation.

Couplage de la diffusion Brillouin avec la diffusion Rayleigh

Plus récemment, une technique basée sur le couplage des effets Brillouin et Rayleigh (Li, 2011) a permis d'avoir une résolution spatiale et une longueur d'auscultation de l'appareil permettant de mesurer une déformation avec un pas de 5 cm sur 1 kilomètre de distance. Malheureusement, son prix et le manque de retour d'expérience sont des facteurs bloquants pour un déploiement industriel.

II.1.1.4. Les performances métrologiques des interrogateurs industriels

Le tableau suivant réunit les différentes caractéristiques métrologiques des interrogateurs disponibles sur le marché. Comme nous avons pu le voir, les systèmes d'interrogateurs de type B-OTDR et B-OTDA ont des caractéristiques proches et sont les interrogateurs présentant le plus d'applications sur des ouvrages réels avec le retour d'expérience le plus important. Les interrogateurs industriels B-OFDA (FibrisTerre) et B-OCDA sont assez récents sur le marché.

L'intérêt de l'utilisation d'un B-OTDA est que le rapport signal sur bruit pour la mesure du spectre est très supérieur à un B-OTDR grâce à l'utilisation d'une onde continue. EDF a choisi d'utiliser l'interrogateur B-OTDA produit par Omnisens, le DiTest STA-R, car le coût est moindre pour des performances métrologiques acceptables. De plus, le test de plusieurs interrogateurs sur l'expérience du CER Rouen a permis d'avoir un retour d'expérience concluant sur la robustesse des appareils vis-à-vis des conditions d'utilisation sur site : résistance aux conditions environnementales, facilité d'utilisation, capacité d'échanger les appareils et rapidité d'intervention du fournisseur en cas de dysfonctionnements. Néanmoins, une attention particulière est portée sur l'amélioration du pas de mesure et de la portée d'auscultation des appareils. En effet, la recherche continue de progresser sur ces appareils, mais l'industrialisation et la commercialisation des nouveaux appareils de mesure restent marginales à cause d'un coût relativement élevé et de la robustesse des techniques à améliorer.

La solution alternative pour améliorer le pas de mesure (et la résolution spatiale) est le post traitement des spectres Brillouin mesurés par un B-OTDA. Il est possible d'extraire de l'information sur les déformations au sein de *w*.

Tableau 9 : Principaux interrogateurs Brillouin industriels disponibles sur le marché et leurs caractéristiques annoncées par le constructeur. NR : Non Renseigné

Constructeur (Pays) « Nom »	**Yokogama (Japon) « AQ8600 »**	**Sensornet (UK) « DTSS »**	**Omnisens (Suisse) « DiTest STA-R »**	**Neubrex (Japon) « Neubrescope NBX-7020»**	**OZ Optics (Canada) « Foresight series »**	**FibrisTerre (Allemagne) « fTB 2505 »**
Principe	B-OTDR	B-OTDR	B-OTDA	B-OTDA / Rayleigh	B-OTDA	B-OFDA
Base de mesure minimale (portée maximale associée)	1 m (1 km)	1 m (5 km)	1 m (5 km)	5 cm (1 km)	10 cm (1 km)	1 m
Portée maximale (pour w = 2 m)	25km	10 km	25 km	25 km	20 km	25 km
Temps d'acquisition (pour 10km)	1 min	~4 min	~5 min	5 min	<100 ms	8 min
Echantillonnage fréquentiel minimal	2 MHz	1 MHz	1 MHz	1.2 MHz	0.2 MHz	NR
Résolution en déformation	+/- 30 µm/m	+ /- 20 µm/m	+/- 20 µm/m	+/- 15 µm/m	+ /- 2 µm/m	+/-2 µm/m
Prix	+	++ (ou location)	+ (ou location)	+++	+++	NR

II.1.2. Etude du B-OTDA

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement d'un interrogateur Brillouin, nous étudions les phénomènes physiques régissant la mesure du spectre stimulé. Le B-OTDA a été étudié depuis 1995 avec une première modélisation basée essentiellement sur la théorie de l'interaction des ondes électromagnétiques. Celui-ci permet alors de poser les bases d'une méthode de post-traitement des spectres Brillouin stimulés pour détecter des évènements de l'ordre du centimètre (Ravet, 2007).

II.1.2.1. Interaction des ondes pompe et sonde

Les travaux de Bao *et al.* autour d'un modèle direct basé sur la physique optique ont permis la compréhension de la chaîne de mesure du B-OTDA (Bao, 1995). Supposons un modèle quasi-stationnaire pour l'interaction entre les ondes, valable sous l'hypothèse que la durée de l'impulsion de l'onde sonde τ soit supérieure à la durée de vie du phonon, les intensités des ondes pompe et sonde peuvent être décrites grâce aux équations couplées suivantes :

$$\frac{\partial \boldsymbol{I_p}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})}{\partial z} = -\boldsymbol{g_B}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}).\boldsymbol{I_{CW}}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}).\boldsymbol{I_p}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}) - \alpha.\boldsymbol{I_p}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}), \qquad \text{(II-1-6.a)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{I_{CW}}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})}{\partial z} = -\boldsymbol{g_B}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}).\boldsymbol{I_{CW}}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}).\boldsymbol{I_p}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}) - \alpha.\boldsymbol{I_{CW}}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}), \qquad \text{(II-1-6.b)}$$

avec $\boldsymbol{I_{CW}}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})$ et $\boldsymbol{I_p}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})$ respectivement l'intensité de l'onde sonde et de l'onde pompe en fonction de la position sur la fibre. Le gain Brillouin spontané $\boldsymbol{g_B}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})$ est défini par équation (II-1-1).

La méthode de résolution de ces équations est décrite dans Bao *et al.* (Bao, 1995). En supposant que l'onde sonde soit seulement assujettie à l'atténuation de la fibre optique, le terme couplé de l'équation II-1-6.b devient négligeable, ce qui implique :

$$\boldsymbol{I_{CW}(v,z) = I_{CW}(v,L).\,e^{-\alpha(L-z)}}\ , \qquad \text{(II-1-7)}$$

avec $I_{CW}(L)$ l'intensité initiale de l'onde sonde dans la fibre, α le coefficient d'atténuation de la fibre optique et L la longueur de la fibre optique. En substituant (II-1-7) dans (II-1-6.a) et en supposant que $\boldsymbol{g_B(v,z)}$ est uniforme au sein de la fibre, une solution analytique a été obtenue pour l'onde pompe :

$$\boldsymbol{I_p(v,z) = I_p(v,0).}\exp\left[-\frac{\boldsymbol{g_B(v,z)}.(\exp(\alpha.\boldsymbol{z})-1).I_{CW}(\boldsymbol{v},L)}{\alpha} - \alpha.\boldsymbol{z}\right], \qquad \text{(II-1-8)}$$

avec $I_p(v,0)$ l'intensité d'entrée de l'onde pompe.
En substituant $I_p(\boldsymbol{v},z)$ dans (II-1-6.a), la résolution de plusieurs intégrales nous permet d'exprimer la variation d'intensité de l'onde sonde par le gain Brillouin :

$$\frac{\boldsymbol{I_{CW}(v,z)}}{\boldsymbol{I_{CW}(v,z+w)}} = \exp\left\{K_0\left[\frac{E_2(\beta x_1)}{x_1} - \frac{E_2(\beta x_2)}{x_2}\right] - \alpha.\boldsymbol{z}\right\}, \qquad \text{(II-1-9)}$$

où :
$x_1 = e^{\alpha.\boldsymbol{z}}$
$x_2 = e^{\alpha.(\boldsymbol{z}+\Delta\boldsymbol{z})}$
$K_0 = g_{B0}.\boldsymbol{I_p(v,0)}.\dfrac{e^{\alpha.\beta}}{\alpha}$
$\beta = \boldsymbol{g_B(v,z).I_{CW}(v,L).}\,e^{-\alpha.L}$
et :

$$E_2(x) = \int_{\boldsymbol{1}}^{+\infty} \frac{\boldsymbol{exp(-x.t)}}{\boldsymbol{t^2}}.\boldsymbol{dt} \qquad \text{(II-1-10)}$$

Dans le cas d'un gain Brillouin, l'équation ci-dessus peut être facilement estimée grâce à des outils numériques permettant de calculer l'expression (II-1-10) (Ravet, 2007).

Le cas d'une perte Brillouin implique un signe négatif (g_B est négatif) dans l'intégrale (II-1-10), ce qui donne une intégrale infinie alors que la somme des deux intégrales dans (II-1-9) est finie. Dans ce cas, une solution plus naturelle est de faire une approximation du 1er ordre de la sorte : si l'on suppose $\boldsymbol{g_B(v,z)}.I_{CW}(v,L).L$<<1, l'intensité de l'onde pompe devient alors :

$$\boldsymbol{I_p(v,z)} = I_p(v,0).\,e^{-\alpha.\boldsymbol{z}}\ , \qquad \text{(II-1-11)}$$

ce qui revient à dire que l'intensité de l'onde pompe tout au long de la fibre est indépendante de l'interaction avec l'onde sonde. Pour n'importe quel cas gain / perte Brillouin, en substituant (II-1-11) dans(II-1-6.a), l'intensité de l'onde sonde arrivant au capteur est la suivante :

$$\boldsymbol{I_{CW}(v,0) = I_{CW}(v,L).}\,e^{\boldsymbol{g_B(v,0)}.I_p(0).e^{-\alpha.\boldsymbol{z}}.\Delta z-\alpha.L} \qquad \text{(II-1-12)}$$

Le gain peut être alors mesuré en fonction de l'endroit de l'interaction et on peut reconstruire la matrice des spectres Brillouin en fonction des paramètres du capteur :

$$\boldsymbol{G(v,z)} = \frac{\boldsymbol{I_{CW}(v,z)}}{\boldsymbol{I_{CW}(v,z+w)}} \qquad \text{(II-1-13)}$$

C'est à partir de ce modèle qu'une industrialisation d'un tel procédé a été rendue possible. L'influence des paramètres de réglages des ondes électromagnétiques sur la forme du spectre Brillouin a été étudiée. Cela a amené le questionnement sur la possibilité de diminuer la résolution de mesure pour qu'elle soit de l'ordre de la dizaine de centimètres.

Contrairement au spectre Brillouin spontané mesuré par le B-OTDR, qui conserve sa forme quels que soient les paramètres de mesure ($\Delta\nu_B$ ~ 31 MHz), le spectre Brillouin stimulé peut voir sa forme évoluer selon le réglage des différents paramètres de l'appareil : puissance, fréquence du laser, taux d'extinction de l'onde pompe, etc. Expérimentalement, Bao *et al.* (Bao, 1999) et Smith *et al.* (Smith, 1999) ont montré que la largeur à mi-hauteur du spectre Brillouin stimulé évolue selon *w*. En fonction du rapport entre τ (la durée de l'onde pompe) et τ_{ph} (la durée de vie du phonon, qui est environ de 10ns), ils montrent que :

- Si $\tau > \tau_{ph}$: l'interaction est assez longue entre les phonons et les photons. Le spectre Brillouin suit alors une loi lorentzienne,
- Si $\tau \sim \tau_{ph}$: plus la durée de l'impulsion est proche de la durée de vie des phonons, plus le spectre Brillouin s'élargit vers une loi gaussienne,
- *Si* $\tau < \tau_{ph}$: la largeur à mi-hauteur diminue et le spectre Brillouin va suivre une loi lorentzienne.

Evolution du modèle pour des impulsions inférieures à 10 ns

En 2007, Ravet *et al.* (Ravet, 2007) ont proposé une amélioration du modèle permettant de prendre en compte le cas complexe où la durée des impulsions envoyées est de l'ordre de la nanoseconde. Ils considèrent alors que l'excitation des phonons par les photons génère plusieurs spectres Brillouin qui s'additionnent sur la plage de fréquence. Ceci se traduit mathématiquement par une convolution. Un nouveau gain, appelé gain transitoire $\boldsymbol{g_t(\nu, z)}$, est alors défini par :

$$\boldsymbol{g_t(\nu, z) = g_B(\nu, z) * f(\nu)}\ , \qquad \text{(II-1-14)}$$

avec ***f(ν)*** le spectre de l'onde pompe.
En s'inspirant de la méthode de la résolution des équations couplées, il est possible de définir le gain Brillouin transitoire sur toute la base de mesure :

$$\boldsymbol{G_t(\nu, z)} = exp\left\{\alpha.w - \int_z^{z+w} \boldsymbol{g_t(\nu, \varsigma).I_p(\nu}, 0).\exp\left[\frac{\boldsymbol{g_t(\nu,\varsigma).I_{CW}(\nu,L)}.e^{-\alpha.L}.(e^{-\alpha.\varsigma}-1)}{\alpha} - \alpha\right].d\varsigma\right\}. \qquad \text{(II-1-15)}$$

La présence de l'onde continue dans la fibre perturbe l'intensité de l'onde pompe. Sa contribution est exprimée par l'expression suivante, tirée de la méthode de résolution précédente, mais en prenant l'intervalle d'intégration comme la longueur de la fibre optique :

$$\boldsymbol{G_b(\nu, z)} = exp\left\{\alpha.(\boldsymbol{z} - L) - ER.\int_z^L \boldsymbol{g(\nu, \varsigma)}.I_p(\boldsymbol{\nu}, 0).\exp\left[\frac{\boldsymbol{g(\nu,\varsigma).I_{CW}(\nu,L)}.e^{-\alpha.L}.(e^{-\alpha.\varsigma}-1)}{\alpha} - \alpha\right].d\varsigma\right\}, \text{(II-1-16)}$$

avec *ER* le ratio d'extinction de l'onde pompe générée. Le spectre Brillouin stimulé peut être alors modélisé comme le produit des composantes continues et alternatives présentes dans la fibre :

$$\boldsymbol{G_T(\nu, z) = G_t(\nu, z).G_b(\nu, z).} \qquad \text{(II-1-17)}$$

L'utilisation de ce modèle implique le réglage des paramètres gouvernant les ondes électromagnétiques pour optimiser la mesure du spectre : le taux ER, les intensités et les fréquences des ondes introduites, le coefficient d'atténuation de la fibre. Dans l'optique d'obtenir la fréquence Brillouin au sein de la base de mesure, un algorithme permet de s'affranchir de la dépendance de ces paramètres.

II.1.2.2. Algorithme d'optimisation pour la détermination de la fréquence Brillouin

Afin de mesurer le profil de fréquence Brillouin et de s'affranchir des variations de forme des spectres selon les paramètres d'acquisition, Bao *et al.* (Bao, 1999) ont proposé de modéliser les spectres Brillouin stimulés mesurés par un B-OTDA par une loi empirique : la loi pseudo-Voigt, mélange d'une loi gaussienne et lorentzienne :

$$\boldsymbol{V}(\boldsymbol{v}) = M\left\{\omega.\frac{1}{1+\frac{4(v-v_B)^2}{\Delta v_{\mathrm{B}}{}^2}} + (1-\omega).\exp\left(-4.\ln(2).\frac{(v-v_B)^2}{\Delta v_{\mathrm{B}}{}^2}\right)\right\}, \qquad \text{(II-1-18)}$$

avec M le maximum du spectre, v_B la fréquence Brillouin, ω le rapport entre la partie lorentzienne et gaussienne et Δv_{B} la largeur du spectre. En minimisant l'erreur quadratique entre le spectre mesuré $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})$ et le modèle $\boldsymbol{V}(\boldsymbol{v})$ en chaque point z, il est possible d'optimiser les paramètres de forme :

$$\{\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{z}),\boldsymbol{M}(\boldsymbol{z}),\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{z}),\boldsymbol{\Delta v_{\mathrm{B}}}(\mathbf{z})\}^* = argmin\|\boldsymbol{V}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{z}),\boldsymbol{M}(\boldsymbol{z}),\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{z}),\boldsymbol{\Delta v_{\mathrm{B}}}(\mathbf{z})) - \boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})\|_2^2 . \qquad \text{(II-1-19)}$$

La déformation relative $\boldsymbol{\varepsilon}$ entre deux états (0 et 1) de la fibre optique se calcule à partir de la fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{z})$ en supposant que la température soit constante :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{0\to1}}(\boldsymbol{z}) = \frac{\boldsymbol{v_{B1}}(\boldsymbol{z})-\boldsymbol{v_{B0}}(\boldsymbol{z})}{C_\varepsilon} \qquad \text{(II-1-20)}$$

avec $C_\varepsilon = 0.05\ MHz/\mu\varepsilon$.

Influence du support fréquentiel du spectre Brillouin mesuré

L'algorithme nécessite d'être appliqué sur des spectres Brillouin complets : le support fréquentiel doit être assez large pour rassembler un maximum d'informations sur la forme du spectre. La plage de fréquence est fixée au départ de la mesure : si elle est mal réglée et qu'au fil du temps la déformation augmente, le maximum du spectre n'étant plus dans la plage étudiée, alors la détermination de la fréquence Brillouin est largement compromise.

Le pas en fréquence Δv, fixé par l'utilisateur, discrétise cette plage de fréquence et donc va renseigner sur l'incertitude de la détermination de la fréquence Brillouin. Comme nous l'avons dit précédemment, un pas minimal de 1 MHz équivaut à une incertitude de +/-20 µm/m d'après le coefficient de calibration de 0.05 MHz/µε, considérant une variation de température nulle.

II.1.2.3. Phénomène de distorsion du spectre Brillouin : limites de l'algorithme d'optimisation

Lorsqu'une contrainte importante est soumise à la fibre optique sur plusieurs mètres, des zones de transition apparaissent entre les zones contraintes et non-contraintes dans lesquelles la déformation de la fibre optique n'était pas uniforme. Prenons comme exemple le cas où le profil de fréquence Brillouin local, noté $\boldsymbol{v_B(x)}$ ($\boldsymbol{x}$ étant l'abscisse curviligne au sein de *w*, dont le pas est centimétrique, voire millimétrique) est non-uniforme. On suppose qu'une augmentation de la fréquence Brillouin de δv_B apparait au sein de la base de mesure (*w*) à une distance δl , comme illustré sur la Figure 26. a. Le spectre alors mesuré devient distordu : il s'élargit et devient asymétrique (Figure 26. b.). Selon les valeurs les rapports $\delta v_B / \Delta v_B$ et δl / *w*, un double pic peut apparaitre (Ravet, 2007).

Dans ce cas, la loi empirique pseudo-Voigt ne permet plus de décrire de manière précise la forme du spectre (Buchoud, 2012). Si l'algorithme d'optimisation est appliqué sur ce genre de spectre, alors la fréquence Brillouin estimée correspondra à une fréquence Brillouin globale sur *w*, mais ne pourra pas caractériser le profil de fréquence Brillouin réel.

Nous verrons par la suite que l'extension du modèle physique permet d'extraire de l'information sur la distorsion des spectres.

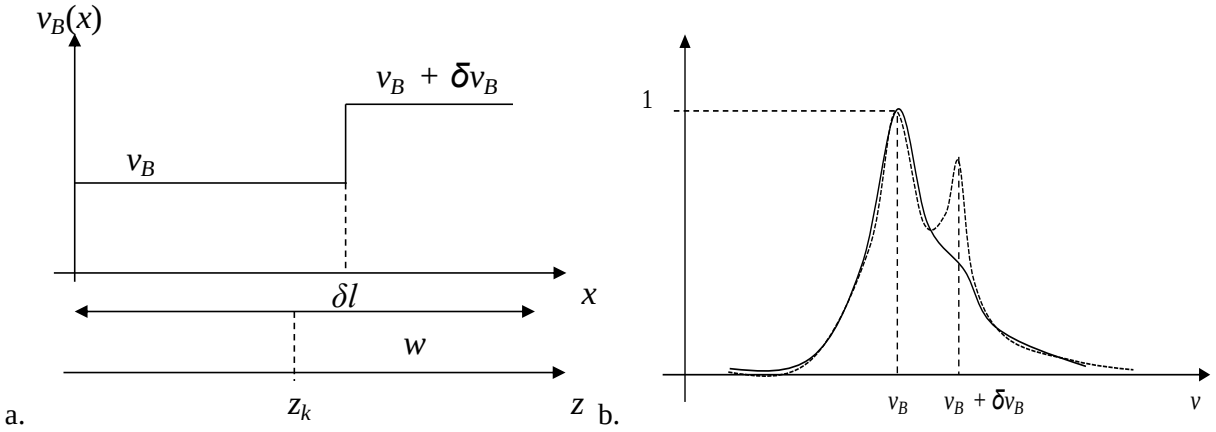


Figure 26 : a. Illustration d'un profil de fréquence Brillouin non uniforme : une augmentation de la fréquence Brillouin de δv_B apparait au sein de la base de mesure (*w*) à une distance δl. b. Influence de δv_B et δl sur la forme du spectre Brillouin mesuré : selon la valeur du rapport δl / *w* le spectre mesuré présente un double pic (pointillé) ou est élargi (trait plein).

II.1.3. Modélisation de la chaîne de mesure et interprétation de la distorsion

II.1.3.1. Présentation du modèle de la chaîne de mesure

En considérant le système de mesure dans sa globalité, nous proposons une approche fonctionnelle de la chaine de mesure et donc une simplification de la modélisation de spectres Brillouin stimulés mesurés par la chaîne de mesure composée d'un B-OTDA.

Comme nous le montre le modèle de Ravet *et al.* (Ravet, 2007), le spectre stimulé correspond à un spectre spontané, mais dont la forme est modifiée par les effets d'échange d'énergie entre les ondes électromagnétiques que sont les ondes sonde et pompe. Nous traduisons ce phénomène par une fonction de transfert ***d(v)*** qui dépend donc des paramètres d'acquisition de l'appareil : *w*, Δz, et *L*.

Nous décidons de ne pas considérer les paramètres avancés de l'appareil et nous montrons grâce au modèle suivant qu'ils ne sont pas nécessaires pour estimer le spectre Brillouin.

Le spectre Brillouin stimulé élémentaire $\boldsymbol{s_e(v)}$ est défini comme étant le résultat de la mesure d'un spectre stimulé à un endroit *x* :

$$\boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v_B}(x)) = \boldsymbol{g_B}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v_B}(x)) * \boldsymbol{d}(\boldsymbol{v}), \qquad \text{(II-1-21)}$$

La forme de ce spectre évolue donc entre une lorentzienne et une gaussienne selon les caractéristiques de la chaine de mesure. Il est centré en la fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B(x)}$, i.e. il correspond au résultat de la convolution entre $\boldsymbol{s_e(v)}$ et un Dirac centré en $\boldsymbol{v_B(x)}$:

$$\boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v_B}(x)) = \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}) * \boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v_B}(x)) \qquad \text{(II-1-22)}$$

Au sein de la fibre optique, nous considérons qu'à tout endroit de la fibre *x*, il existe un spectre Brillouin élémentaire (cf. II-1-1). Celui-ci est centré en une fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B(x)}$. En s'appuyant sur le modèle précédent, nous définissons alors le spectre Brillouin stimulé mesuré comme l'intégrale sur la base de mesure *w* de ces spectres élémentaires :

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k) = \int_{z_k-\frac{w}{2}}^{z_k+\frac{w}{2}} \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}) * \boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})).dx\,, k = \{1, \dots, N_z\} \qquad \text{(II-1-23)}$$

La forme de $\boldsymbol{s_e}$ va évoluer selon les réglages automatiques de l'appareil lors de la configuration de la chaine de mesure. Toutefois, cette forme peut être estimée, comme nous allons le montrer plus loin.
Nous pouvons ainsi modéliser le spectre Brillouin stimulé mesuré par un B-OTDA. Ce modèle permet de passer outre la connaissance des paramètres avancés de l'appareil pour la modélisation des spectres.

En discrétisant le vecteur *x* avec un pas de mesure Δx, le spectre peut être approché :

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k) \cong \frac{1}{N_x} \sum_{i=(z_k-w/2)\frac{\Delta z}{\Delta x}}^{(z_k+w/2)\frac{\Delta z}{\Delta x}} \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}) * \boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{v}-v_{Bi}) \quad et\ k = \{1, \dots, N_z\}, \qquad \text{(II-1-24)}$$

où $N_x = \frac{w}{\Delta x}$ et les v_{Bi} sont les valeurs des fréquences Brillouin locales, $i = 1,\dots, N_x$. Par distributivité du produit de convolution :

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k) \cong \frac{1}{N_x} \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}) * \left(\sum_{i=(z_k-w/2)\frac{\Delta z}{\Delta x}}^{(z_k+w/2)\frac{\Delta z}{\Delta x}} \boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{v}-v_{Bi})\right) \quad et\ k = \{1, \dots, N_z\}, \qquad \text{(II-1-25.a)}$$

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k) \cong \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}) * \boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{v_B}) \qquad \text{(II-1-25.b)}$$

Notons $\boldsymbol{h}_k$ l'histogramme des fréquences Brillouin au sein de *w*, centré en z_k.

$$\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{v_B}) = \frac{1}{N_x} . \sum_{i=(z_k-w/2)\frac{\Delta z}{\Delta x}}^{(z_k+w/2)\frac{\Delta z}{\Delta x}} \boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{v}-v_{Bi}) \qquad \text{(II-1-26)}$$

Nous définissons alors le terme de **composante spectrale** comme le spectre $\boldsymbol{s_e(v)}$ centré en une fréquence Brillouin locale v_{Bi}. N_{pk} est le nombre de composantes spectrales contenues dans le spectre $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$.

Comme illustration de la distorsion Brillouin, un créneau entre ν_{B1} et ν_{BP} en fréquence est considéré comme étant le profil de fréquence Brillouin au sein de w à une position z_k fixée (Figure 27. a). Le support fréquentiel de l'histogramme des fréquences Brillouin $\boldsymbol{h_k(\nu_B)}$ est alors compris entre la fréquence ν_{B1} et ν_{BP} (Figure 27. b.). Le spectre mesuré peut donc être modélisé par la convolution des spectres locaux $\boldsymbol{s_e(\nu)}$ avec l'histogramme $\boldsymbol{h_k(\nu_B)}$ (Figure 27. c.).

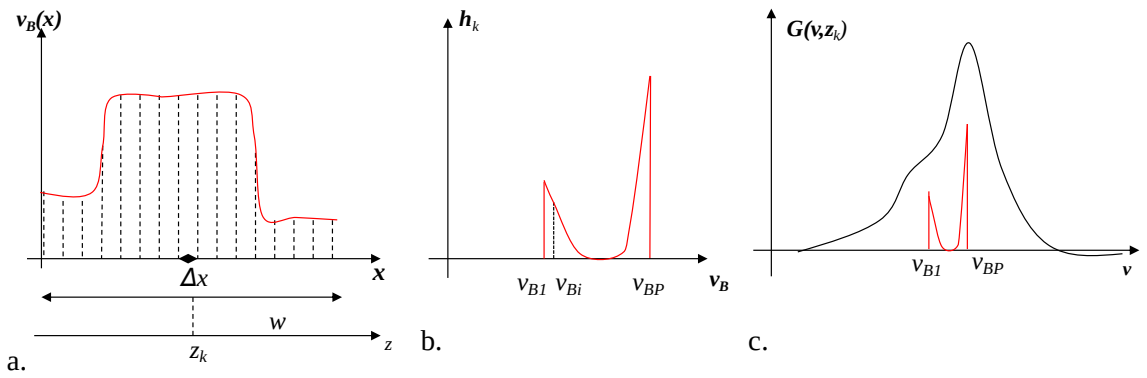


Figure 27 : a. Illustration d'un profil de fréquence Brillouin $\boldsymbol{\nu_B(x)}$ au sein de w. b. Illustration de l'histogramme $\boldsymbol{h_k}$ de la fréquence Brillouin. c. Spectre Brillouin associé à $\boldsymbol{\nu_B(x)}$ et obtenu par la convolution de l'histogramme $\boldsymbol{h_k(\nu_B)}$ avec le spectre stimulé $\boldsymbol{s_e(\nu)}$.

Pour appliquer notre modèle et estimer un spectre Brillouin, il suffit donc de connaitre uniquement les paramètres suivants :

- ⇨ La forme du spectre stimulé $\boldsymbol{s_e(\nu)}$. Celle-ci est estimable si la déformation est uniforme sur w. En effet, si pour tout $j \in w, \boldsymbol{\nu_B}(x_j) = \nu_{Bg}$, alors $\boldsymbol{G(\nu, z_k)} \cong \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{\nu} - \nu_{Bg})$. Le spectre mesuré est alors équivalent au spectre élémentaire centré sur la fréquence Brillouin ν_{Bg}. Sa forme est décrite analytiquement par une loi de type pseudo-Voigt. L'introduction de cet élément permet de s'affranchir de la dépendance des paramètres optiques : ER, intensité des ondes lumineuses, etc. qui ne sont pas fournis. De manière opérationnelle, la déformation doit être quasiment uniforme sur quelques mètres de la fibre optique pour pouvoir estimer la forme du spectre élémentaire. Ceci est tout à fait envisageable par exemple en laissant le début de la fibre optique en dehors de la structure à instrumenter ou en prévoyant des regards à différentes positions,

- ⇨ La longueur sensible de la fibre optique, L, le pas de mesure de l'appareil, Δz, et sa base de mesure w,

- ⇨ La distribution de la fréquence Brillouin $\boldsymbol{\nu_B(x)}$ au sein de w ; ou l'histogramme associé, $\boldsymbol{h}$. Par la suite, nous voudrons déterminer ces deux inconnues pour estimer la déformation avec un pas centimétrique.

Un intérêt pratique d'un tel modèle est d'être peu dépendant des appareils utilisés. Lors d'une auscultation d'ouvrages, si l'appareil de mesure est amené à être remplacé, le nouvel appareil va automatiquement configurer les paramètres optiques (intensité des ondes lumineuses, ER, …) en fonction de la ligne optique à interroger. Il suffit alors de mettre à jour les paramètres d'acquisition, s'ils ont été changés, et le spectre élémentaire $\boldsymbol{s_e(\nu)}$. Dans le cas où un appareil de type B-OTDA est

amené à remplacer un B-OTDR, le modèle proposé est valable. En effet, le spectre élémentaire correspond alors au spectre Brillouin spontané, de type lorentzien donné par l'équation II-1-1.

II.1.3.2. Validation du modèle

Dans le but de vérifier la validité du modèle proposé, une expérience en milieu contrôlée a été réalisée (voir l'Annexe B pour plus de détails). Des mesures de déformation acquises par interrogateur Rayleigh OBR Luna avec un pas de 3 cm sont effectuées sur une fibre optique de quelques mètres. Dans un même temps, un interrogateur B-OTDA d'Omnisens DiTest est branché à la même fibre optique et effectue des mesures avec un pas de 1m. Une première acquisition est effectuée lorsque la fibre optique est supposée entièrement au repos. D'autres acquisitions ont été programmées lorsque la fibre optique subie une traction entre deux points d'attache distants de 4 m.

La mesure relative de déformation mesurée par l'OBR Luna est traduite en fréquences Brillouin relatives résolues avec un pas de 3 cm. Nous considérons ces fréquences comme le profil de fréquence Brillouin d'entrée, $\boldsymbol{\nu_B(x)}$. Ensuite, une matrice de spectres Brillouin $\boldsymbol{G}$ est générée selon le modèle simplifié avec les paramètres de mesures de l'Omnisens DiTest, soit une base de mesure de 1 m et un pas de mesure de 40 cm. L'objectif de ce test est d'analyser le coefficient de corrélation entre les spectres mesurés par le B-OTDA d'Omnisens DiTest avec ceux modélisés pour conforter la validité du modèle proposé.

Sur les différentes acquisitions, et les différents spectres, ce coefficient est supérieur à 0.95. Ce résultat est équivalent à celui du modèle de Ravet (Ravet, 2007). Il est minimal lorsque la déformation présente d'importantes variations (supérieures à 1000 µm/m sur quelques centimètres) dans la base de mesure. Cela permet de valider le modèle de la chaîne de mesure proposé dans ce chapitre. A partir de celui-ci, nous verrons les différentes techniques permettant d'améliorer le pas de mesure du profil de déformation.

II.1.4. Exploitation du phénomène de distorsion Brillouin

Une méthode d'amélioration de la résolution spatiale a été mise en place par Ravet *et al.* (Ravet, 2007). Celle-ci s'appuie sur la distorsion du spectre Brillouin. Des paramètres de forme ont été définis pour localiser les portions de la fibre pour laquelle la déformation est non-uniforme. Nous en mettons d'autres en place s'appuyant sur le modèle développé dans le paragraphe précédent. Nous les comparons sur des mesures acquises lors de l'expérience du CER de Rouen.

II.1.4.1. Détection et localisation de déformations locales

Pour la détection de fissures, Ravet *et al.* ont défini des paramètres F_A et F_B liés à la forme du spectre mesuré (Ravet, 2006) :

- $\mathbf{F_A(z)}$, caractérise l'asymétrie du spectre,
- $\mathbf{F_B(z)}$ est lié à l'élargissement du spectre.

Ces paramètres sont calculés par rapport à la mesure de demi largeur à mi-hauteur du spectre Γ.

$$\boldsymbol{F_A(z)} = \frac{\Gamma_+}{\Gamma_-} \qquad \text{(II-1-27)}$$

$$\boldsymbol{F_B(z)} = \frac{\Gamma_+ + \Gamma_-}{\Gamma_s} \qquad \text{(II-1-28)}$$

avec Γ_+ la demi-largeur à mi-hauteur droite, Γ_- la demi-largeur à mi-hauteur gauche et Γ_s la largeur de la base (Figure 28).

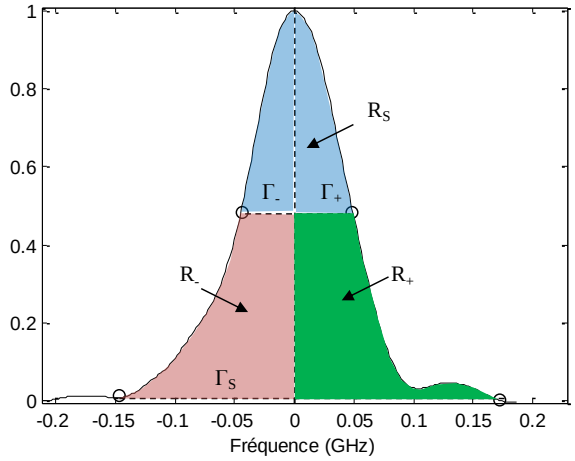


Figure 28 : Définition des aires R_{i+}, R_{i-}, et R_s pour le calcul des paramètres de forme définis par Buchoud *et al.* (Buchoud, 2012) et des longueurs Γ_+, Γ_- et Γ_S pour les paramètres de formes définis par Ravet *et al.* (Ravet, 2006) sur un spectre réel mesuré au CER de Rouen.

Nous proposons d'utiliser les informations contenues dans l'aire sous le spectre $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$, selon la définition du modèle proposé précédemment :

$$\int_{\boldsymbol{v_1}}^{\boldsymbol{v_{N_f}}} \boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)\, \boldsymbol{dv} = \int_{\boldsymbol{v_1}}^{\boldsymbol{v_{N_f}}} \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}) * \boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{v_B})\boldsymbol{dv}$$
$$= \left(\int_{\boldsymbol{v_1}}^{\boldsymbol{v_{N_f}}} \boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{dv}\right).\left(\int_{\boldsymbol{v_1}}^{\boldsymbol{v_{N_f}}} \boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{v_B})\boldsymbol{dv}\right) = R_{\boldsymbol{s_e}}.R_{\boldsymbol{h}_k} \qquad \text{(II-1-29)}$$

En appliquant le théorème de Fubini, l'aire est donc le produit de deux termes : d'une part, $R_{\boldsymbol{s_e}}$ qui est l'aire sous le spectre stimulé Brillouin, donc constante le long de la distance $\boldsymbol{z}$, et d'autre part $R_{\boldsymbol{h}_k}$ qui est l'aire sous l'histogramme du profil de fréquence Brillouin.

D'après le modèle proposé, une non-uniformité du profil de fréquence Brillouin dans *w* se traduit par une évolution de l'histogramme. Afin de détecter une évolution au sein de la distribution de celui-ci et donc une asymétrie ou un élargissement du spectre, nous proposons les nouveaux paramètres de forme s'appuyant sur la mesure des aires sous le spectre (Buchoud, 2012) :

- $\mathbf{R_A(z)}$, lié à l'asymétrie du spectre,
- $\mathbf{R_B(z)}$, lié à l'élargissement du spectre.

$$\boldsymbol{R_A}(\boldsymbol{z}) = \frac{A_+}{A_-} \qquad \text{(II-1-30)}$$

$$\boldsymbol{R_B}(\boldsymbol{z}) = \frac{R_{i+}+R_{i-}}{R_s} \qquad \text{(II-1-31)}$$

A_+ et A_- correspondent à l'aire sous les parties gauche et droite du spectre respectivement. R_{i+} et R_{i-} sont les aires des parties inférieures droite et gauche et R_s la partie supérieure du spectre (Figure 28). Afin de les calculer, les points d'inflexion du spectre sont détectés grâce aux maxima de la dérivée seconde du spectre. Pour comparer les différents paramètres de forme, ils seront appliqués sur des données réelles dans la section II.1.4.3.

II.1.4.2. Amélioration de la résolution spatiale

Grâce à l'exploitation des informations contenues dans la forme du spectre Brillouin mesuré par un B-OTDA, Ravet *et al.* (Ravet, 2007. a.) ont proposé un algorithme de déconvolution du spectre pour l'amélioration de la résolution spatiale de l'appareil. Son protocole est décrit succinctement dans ce paragraphe, mais peut être approfondi en se référant à Ravet *et al.* (Ravet, 2007 a. et b.) et Bao *et al.* (Bao, 2011).

Dans un premier temps, les auteurs supposent que le spectre Brillouin $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$ au sein de la base *w*, centré en z_k, est la somme des spectres spontanés $\boldsymbol{g_B}$ présents dans *w* :

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{v}, z_k) = \frac{1}{N_{pk}} . \sum_{i=1}^{N_{pk}} \gamma_i . \boldsymbol{g_B}(\boldsymbol{v}, v_{Bi}, \Delta v_B), \qquad \text{(II-1-32)}$$

avec N_{pk} le nombre de composants dans le spectre distordu, $\boldsymbol{g_B}(\boldsymbol{v}, v_{Bi}, \Delta v_B)$ le spectre spontané centré en la fréquence v_{Bi} et de largeur à mi-hauteur Δv_B (autour de 31 MHz) et γ_i la proportion de chaque spectre spontané dans le spectre mesuré.

Le but de cette méthode est d'améliorer la résolution spatiale de l'appareil et donc d'estimer une distance δl (inférieure à *w*) sur laquelle s'applique une variation de déformation δv_B. L'algorithme proposé s'appuie sur la distorsion du spectre, qui est proportionnelle à ces valeurs. Grâce au modèle avancé du fonctionnement du B-OTDA, un diagramme longueur – déformation a pu être défini en fonction des rapports de $\delta v_B/\Delta v_B$ et $\delta l/w$ (Figure 26). Deux zones ont été caractérisées dans lesquelles le spectre Brillouin stimulé présente un simple pic distordu ou un double pic.

Lorsque le spectre Brillouin stimulé présente deux pics, alors la détermination de la variation de déformation δv_B correspond à la différence entre les deux fréquences centrales des pics (Ravet, 2007). Dans ce cas, la portion de la fibre δl atteinte par la déformation est proportionnelle au rapport des maxima des deux pics. Cependant, lorsque le spectre est seulement asymétrique, ou élargi, la méthodologie fait appel aux paramètres de forme : F_A et F_B. Une relation empirique entre ces coefficients et γ permet d'estimer les paramètres d'intérêt : δv_B et δl, tout en minimisant l'erreur entre les spectres mesuré et modélisé (grâce au modèle avancé de l'appareil).

La résolution spatiale est alors inférieure au centimètre puisqu'une déformation a été détectée sur δl = 0.34 cm (pour une base de mesure *w* = 20 cm, avec un interrogateur B-OTDA expérimental). Cependant, il n'est pas possible de la localiser précisément au sein de la base de mesure *w* : en effet, le spectre distordu est mesuré sur une base de mesure d'une longueur *w* en général de l'ordre du mètre (pour un interrogateur industriel). Notre objectif est d'avoir une mesure de déformation avec un pas de mesure de l'ordre du centimètre. Bien que cette première méthode de post-traitement soit intéressante, une méthode alternative s'appuyant sur le modèle simplifié de la chaine de mesure est décrite dans le chapitre 2.

II.1.4.3. Comparaison des paramètres de forme

Dans un premier temps, nous allons démontrer les limites de l'algorithme de l'interrogateur B-OTDA qui consiste à estimer le maximum du spectre Brillouin comme la fréquence Brillouin. Dans un deuxième temps, nous verrons que les paramètres de formes proposés sont suffisamment sensibles pour détecter et localiser des déformations au sein de la base de mesure.

II.1.4.3.1. Estimation de la déformation

Nous nous concentrons sur l'expérience réalisée au CER Rouen pour la génération de fontis (cf. section I.4.1). Plusieurs abaissements de la plaque ont été effectués pour créer la cavité souterraine. Deux interrogateurs sont couplés à un même câble à fibre optique :

- un interrogateur de technologie Rayleigh (du fournisseur OBR Luna), dont le pas de mesure est 3 cm, considéré comme la mesure de déformation de référence.
- un interrogateur B-OTDA (DiTest, du fournisseur Omnisens), dont le pas de mesure est de 40 cm pour une base de mesure de 1 m.

Pour chaque état de la fibre optique (état initial, sans déformation, et état déformé), les matrices de spectres Brillouin sont acquises avec un pas d'échantillonnage fréquentiel de 1 MHz. A partir de ces spectres, un profil de fréquence Brillouin est estimé grâce à l'algorithme d'optimisation de la loi pseudo-Voigt (paragraphe II.1.2.2). Enfin, la déformation relative est calculée grâce à la formule (II-1-1) en supposant que la température soit constante (Figure 29. a., en bleu) .

Lors de l'abaissement de la plaque, la signature de la déformation est mise en évidence par la mesure de déformation de référence (Figure 29.a., en rouge) : une première zone de déformation positive relative à la traction de la fibre, puis une zone négative relative à une compression. Cette signature est également perceptible sur les mesures de déformation issues du B-OTDA. Néanmoins, l'effet du pas de mesure de 40 cm et d'une base de mesure de 1 m se manifeste par un signal de déformation sous-échantillonné et moins précis en déformation.

Nous pouvons toutefois constater qu'à z = - 0.4 m la déformation au sein de w présente un fort gradient, passant d'un maximum local à 100 µm/m au minimum de -314 µm/m en l'espace d'un mètre. En approfondissant l'étude de la forme des spectres entre état initial et déformé, nous pouvons constater que le spectre est distordu à sa base. Nous allons maintenant comparer les sensibilités des paramètres de forme définis par Ravet *et al.* (Ravet, 2006) sur les jeux de données du CER de Rouen.

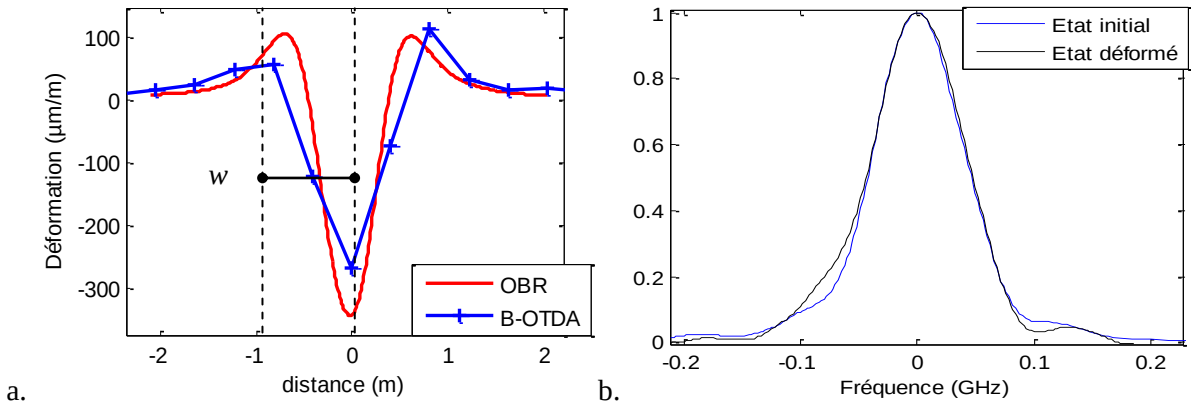


Figure 29 : a. Estimation de la déformation relative entre deux états de la fibre optique issue du interrogateur Brillouin B-OTDA (bleu) pour un pas de mesure Δz = 40 cm et une base de mesure w = 1 m et du capteur de référence (interrogateur Rayleigh, pas de mesure Δx = 3 cm, en rouge). b. Evolution de la forme du spectre Brillouin mesuré à z_k = -0.4 m entre les deux états de la fibre.

II.1.4.3.2. Application des paramètres de forme

Les paramètres de forme relatifs à l'état de référence sont calculés sur les spectres Brillouin pour tous les abaissements. La Figure 30 montre l'évolution de ces paramètres selon la distance le long de la fibre (0 correspondant au centre du caniveau en béton actionné par les vérins) et l'abaissement de la plaque.

Pour détecter l'asymétrie du spectre, $\boldsymbol{F_A(z)}$ permet d'identifier des zones de gradients importants à 0.4 m, -0.4 m et 0.8 m. $\boldsymbol{R_A(z)}$ localise des non uniformités de la déformation entre -0.8 m et 0.8 m. En se référant à la mesure de déformation (Figure 29. a., en rouge), cela correspond aux bases de mesure dans lesquelles la déformation n'est pas uniforme. $\boldsymbol{R_A}$ est moins bruité que son homologue basé sur le calcul des longueurs. Ce paramètre parait également proportionnel à l'abaissement de la plaque puisqu'il augmente (en valeur absolue) avec celui-ci. Ce paramètre est donc bien sensible à l'évolution de la déformation au sein de *w*.

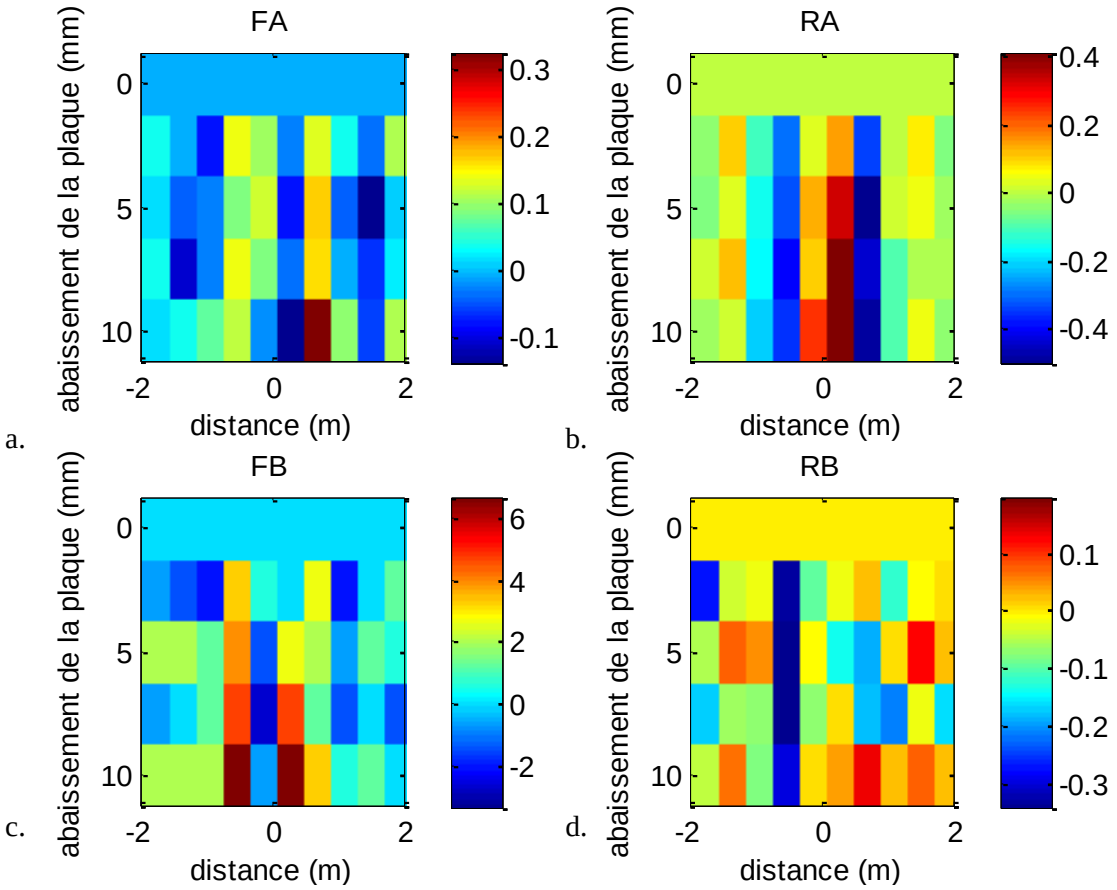


Figure 30 : Evolution des paramètres de forme relatifs à l'état initial en fonction de l'abaissement de la plaque : a. $\mathbf{F_A}$, b. $\mathbf{R_A}$, c. $\mathbf{F_B}$, d. $\mathbf{R_B}$.

En termes d'élargissement (Figure 30. c. et d.), les paramètres de forme $\boldsymbol{F_B(z)}$ et $\boldsymbol{R_B(z)}$ permettent d'identifier clairement et de caractériser une zone dans laquelle la déformation est irrégulière à z = -0.8 m. Néanmoins, le coefficient basé sur le calcul des aires est assez bruité en fonction de la distance et de l'abaissement des plaques. Il ne permet pas de distinguer un élargissement du spectre en z = 0 m (Figure 30. c.) détecté par $\boldsymbol{F_B(z)}$. Le bruit de mesure de l'appareil influe plus les nouveaux paramètres de détection puisque une partie du spectre est intégrée.

Nous avons également calculé ces paramètres sur les données issues de l'expérience d'Ijkdijk (Annexe A). Comme les spectres sont bruités, seul le paramètre de détection $\mathbf{R_A}$ permet de détecter des distorsions du spectre.

II.1.5. Conclusion

Ce chapitre résume les différentes techniques existantes en matière de mesure du spectre Brillouin, leurs spécificités, avantages et inconvénients. Pour EDF, le choix d'un interrogateur abordable en termes de prix et avec un retour d'expérience important sur sa robustesse et sa fiabilité en termes de mesures est primordial pour la surveillance de ses ouvrages. Parmi les possibilités offertes sur le marché, le B-OTDA industriel commercialisé actuellement par Omnisens permet d'allier fiabilité de la mesure, retour d'expérience important et moindre coût. Néanmoins, technologiquement parlant, ce type de capteur présente un pas de mesure de 40 cm pour une base de mesure de 1 m. Pour une localisation précise de défauts tels que fissures ou tassements, un pas de mesure centimétrique est nécessaire.

En approfondissant l'étude de fonctionnement d'un interrogateur de type B-OTDA, les inconvénients du modèle basé sur les phénomènes d'interactions des ondes électromagnétiques portent sur la connaissance des paramètres pour la mesure optimale d'un spectre Brillouin. Un premier algorithme permet d'optimiser les paramètres d'une loi empirique pour déterminer la fréquence Brillouin et s'affranchir de cette dépendance. Afin de mesurer le profil de fréquence Brillouin, et ainsi déterminer la déformation, une autre méthode s'appuie sur l'optimisation d'une loi empirique permettant de décrire la forme du spectre Brillouin stimulé. En minimisant l'erreur entre le spectre mesuré et modélisé, la fréquence Brillouin est estimée. Cependant, lorsque la déformation est non uniforme sur la base de mesure w, le phénomène de distorsion Brillouin apparait : le spectre est asymétrique et distordu. Alors le modèle empirique proposé ne permet plus de caractériser la forme du spectre et l'algorithme d'optimisation estime une fréquence Brillouin globale.

Nous proposons alors un modèle de la chaîne de mesure qui s'appuie sur l'interprétation du modèle physique de l'interrogateur et qui permet de prendre en compte les phénomènes de distorsion Brillouin. Validé sur des données expérimentales, ce modèle nous a permis de définir des nouveaux paramètres de forme pour localiser des évènements impliquant une non uniformité de la fréquence Brillouin au sein de la base de mesure. Ces paramètres de forme sont à utiliser en complément des données fournies par l'interrogateur. Ils ont prouvé leurs capacités et sensibilités à caractériser des tassements sur des mesures acquises par un B-OTDA lors d'une expérience contrôlée. En s'appuyant sur le modèle développé dans ce chapitre, nous proposons une technique de post traitement des spectres Brillouin améliorant le pas de mesure et la résolution en déformation.

Chapitre 2 :

Reconstruction du profil de fréquence Brillouin pour l'amélioration de la résolution spatiale

II.2.1. Introduction et présentation du problème 59
II.2.1.1. Introduction 59
II.2.1.2. Principes pour l'amélioration du pas de mesure 59
II.2.2. Reconstruction du profil de fréquences Brillouin par déconvolution 61
II.2.2.1. Les techniques de séparation de sources 61
II.2.2.2. Décomposition en matrices positives 63
II.2.2.2.1. Factorisation en matrices non négatives avec parcimonie 63
II.2.2.2.2. Méthode des Moindres Carrés à coefficients positifs 66
II.2.2.2.3. Méthodes de reconstruction 68
II.2.2.2.4. Reconstruction empirique 69
II.2.2.2.5. Reconstruction statistique 71
II.2.3. Inversion paramétrique itérative 74
II.2.3.1. Principe 74
II.2.3.2. Détermination du coefficient de régularisation : méthode de la *L-curve* 75
II.2.4. Comparaison des méthodes 76
II.2.4.1. Simulation 76
II.2.4.2. Application des algorithmes de séparation de sources 77
II.2.4.3. Comparaison des algorithmes de reconstruction 79
II.2.4.4. Discussion 82
II.2.4.5. Conclusion sur les données simulées. 84
II.2.4.6. Application sur des données expérimentales : CER de Rouen 84
II.2.5. Conclusion et perspectives 86

II.2.1. Introduction et présentation du problème

II.2.1.1. Introduction

Comme nous l'avons constaté dans le chapitre précédent, l'algorithme d'un interrogateur de type B-OTDA estime la fréquence Brillouin comme l'abscisse du maximum du spectre Brillouin acquis sur une base de mesure de 1 m avec un pas de 40 cm. Nous avons également montré que la distorsion du spectre est un indicateur précieux pour la prise en compte de l'information contenue dans ce spectre. En s'inspirant de la technique de post traitement de Ravet *et al.* (Ravet, 2007), nous allons en tirer profit afin d'améliorer le pas de mesure et la résolution spatiale d'un interrogateur B-OTDA industriel.

En nous appuyant sur le modèle direct de la chaine de mesure présenté dans le chapitre précèdent, nous proposerons deux méthodes de reconstruction du profil de fréquences Brillouin.

La première méthode, qui se base sur le principe de déconvolution, fait l'objet de la section 2 de ce chapitre. Elle comprend deux étapes : la séparation des spectres Brillouin permettant de déterminer les caractéristiques des différentes composantes spectrales ; la reconstruction d'un profil de fréquences Brillouin avec un nouveau pas de mesure fixé par l'utilisateur. Pour ce faire, deux algorithmes de traitement du signal seront proposés : le premier s'appuie sur la redondance spatiale des spectres (Buchoud, 2013) et le deuxième suit une approche statistique (Dobigeon, 2007).

La deuxième méthode, présentée à la section 3 de ce chapitre, est basée sur une inversion paramétrique itérative du modèle direct de la chaine de mesure. Cette méthode s'appuie sur des principes de régularisation.

Ensuite, dans la section 4, les méthodes et algorithmes proposés sont testés et comparés entre eux. Cette analyse est faite d'une part sur des données simulées permettant de maîtriser les degrés de liberté de chacun d'entre eux et d'autres part sur des données réelles acquises lors de l'expérimentation du CER de Rouen concernant des déformations du sol lors d'un tassement localisé et maîtrisé.
Le paragraphe 5 conclura cette étude et mettra en évidence des perspectives pour la suite de ce travail.

II.2.1.2. Principes pour l'amélioration du pas de mesure

Nous avons établi que les spectres Brillouin peuvent être distordus à cause d'une distribution de la fréquence Brillouin non uniforme au sein de la base de mesure w. Cette idée, déjà illustrée sur la Figure 27, est reprise en Figure 31. a. pour un autre cas de figure. Notre but est de reconstruire, à partir de la matrice $\boldsymbol{G(v,z)}$ de spectres Brillouin mesurée par l'interrogateur industriel B-OTDA, un profil de fréquences Brillouin $\boldsymbol{v_B(x)}$, avec $\boldsymbol{x}$ un nouveau vecteur de distance tel que $\boldsymbol{x}=[x_1, x_2, \dots, x_{Nx}]$, c.-à-d. échantillonné avec un nouveau pas de mesure Δx, où $N_x = \frac{w}{\Delta x}$ la nouvelle longueur du vecteur $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$.

Supposons qu'à z_k, le spectre Brillouin mesuré $\boldsymbol{g}_k(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$ soit distordu. Ce spectre peut être estimé comme étant composé de P_k composantes locales centrées en $v_{Bi,k}$ telles que :

$$\boldsymbol{g}_k(\boldsymbol{v}) \cong \frac{1}{P_k}\sum_{i=1}^{P_k} a_{i,k}.\boldsymbol{s_e}(\boldsymbol{v}-v_{Bi,k}), \text{ avec } k = (1, \dots, N_z), \qquad \text{(II-2-1)}$$

où $a_{i,k}$ est l'amplitude de la $i^{\text{ème}}$ composante spectrale centrée en $v_{Bi,k}$. Les vecteurs des amplitudes et des fréquences Brillouin pour une distance z_k seront notés $\boldsymbol{a}_k$, respectivement $\boldsymbol{v_{Bk}}$. Chaque vecteur est de dimension P_k, c.-à-d. $\boldsymbol{a}_k=[a_{1,k}, a_{2,k}, \dots, a_{Pk,k}]$ et $\boldsymbol{v}_{Bk}=[v_{B1,k}, v_{B2,k}, \dots, v_{BPk,k}]$.

Dans un premier temps, les caractéristiques des P_k composantes spectrales, $\boldsymbol{a_k}$ et $\boldsymbol{v_{Bk}}$, doivent être estimées. Pour cela, nous développerons des algorithmes de séparation de sources qui devront approcher au mieux l'histogramme $\boldsymbol{h_k}$ (définit grâce à l'équation (II-1-26)) des fréquences Brillouin contenues dans le spectre (Figure 31. b.) :

$$\widetilde{\boldsymbol{h}_k} = \frac{\mathbf{1}}{P_k} . \sum_{i=1}^{P_k} I_{[v_{Bi,k-1}, v_{Bi,k}]}(\boldsymbol{v_B}) \,, \qquad \text{(II-2-2)}$$

avec *I(.)* la fonction indicatrice : elle vaut 1 si l'argument est vérifié.

Dans le but de reconstruire le profil de fréquence Brillouin, nous considérons qu'une fréquence Brillouin locale $v_{Bi,k}$ peut être présente à plusieurs *x* au sein de *w*. Nous définissons alors un vecteur de distances $\boldsymbol{d_k}$ défini par :

$$d_{i,k} = a_{i,k} . \Delta x. \qquad \text{(II-2-3)}$$

Chaque élément de ce vecteur représente l'ensemble des portions élémentaires Δx dont la fréquence Brillouin est égale à $v_{Bi,k}$. Il faudra ensuite réorganiser ces fréquences en fonction de la position *x* au sein *w* de manière à minimiser l'erreur de reconstruction du profil de fréquences Brillouin $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$ (Figure 31. c.).

Il existe une infinité de solutions à cette problématique. Nous allons la résoudre en introduisant des *a priori* sur la solution. Cette méthode est appelée par la suite **reconstruction du profil de fréquence Brillouin par déconvolution**.

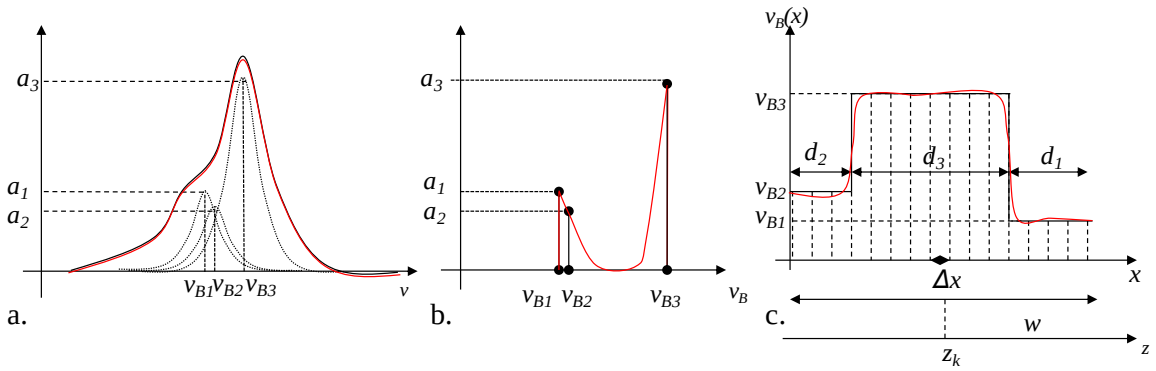


Figure 31 : a. Illustration d'un spectre distordu à une distance z_k et de l'identification des composantes spectrales centrées en $v_{Bi,k}$ et d'amplitudes $a_{i,k}$, dans le cas où P_k = 3. b. Histogramme théorique $\boldsymbol{h_k}$ et amplitudes estimées des fréquences Brillouin au sein de *w*. c. Illustration d'une reconstruction possible du profil de fréquences Brillouin $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$ (en noir), proche de celui théorique (en rouge).

Une deuxième approche consiste à discrétiser la fréquence Brillouin en fonction de *x*, telle que l'expression du spectre Brillouin devienne :

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k) \cong \frac{\Delta x}{w} \sum_{m=\left(k-\frac{w}{2.\Delta z}\right).\frac{\Delta z}{\Delta x}}^{\left(k+\frac{w}{2.\Delta z}\right).\frac{\Delta z}{\Delta x}} \boldsymbol{s_e}\left(\boldsymbol{v} - v_B(x_m)\right), k = (1, \dots, N_z) \,. \qquad \text{(II-2-4)}$$

Notons alors que le spectre Brillouin $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}, z_k)$ est la moyenne des différents spectres élémentaires centrés en des fréquences Brillouin v_B sur w. Pour former la matrice $\boldsymbol{G}$ entière, il suffit de parcourir le vecteur $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$ sur la base de mesure w et un pas de mesure Δz. Nous simplifions l'expression précédente en introduisant l'opérateur ***H(.)*** qui intègre ces deux étapes :

$$\boldsymbol{G} \cong \boldsymbol{H}(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})) \qquad \text{(II-2-5)}$$

En optimisant le profil de fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$ de manière itérative, il serait alors possible de minimiser l'erreur entre le spectre modélisé par l'équation (II-2-5) et celui mesuré par l'appareil : nous faisons donc appel à la **méthode d'inversion du modèle direct**.

Pour résumer, en s'appuyant sur l'interprétation du modèle direct de la chaine de mesure, nous proposons deux méthodes :

- **La reconstruction du profil par déconvolution** qui fait l'objet de la section suivante. Nous estimons d'abord pour chaque spectre Brillouin mesuré les caractéristiques des composantes spectrales dépendant de la fréquence Brillouin et de la distance z_k, à savoir le couple amplitudes – fréquences Brillouin ($\boldsymbol{a_k}$, $\boldsymbol{v_{Bk}}$), grâce à des algorithmes de séparation de sources. Ensuite, nous proposons deux méthodes permettant l'organisation des portions $\boldsymbol{d_k}$ associées aux fréquences Brillouin $\boldsymbol{v_{Bk}}$ au sein de w : une approche empirique basée sur la redondance d'informations contenues dans les spectres, puis une approche statistique.

- **L'inversion du modèle direct** pour l'estimation du profil de fréquence Brillouin. Celle-ci consiste à optimiser le vecteur de fréquences Brillouin pour minimiser l'erreur entre la matrice de spectres Brillouin fournie et simulée (paragraphe II.2.3).

II.2.2. Reconstruction du profil de fréquences Brillouin par déconvolution

II.2.2.1. Les techniques de séparation de sources

La première étape de cette méthode est la séparation des composantes spectrales contenues dans le spectre Brillouin. Il existe plusieurs méthodes de séparation de sources. Une première famille s'appuie sur la connaissance des sources ou sur le système étudié. En connaissant la signature des sources, les modèles ou les expressions analytiques régissant le système, il est légitime d'utiliser la soustraction de modèle (Vandelest, 1995), les méthodes des Moindres Carrés linéaires ou non-linéaires avec ou sans contraintes (Wood, 2008 ; Huang, 2013). La soustraction de modèle apporte des erreurs d'estimation sur l'amplitudes des sources (Montcuquet, 2011). Une deuxième famille dite de séparation de sources aveugle consiste à caractériser un système grâce à la séparation des données de sortie de celui-ci (Comon, 2010). Nous allons étudier ces deux familles pour la résolution de notre problème.

Le problème de séparation de sources peut être formulé sous la forme d'une factorisation de matrices comme :

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{SA} + \boldsymbol{E} \qquad \text{(II-2-6)}$$

Connaissant le jeu de données $\boldsymbol{G} = [\boldsymbol{g}_1, \boldsymbol{g}_2, \dots, \boldsymbol{g}_k, \dots, \boldsymbol{g}_{N_z}] \in \mathbb{R}^{N_f \times N_z}$, le but est d'estimer $\boldsymbol{S} \in \mathbb{R}^{N_f \times P}$ contenant les différentes sources et $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{P \times N_z}$ représentant la matrice de mélange (Figure 32). Le bruit de mesure $\boldsymbol{E} \in \mathbb{R}^{N_f \times N_z}$ est supposé négligeable. Chaque colonne k de la matrice $\boldsymbol{G}$ (i.e. un

spectre Brillouin $\boldsymbol{g_k}$) est le résultat d'une combinaison linéaire de spectres de la matrice $\boldsymbol{S}$ pondérés par les poids contenus dans le vecteur $\boldsymbol{a}_k$:

$$\boldsymbol{g}_k = a_{k,1} \times \boldsymbol{s}_1 + \cdots + a_{k,P} \times \boldsymbol{s}_P \qquad k \in (1, N_z) \qquad \text{(II-2-7)}$$

Le nombre de sources P est inconnu, et peut être plus petit, égal ou plus grand que le nombre de mesures.

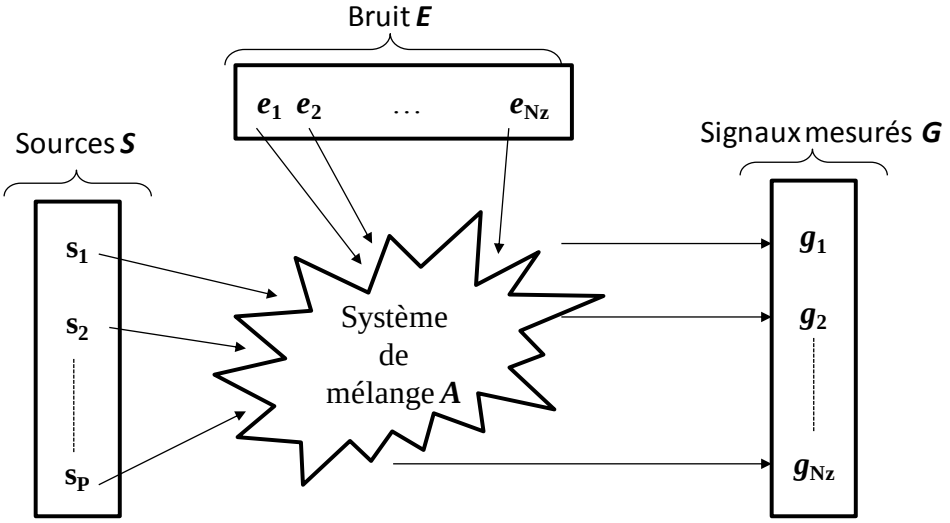


Figure 32 : Illustration du problème de séparation de sources aveugle d'après Montcuquet (2011).

La littérature étant vaste dans le domaine de la séparation de sources, où il existe plusieurs références et auteurs faisant autorité, un bon point d'entrée consistera à se renseigner sur les articles et revues des auteurs suivants (Comon, 2010). Pour résoudre le problème donné, la Décomposition en Valeurs Singulieres (SVD pour Singular Value Decomposition) (qui peut être liée à l'analyse en composante principale (PCA pour Principal Component Analysis)) (Comon, 1994) est largement utilisée actuellement. Cette méthode, très connue et efficace pour de nombreuses applications, présente l'inconvénient d'imposer une contrainte d'orthogonalité entre les sources. Dans notre domaine d'application, ne pas prendre en compte la contrainte de positivité sur les spectres remet en cause l'interprétation de la solution de la séparation de sources. Elle n'est donc pas adaptée à notre problème.

Comme la positivité est un *a priori* fort, nous nous intéressons à la décomposition en sources non négatives. Appliquées dans le domaine de la spectroscopie, proche de notre problématique, plusieurs algorithmes sont disponibles comme : la décomposition bayésienne de sources positives (Moussaoui, 2005 ; Mazet, 2011), la factorisation en Matrice Non-négatives (FMN) (Lee, 1999 ; Cichocki, 2002 ; Hoyer, 2004 ; Montcuquet, 2011), etc. Dans des domaines divers tels que de l'imagerie, par exemple pour une application de reconstruction faciale (Buciu, 2004) ou de la musique (Févotte, 2009), elles sont également utilisées.

Nous décrivons ici rapidement la décomposition bayésienne permettant de décrire le spectre observé comme une combinaison linéaire de spectres sources, équivalents aux sources de formes inconnues (de type gaussien la plupart du temps (Moussaoui, 2005 ; Mazet, 2011)). Comme il existe une infinité de solutions, des *a priori* sur les sources et les coefficients de mélange doivent être imposés, notamment l'indépendance statistique entre les sources et leur non-négativité. Le processus de type markovien et un échantillonneur de Gibbs permettent d'estimer le maximum *a posteriori* entre le spectre mesuré et

modélisé. Cette méthode présentant des inconvénients d'implémentation et un temps de convergence assez important (de l'ordre de plusieurs minutes voire heures avant la convergence selon la taille des données et l'initialisation du processus) ne sera donc pas développée.

Nous nous focaliserons donc sur d'autres méthodes et nous aborderons notamment la factorisation en matrices non négatives (FMN), et l'approche des Moindres Carrés non négatifs (MCN).

II.2.2.2. Décomposition en matrices positives

II.2.2.2.1. Factorisation en matrices non négatives avec parcimonie

Dans le domaine de la spectroscopie, la propriété de positivité des spectres permet d'appliquer la factorisation en matrices non négatives (FMN). Les matrices non-négatives sont des matrices avec tous leurs coefficients positifs ou nuls. Appliquée à notre problème, la FMN s'énonce de la manière suivante :

Etant donné une matrice de spectres Brillouin non-négative $\boldsymbol{G} \in \mathbb{R}^{Nf \times Nz}$, les matrices non négatives $\boldsymbol{S} \in \mathbb{R}^{Nf \times P}$ et $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{P \times Nz}$ sont estimables telles que :

$$\boldsymbol{G} \cong \boldsymbol{SA} \qquad \text{(II-2-8)}$$

Minimisation de la fonction de coût

Pour obtenir le couple ***(A, S)***, il faut minimiser une fonction de coût ***C*** en respectant les contraintes de positivité du problème :

$$\boldsymbol{C} = \|\boldsymbol{G} - \boldsymbol{SA}\|_2^2 \qquad \text{(II-2-9)}$$

En 2001, pour résoudre ce problème, Lee et Seung proposent des lois itératives permettant d'allier convergence et facilité d'implémentation (Lee, 2001). Pour ces raisons, cet algorithme a été largement utilisé depuis pour des applications en spectroscopie de fluorescence (Gobinet, 2008) et pour de la détection de cellules cancéreuses (Montcuquet, 2011). Nous présentons l'algorithme de FMN tel qu'il est classiquement utilisé :

Algorithme classique de FMN :

1. Initialisation des matrices ***A*** et ***S*** avec des coefficients positifs.
2. Mis à jour de $\boldsymbol{S}$ **:** $\boldsymbol{S} \leftarrow \boldsymbol{S}\frac{(\boldsymbol{GA^t})}{\boldsymbol{SAA^t}}$
3. Mis à jour de $\boldsymbol{A}$ **:** $\boldsymbol{A} \leftarrow \boldsymbol{A}\frac{(\boldsymbol{S^tG})}{\boldsymbol{S^tSA}}$
4. Réitérer les étapes 2 et 3 jusqu'à une erreur minimale de reconstruction ou un nombre d'itérations suffisants (déterminé empiriquement).

Il a été montré que la fonction de coût ***C*** est non convexe et donc qu'il existe des minima locaux de la fonction ; il y a donc non unicité des matrices ***A*** et ***S*** par la décomposition FMN (Moussaoui, 2009). L'inconvénient majeur de cet algorithme est donc qu'il existe une infinité de factorisations de la matrice ***G*** de départ. La seule contrainte de positivité des coefficients n'est donc pas suffisante pour restreindre le champ de solutions. L'ajout d'*a priori* sur la forme des sources et le nombre de sources

permet de contraindre la fonction de coût et donc de résoudre le problème de façon unique (Cichocki, 2002).
Dans sa thèse, Montcuquet (2011) montre que l'initialisation de la matrice des sources proches des sources attendues permet de converger vers une solution des sources plus rapidement et d'avoir une meilleure précision des amplitudes associées.

Discussion sur la construction de la matrice des sources ***S***

Pour un z_k fixé, le spectre Brillouin mesuré $\boldsymbol{g_k(v)}$ est une combinaison linéaire de spectres élémentaires dont la forme correspond à $\boldsymbol{s_e(v)}$ (cf. Eq. (II-2-1)). La forme est estimée grâce à un dispositif expérimental : le spectre $\boldsymbol{s_e(v)}$ est évalué dans une zone de la fibre où la déformation est supposée uniforme. Nous proposons alors de construire $\boldsymbol{S}$ comme un dictionnaire de P sources $\boldsymbol{S} = \{\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_2, \dots, \boldsymbol{s}_P\}$. Les atomes de ce dictionnaire correspondent aux spectres élémentaires centrés sur les fréquences $\boldsymbol{v_B}$, tel que $\boldsymbol{s}_i = \boldsymbol{s}_e(\boldsymbol{v} - v_{Bi})$, et $\boldsymbol{v_B} = v_{B1}, \dots, v_{BP}$ avec un pas entre les fréquences Brillouin de Δv_B, comme illustré sur la Figure 33. Les fréquences $\boldsymbol{v_B}$ sont choisies pour couvrir le support fréquentiel des spectres Brillouin $\boldsymbol{G}$. Parmi ces P sources, il s'agit de trouver la combinaison optimale de sources pour décrire le spectre Brillouin $\boldsymbol{g}_k$. Pour garder la forme des spectres Brillouin proche de $\boldsymbol{s_e(v)}$ nous appliquons un critère de forme sur la matrice S.

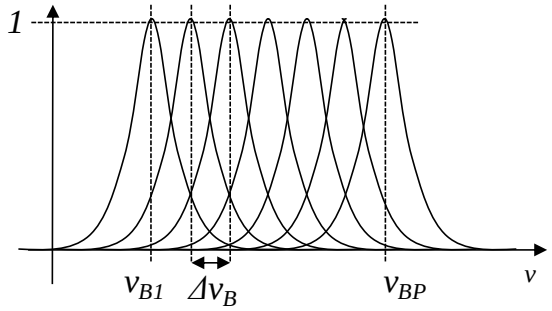


Figure 33: Illustration de la matrice des sources $\boldsymbol{S}$ composée des spectres $\boldsymbol{s_e(v)}$ centrés en P fréquences Brillouin séparés d'un pas en fréquence Δv_B.

Critère de forme sur les sources ***S***

Montcuquet (2011) a proposé une nouvelle loi de mise à jour de $\boldsymbol{S}$:

$$\boldsymbol{S} \leftarrow \boldsymbol{S}\frac{(\boldsymbol{G}\boldsymbol{A}^t + \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{S_0})}{\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^t + \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{S}} \qquad \text{(II-2-10)}$$

Le vecteur de régularisation $\boldsymbol{\alpha}$ est de taille P, à savoir le nombre de sources dans le dictionnaire. Les valeurs de $\boldsymbol{\alpha}$ peuvent varier d'une source à l'autre, mais dans notre application nous les laisserons constantes puisque la forme du spectre élémentaire est unique. Plus α_i et proche de 1, plus la contrainte sur la forme est importante et donc la solution est proche de l'initialisation. Le réglage de ce paramètre est possible grâce à la méthode de *L-curve* (Hansen, 1994). Néanmoins, en pratique, nous supposerons que la forme estimée est assez proche de $\boldsymbol{s_e(v)}$ et le coefficient sera un indicateur de confiance dans les connaissances *a priori* des spectres élémentaires. Comparé aux autres algorithmes régularisés de la littérature (Berry, 2007), cet algorithme permet de ne pas borner les valeurs de $\boldsymbol{\alpha}$ pour assurer sa convergence.

Nous avons donc P sources possibles pour décrire les composantes spectrales du spectre Brillouin correspondant. Dans le cas idéal où le spectre n'est pas distordu, un seul élément de la matrice de

sources suffit à décrire totalement le spectre mesuré. Dans le cas où le spectre est distordu, nous devons aborder les problématiques de sélection des sources et de parcimonie. Parmi les P sources, nous voulons estimer le nombre d'atomes exact $P_k < P$ contenus dans chaque spectre, dont les amplitudes $\boldsymbol{a_k}$ sont strictement positives. Nous notons les fréquences Brillouin associées $\boldsymbol{v_{Bk}}$.

Critère de parcimonie

Nous nous intéressons ici à la sélection des sources en optimisant leurs poids contenus dans $\boldsymbol{A}$ afin d'obtenir peu de coefficients non-nuls. Montcuquet *et al.* (Montcuquet, 2011) utilisent cette technique pour extraire les informations sur les tumeurs dans les images de fluorescences. Nous allons l'utiliser dans notre domaine d'application.

Considérons la matrice de poids $\boldsymbol{A}$ de taille $P \times Nz$. La parcimonie d'une colonne $k \in \{1, \dots, Nz\}$ est définie par Hoyer *et al.* (Hoyer, 2004) par :

$$spa(\boldsymbol{a_k}) = \frac{\sqrt{P} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{P} |a_{i,k}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{P} a_{i,k}^2}}\right)}{\sqrt{P} - 1} \qquad \text{(II-2-11)}$$

La valeur du critère de parcimonie de la colonne $spa(\boldsymbol{a_k})$ est comprise entre 1 et 0 respectivement pour une sélection plus ou moins grande des composantes du spectre. Ce critère peut être défini empiriquement par l'utilisateur. Dans notre cas, il est possible de relier le nombre de composantes non nulles et la distorsion du spectre. Les paramètres de détection R_A et R_B permettent d'assurer ce lien (cf. II-1-4) : plus le spectre sera élargi, plus le nombre de composantes non nulles P sera important.

A partir de cette hypothèse, nous définissons un critère de parcimonie empirique $\widetilde{spa}(\boldsymbol{a})$ basé sur les paramètres de forme. Nous choisissons alors de le rendre proportionnel à l'évolution des coefficients d'élargissement et d'asymétrie du spectre, $\boldsymbol{R_A(z)}$ et $\boldsymbol{R_B(z)}$, à un coefficient près θ qui est à fixer empiriquement selon les cas d'application.

$$\widetilde{spa}(\boldsymbol{a_k}) = 1 - \theta \times (R_{B_k} + R_{A_k}) \qquad \text{(II-2-12)}$$

En minimisant l'erreur entre le critère définit par l'équation (II-2-11) et celui empirique, il est possible de trouver le nombre de coefficients non nuls dans la colonne k et donc d'en optimiser les poids associés.

Algorithme FMN avec contrainte de parcimonie sur la forme des sources:

1. Initialisation de la matrice $\boldsymbol{A}$ avec des coefficients positifs et de la matrice $\boldsymbol{S}$ par $\boldsymbol{S_o}$
2. Choix de $\boldsymbol{\alpha}$ en fonction de la confiance en l'estimation de la source mesurée
3. Mis à jour de $\boldsymbol{S}$: $\boldsymbol{S} \leftarrow \boldsymbol{S}\frac{(\boldsymbol{GA^t} + \boldsymbol{\alpha S_0})}{\boldsymbol{SAA^t} + \boldsymbol{\alpha S}}$
4. Mis à jour de $\boldsymbol{A}$: $\boldsymbol{A} \leftarrow \boldsymbol{A}\frac{(\boldsymbol{S^t G})}{\boldsymbol{S^t SA}}$
5. Pour chaque colonne k de la matrice $\boldsymbol{A}$, une valeur de parcimonie est souhaitée $\widetilde{spa}(\boldsymbol{a_k})$:
   Pour chaque source $i \in \{1, \dots, P\}$, les valeurs de $\boldsymbol{a_k}$ sont modifiées en $\widetilde{\boldsymbol{a_k}}$ telles qu'elles remplissent la condition :

$$\tilde{a}_{i,k} = \begin{cases} a_{i,k} \; si \; a_{i,k} \geq \frac{\max(\boldsymbol{a_k})}{\gamma_k} \\ 0 \; sinon \end{cases},$$

avec :

$$\gamma_k = \underset{\gamma_k}{\operatorname{argmin}} |spa(\boldsymbol{a}_k) - \widetilde{spa}(\boldsymbol{a}_k)|$$

6. Réitérer les étapes 3 à 5 jusqu'à une erreur minimale de reconstruction ou un nombre d'itérations suffisants (déterminé empiriquement).

Illustration de la parcimonie

Nous considérons l'exemple de la Figure 31. a. On suppose que le dictionnaire $\boldsymbol{S_0}$ de spectres a été construit avec le spectre élémentaire $\boldsymbol{s_e(v)}$ estimé au préalable. L'algorithme FMN est appliqué sur le spectre de la Figure 31. a. avec le dictionnaire $\boldsymbol{S}$ avec différentes valeurs de parcimonie *spa* allant de 0.5 à 0.9. Le vecteur d'amplitude $\boldsymbol{a}_k$ est donc estimé. Notons les coefficients $a_{j,k}$, avec j inclus dans l'espace des indices strictement positifs. Ils permettent de déterminer la position des fréquences Brillouin $\boldsymbol{v_{Bj}}$ contenues dans le spectre (Figure 34). Plus le critère de parcimonie augmente (proche de 1), plus P_k est proche de 1. Dans notre exemple, ce critère amène à choisir $P_k = 3$ (Figure 34 .b). En comparant à l'histogramme des fréquences Brillouin théorique (en rouge dans la Figure 34), nous pouvons savoir si cet algorithme est optimal pour l'estimation des couples ($\boldsymbol{a_k}$, $\boldsymbol{v_{Bk}}$).

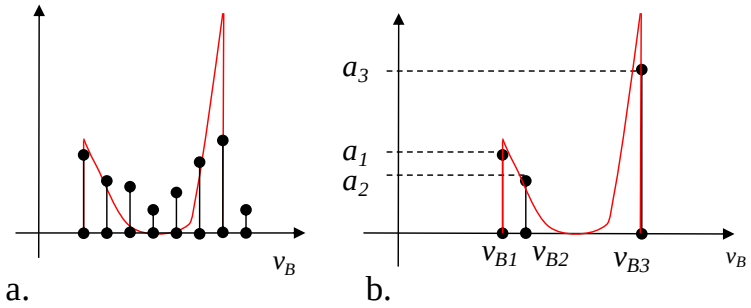


Figure 34 : Illustration de l'estimation des amplitudes strictement positives $\boldsymbol{a_k}$ par la FMN sur le spectre de la Figure 31. a. avec : (a) un critère de parcimonie de 0.5, ce qui implique $P_k = 8$; (b) un critère de parcimonie de 0.95, ce qui donne $P_k = 3$. En rouge, pour les deux images, l'histogramme théorique des fréquences Brillouin au sein de *w*.

En termes d'automatisation pour les futures applications industrielles, cet algorithme présente des inconvénients sur le nombre de paramètres à fixer (α, θ et le nombre d'itérations) pour estimer précisément des matrices $\boldsymbol{A}$ et $\boldsymbol{S}$, ainsi que sur le temps de calcul qui augmente avec le nombre de spectres à séparer. Nous allons donc proposer une autre technique de séparation de spectres basée sur la méthode des moindres carrés qui permet d'avoir moins de paramètres à évaluer. Nous comparerons leurs performances sur des données simulées, puis réelles.

II.2.2.2.2. Méthode des Moindres Carrés à coefficients positifs

La méthode des Moindres Carrés à coefficients non Négatifs (MCN) est souvent utilisée dans le domaine de la spectroscopie (Lupulescu, 2014 ; Huang, 2013 ; Pu, 2012 ; Wei, 2009) où il est question de l'utilisation d'un dictionnaire de différentes sources. En projetant le dictionnaire sur le spectre

mesuré, il est possible de déterminer un poids sur chacun des éléments du dictionnaire. Nous allons l'appliquer dans notre cas.
Pour ce faire, partons du dictionnaire de P sources défini plus haut $\boldsymbol{S} = \boldsymbol{S_0}$. Pour un k fixé, le spectre Brillouin $\boldsymbol{g_k}$ s'écrit comme la somme de sources contenues dans $\boldsymbol{S}$ pondérées par le vecteur $\boldsymbol{a_k} \in \mathbb{R}^{P\times 1}$:

$$\boldsymbol{g_k} \cong \boldsymbol{S}\boldsymbol{a_k} + \boldsymbol{\epsilon}, \text{avec } \boldsymbol{a_k} \geq 0, \qquad \text{(II-2-13)}$$

où $\boldsymbol{\epsilon}$ est l'erreur entre le spectre mesuré et modélisé. En minimisant cette erreur, il est possible d'optimiser le vecteur de poids avec la contrainte que ceux-là soient positifs ou nuls et donc de définir la fonction de coût à minimiser :

$$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{a_k}) = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{g_k} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{a_k}\|_2^2 \ \ avec\ \boldsymbol{a_k} \geq 0 \qquad \text{(II-2-14)}$$

Pour résoudre ce problème d'optimisation sous contraintes linéaires, l'utilisation des conditions de Kuhn-Tucker implique d'écrire la fonction de Lagrange liée à notre problème (Lawson & Hanson, 1974). :

$$\boldsymbol{L}(\boldsymbol{a}_k, \lambda) = \boldsymbol{c}(\boldsymbol{a}_k) + \boldsymbol{\lambda^t}\boldsymbol{a}_k, \text{ avec } \boldsymbol{\lambda} \geq 0 \qquad \text{(II-2-15)}$$

où λ est le multiplicateur de Lagrange et $\boldsymbol{a_k} \geq 0$, la contrainte d'optimisation. Afin de trouver le minimum à cette fonction et donc la solution $\boldsymbol{a_k}$ optimale, son gradient est calculé :

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}(\boldsymbol{a}_k, \lambda)}{\partial \boldsymbol{a}_{k,}} = -\boldsymbol{S^T}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{a_k} - \boldsymbol{g_k}) + \boldsymbol{\lambda} \qquad \text{(II-2-16)}$$

et donc,

$$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{S^T}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{a_k} - \boldsymbol{g_k}) \geq 0 \qquad \text{(II-2-17. a.)}$$

$$\boldsymbol{\lambda^T}\boldsymbol{a_k} = 0 \qquad \text{(II-2-17. b.)}$$

Ce principe peut être implémenté grâce à l'algorithme des « active set » (Lawson et Hanson, 1974) : on introduit deux espaces d'indices, également appelés « set ». Le premier est passif, noté $\wp$, et contient les indices pour lesquels les poids associés sont strictement positifs. Le deuxième set est actif, noté R, dans lequel sont placés les indices restants. Si R correspond à l'ensemble vide, alors le problème est résolu et tous les coefficients de $\boldsymbol{a_k}$ sont positifs.

L'initialisation de l'algorithme met tous les coefficients de $\boldsymbol{a_k}$ nuls. Le multiplicateur de Lagrange $\boldsymbol{\lambda}$ est calculé. L'indice où le gradient est maximum est enlevé de R pour l'inclure dans le set passif. Un coefficient de régression intermédiaire $\boldsymbol{d}^{\wp}$ est trouvé qu'avec les coefficients indicés dans l'espace $\wp$. Il est possible d'avoir des coefficients négatifs dans cet espace : la boucle intermédiaire (étape 3) permet de mettre à jour la valeur de ces coefficients. L'intérêt de cette boucle est de pouvoir trouver un α optimal pour lequel un ou plusieurs poids deviennent nuls (donc leurs indices doivent être enlevés de $\wp$). C'est pourquoi les indices sont optimaux et, par conséquent, les positions des sources aussi. Finalement, l'algorithme converge vers des poids et indices optimaux après un nombre fini d'itérations des boucles principale et intermédiaire (Lawson et Hanson, 1974).

Algorithme de l' « active set » :

1. *Initialisation :*

$\wp = \emptyset$ (set passif)

$R = \{1, .., N\}$ (set actif)

$\boldsymbol{a_k} = \boldsymbol{0}$

$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{S^T}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{a_k} - \boldsymbol{g_k})$

2. *Boucle principale :*

Si $R \neq \emptyset$, alors on trouve l'indice $m = arg \max_{n \in R} \lambda_n$

Mises à jour : $m \notin R \; et \; m \in \wp$

Les coefficients intermédiaires sont alors : $\boldsymbol{d}^{\wp} = [(\boldsymbol{S}^{\wp})^T \boldsymbol{S}^{\wp}]^{-1} (\boldsymbol{S}^{\wp})^T \boldsymbol{a_k}$

3. *Boucle intermédiaire : (si des coefficients de $\boldsymbol{d}^{\wp}$ sont négatifs)*

Si $min(\boldsymbol{d}^{\wp}) \leq 0$, alors on calcule le coefficient :

$$\alpha = -\min_{n \in \wp} \frac{a_{n,k}}{a_{n,k} - d_n}$$

On met à jour les coefficients de $\boldsymbol{a}$ tel que :

$\boldsymbol{a_k} = \boldsymbol{a_k} + \alpha(\boldsymbol{d} - \boldsymbol{a_k})$ et les espaces R et $\wp$ et $\boldsymbol{d}^{\wp}$ est recalculé avec les nouvelles valeurs de $\boldsymbol{a}$ alors que $\boldsymbol{d}^R = 0$.

Fin de la boucle intermédiaire

$\boldsymbol{a_k} = \boldsymbol{d}$

$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{S^T}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{a_k} - \boldsymbol{g_k})$

Fin de l'algorithme

Dans la mesure où la dimension du dictionnaire est grande, l'algorithme va permettre de sélectionner de manière automatique la solution permettant de décrire le mieux possible le spectre Brillouin. En réitérant l'algorithme sur tous les spectres Brillouin de la matrice $\boldsymbol{G}$, nous obtenons une matrice d'amplitude en fonction des fréquences Brillouin des composantes du dictionnaire. En fonction de la taille du dictionnaire et de la matrice $\boldsymbol{G}$, le temps de calcul peut être de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.

Cet algorithme a été amélioré pour diminuer le temps de calcul en effectuant les mêmes étapes décrites ci-dessus simultanément sur toutes les colonnes de la matrice $\boldsymbol{G}$ (FastNNLS, développé par Bro (1997)). Il reste basé sur le même principe des « active set » mais généralisé sur les matrices et non plus sur les vecteurs. Il en résulte une matrice $\boldsymbol{A(v_B,z)}$, contenant les valeurs des amplitudes pour chaque position z_k, et les fréquences Brillouin possibles v_B. Cela permet de réduire le temps de calcul de la minute à la seconde. Les tailles de la matrice à décomposer et du dictionnaire ne l'influencent que très peu (Bro, 1997 ; Chen, 2009). Nous l'utiliserons dans la suite et le comparerons sur des données simulées et réelles à l'algorithme de la FMN.

II.2.2.2.3. Méthodes de reconstruction

L'étape de séparation de spectres nous a permis de déterminer le nombre de composantes spectrales strictement positives, P_k, les amplitudes $\boldsymbol{a_k}$ et les fréquences associées $\boldsymbol{v_{Bk}}$ pour chaque spectre Brillouin $\boldsymbol{g_k}$ de la matrice $\boldsymbol{G}$ fournie par l'interrogateur B-OTDA. Comme nous l'avons vu précédemment, il est possible de relier l'amplitude des composantes à une portion de w et donc d'estimer un profil de fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$ en fonction d'un nouveau pas de mesure.

Nous proposons deux méthodes de reconstruction : la première, que nous avons développée, est basée sur l'interprétation empirique de la relation entre les amplitudes et les portions de fréquences Brillouin dans *w* ; la deuxième est une méthode statistique (Dobigeon, 2007) proposant une solution parmi une infinité de possibilités selon des *a priori* sur le profil de fréquences Brillouin.

II.2.2.2.4. Reconstruction empirique

Lors de la mesure des spectres Brillouin sur la longueur à ausculter, le pas de mesure de l'appareil Δz peut se régler pour qu'une redondance spatiale entre les bases de mesure *w* existe. De cette manière, pour un événement de quelques centimètres sur la fibre, plusieurs spectres vont en être affectés (selon la valeur des paramètres *w* et Δz). A partir de l'information contenue dans trois spectres successifs centrés en z_{k+1}, z_k, et z_{k-1}, nous allons alors estimer le profil de fréquences Brillouin au sein de w_k.

Dans un premier temps, la moyenne des fréquences Brillouin locales contenues dans un spectre, notée $\overline{v_{Bk}}$, est calculée par :

$$\overline{v_{Bk}} = 1/P_k . \sum_{i=1}^{P_k} v_{Bi,k} \qquad \text{(II-2-18)}$$

Une tendance globale du profil de fréquence Brillouin est révélée en comparant cette moyenne avec les voisins proches centrés en z_{k+1} et z_{k-1}. Six scénarii simples (Tableau 10) ont été définis pouvant décrire le profil de fréquence au sein de la base de mesure *w* (Buchoud, 2013) et des tendances locales peuvent être alors déduites. Par exemple, si les fréquences moyennes trouvées en z_{k+1} et z_{k-1} sont inférieures à celle en z_k, alors il peut y avoir un maximum local dans le segment *w* centré en z_k. Les différentes tendances sont décrites dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Tendances de l'évolution du profil de fréquences Brillouin en fonction de la comparaison des moyennes des fréquences locales.

Cas	Comparaison des fréquences	Tendance globale	Tendance locale
1	$\bar{v}_{Bk-1} < \bar{v}_{Bk} < \bar{v}_{Bk+1}$	↗	-
2	$\bar{v}_{Bk-1} > \bar{v}_{Bk} > \bar{v}_{Bk+1}$	↘	-
3	$\bar{v}_{Bk} > \bar{v}_{Bk-1} > \bar{v}_{Bk+1}$	↗↘	Maximum local
4	$\bar{v}_{Bk} > \bar{v}_{Bk+1} > \bar{v}_{Bk-1}$		
5	$\bar{v}_{Bk-1} > \bar{v}_{Bk+1} > \bar{v}_{Bk}$	↘↗	Minimum local
6	$\bar{v}_{Bk+1} > \bar{v}_{Bk-1} > \bar{v}_{Bk}$		

A partir de ces hypothèses, il est possible d'ordonner les portions $\boldsymbol{d_k}$ associées aux fréquences locales $\boldsymbol{v_{Bk}}$ dans *w*. Pour simplifier l'algorithme et les possibilités de placement des portions, nous prenons le partie de ne pas diviser les portions $\boldsymbol{d_k}$. Pour illustrer la méthode de disposition des segments (Figure 35), nous prenons l'exemple précédent illustrant le cas 3 du Tableau 10 et correspondant à la Figure 31. c. ou un maximum local existe au sein de *w*.

Trois spectres successifs (z_{k+1}, z_k, et z_{k-1}) ont été décomposés par une des méthodes de séparation de sources. Il a été ainsi possible d'estimer les amplitudes en fonction de la fréquence Brillouin et le nombre de composantes spectrales pour chaque spectre. Le résultat est affiché sur les Figure 35. a-c. Les moyennes des fréquences Brillouin contenues dans les spectres situés à z_{k-1} et à z_{k+1} sont inférieures à celle en z_k. Un maximum local est donc présent au sein de *w* centré en z_k.

A z_{k-1} les portions $\boldsymbol{d_{k-1}}$ sont donc disposées de manière à ce que les fréquences Brillouin soient croissantes au sein de w (Figure 35. d.). Ceci est dû au fait que l'analyse du segment z_{k-1} montre qu'il peut être classé dans le cas 1. Ensuite à z_k, puisqu'il y a maximum local atteignant la valeur de v_{B3}, il reste à placer le segment d_3 correspondant. Sachant que $\overline{v_{Bk-1}} > \overline{v_{Bk+1}}$, la fréquence Brillouin sur la section allant de $z_k + w/2$ à $z_k + w/2 + d_1$ vaut v_{B1}. Ensuite sur la distance de $z_k + w/2 + d_1$ à $z_k + w/2 + d_2$ la fréquence Brillouin est égale à v_{B2}. Et enfin sur le reste de la base de mesure, elle est supposée égale à v_{B1}.

Ce processus est réitéré pour tous les spectres acquis sur la longueur d'auscultation, c.-à-d. à toutes les positions z_k. Le fait que les bases de mesure w se recouvrent spatialement induit la superposition des segments dont les fréquences Brillouin diffèrent. Nous définissons alors une fenêtre glissante sans recouvrement spatial de largeur Δx sur laquelle la moyenne des fréquences Brillouin est calculée telle que :

$$\boldsymbol{v_B(x)} = \frac{1}{Q} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ x \in \Delta x}}^{Q} \boldsymbol{v_{Bk}(x)} \,, \qquad \text{(II-2-19)}$$

avec Q est le nombre de fréquences Brillouin locales contenues dans la fenêtre. Le pas Δx est alors le nouveau pas de mesure réglé par l'utilisateur. Cela permet d'estimer un profil de fréquence Brillouin à résolution centimétrique, objectif que nous nous étions fixés (Figure 35. e.).

Cet algorithme de reconstruction a l'avantage d'être très peu coûteux en temps de calcul et de fournir une estimation rapide du profil de fréquence Brillouin en fonction du nouveau pas de mesure. Mais, comme nous nous sommes restreints à seulement 6 cas de profils locaux, une limite sera clairement atteinte lorsqu'il y aura plusieurs maxima ou minima locaux au sein de la base de mesure.

Nous nous sommes également restreints à un ordonnancement des segments qui s'effectue dans le sens croissant des k. Cela peut induire une propagation d'erreurs. Une solution pour l'amélioration de cet algorithme est de réaliser l'ordonnancement avec des k croissants, puis décroissants pour ensuite moyenner les deux estimations. Nous pourrions également diviser les portions $d_{i,k}$ en portions élémentaires Δx afin d'essayer d'approcher le profil de fréquences Brillouin plus précisément. Comme les scénarii proposés ne recouvrent pas assez les possibilités multiples d'agencement des segments, nous proposons une solution alternative basée sur une approche statistique permettant la reconstruction du profil.

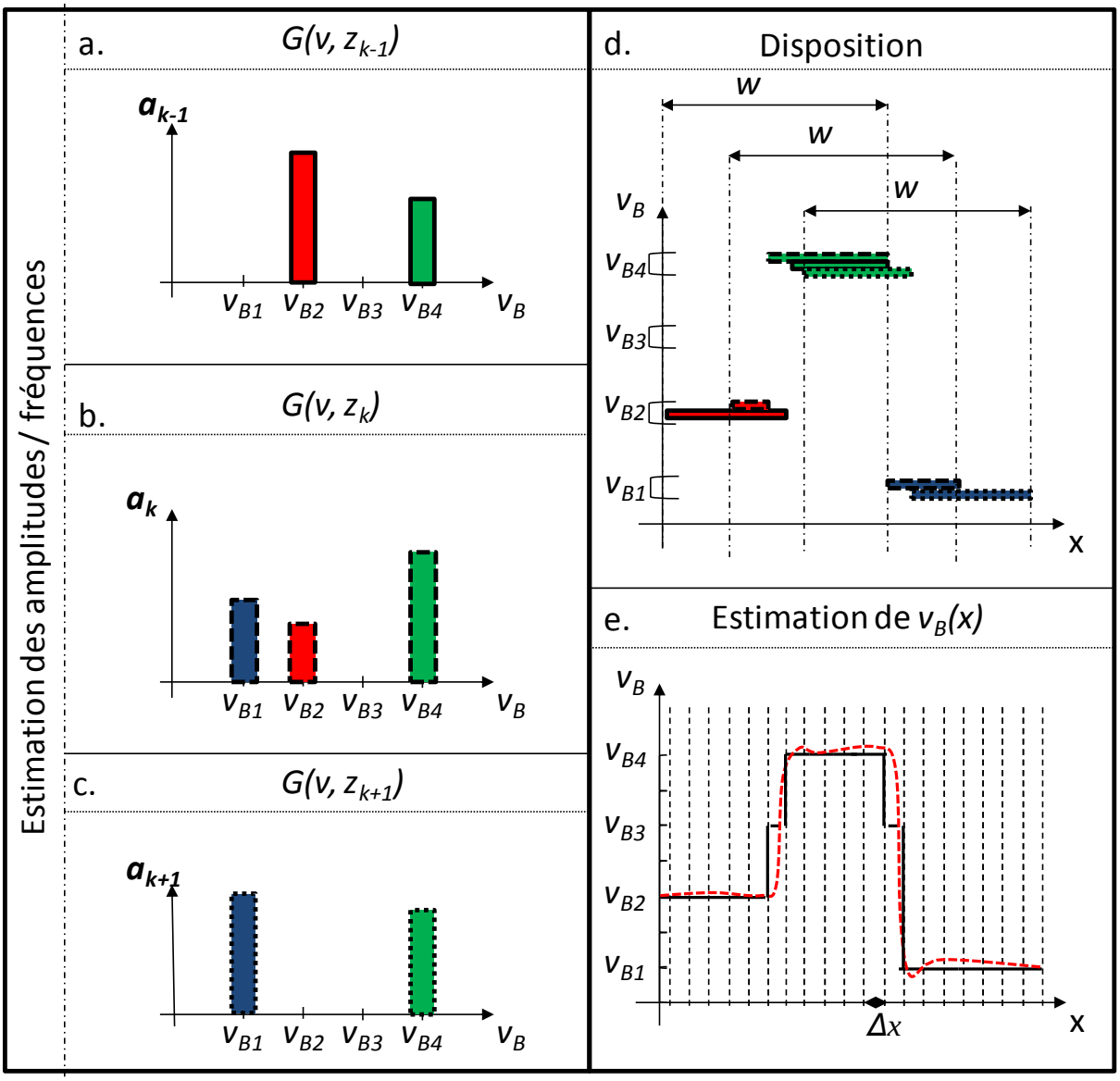


Figure 35 : Illustration de la méthode de reconstruction empirique : Décomposition des spectres (a) $G(v,z_{k-1})$; (b) $G(v,z_k)$; (c) $G(v,z_{k+1})$ grâce à une des méthodes de séparation de sources. d. Disposition des portions de w en fonction de la moyenne des amplitudes de chaque portion. Nous illustrons ici le cas 4 du Tableau 10 en ce qui concerne le segment centré en z_k. e. Estimation du profil de fréquences Brillouin $v_B(x)$ en fonction du nouveau pas de mesure fixé par l'utilisateur Δx. En rouge, le profil théorique de fréquences Brillouin qui a été utilisé pour construire la matrice des spectres $G(v,z)$.

II.2.2.2.5. Reconstruction statistique

Comme vu précédemment, il existe une infinité de solutions de profils de fréquences Brillouin en fonction de la distance pour les histogrammes estimés. Il est possible d'établir une solution statistiquement la plus probable pour un même jeu de données. Pour cela, l'inférence bayésienne constitue une solution dans le sens où il est possible de réviser la probabilité des profils possibles au fur et à mesure des observations. La probabilité d'un profil est donc interprétable comme le degré de confiance accordé à une hypothèse. En d'autres termes, si on connait dans le détail les causes possibles d'une conséquence observée et leurs probabilités, l'observation des effets permet de remonter aux causes.

L'analyse bayésienne d'un problème suppose 1) de choisir une loi de probabilité *a priori* pour les paramètres du modèle, 2) de poser la distribution des données conditionnelle aux paramètres (et donc la fonction de vraisemblance) et 3) de calculer la distribution *a posteriori* des paramètres grâce à la loi de Bayes.
Appliquée à notre problème, nous définissons les termes suivants :

- La loi *a posteriori* est la probabilité du profil de fréquence Brillouin sachant les données $\boldsymbol{G(v,z)}$: $p(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})|\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}))$
- La loi de vraisemblance qui est liée à la définition du modèle : $p(\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})|\boldsymbol{v_B}(x))$
- La loi *a priori* sur la solution : $p(\boldsymbol{v_B}(x))$

Le profil de fréquence Brillouin peut être estimé en maximisant la vraisemblance *a posteriori* :

$$p\big(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})\big|\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})\big) \propto p\big(\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z})\big|\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})\big).p(\boldsymbol{v_B}(x)) \qquad \text{(II-2-20)}$$

Notre cas équivaut à estimer un profil de fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B}$ observé par plusieurs capteurs dépendants spatialement et mesurant des spectres Brillouin. Les données représentent donc des morceaux des paramètres recherchés v_B sur le segment $x \in w$ (Figure 38). De par la redondance spatiale de l'appareil, chaque segment se doit d'être réinitialisé par les réalisations du segment précédent. Le recours à des techniques de construction de chaines de Markov permet de simuler des lois *a posteriori* : un tirage au sort d'échantillons représentant la loi recherchée est généré (dans notre cas d'application, $\boldsymbol{v_B}(x)$ est généré), puis accepté ou rejeté selon leurs adéquations aux données. Cet algorithme correspond à l'échantillonneur Métropolis-Hastings (Hastings, 1970) et est utilisé dans de nombreux domaines d'applications comme la restauration d'images (Dobigeon, 2007), pour la segmentation de signaux (Punskaya, 2002), ou plus récemment dans la reconstruction de génomes (Zucknick, 2014).

Un cas particulier de cette méthode est l'échantillonneur de Gibbs (Geman, 1984) qui rend possible la génération de N_x composantes du vecteur $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x_l})$, tel que $l = \{1, \dots, N_x\}$, et avec $N_x = L / \Delta x$ (Figure 36), où Δx est le nouveau pas de mesure fixé par l'utilisateur et L est la longueur sensible de la fibre optique.

Notons $\boldsymbol{\pi_l}$, l'espace des valeurs possibles pour la fréquence Brillouin à un endroit x_l. Grâce aux algorithmes de séparation de source, cet espace est restreint aux valeurs $\boldsymbol{v_{Bk}}$ contenues dans les spectres à une distance z_k correspondant à la base de mesure w_k. Ces notations sont adoptées seulement dans ce paragraphe pour simplifier les explications : w_k regroupe les x compris entre $z_k - w/2$ et $z_k + w/2$. Par exemple, pour l fixé, $x_l \subset \{w_{k-1}, w_k, w_{k+1}\}$, cet espace est réduit aux fréquences Brillouin composant le spectre Brillouin (i.e. pour lesquelles les amplitudes sont strictement positives après l'étape de séparation de source) contenues dans les spectres adjacents $\boldsymbol{v_{Bk}}$, $\boldsymbol{v_{Bk-1}}$ et $\boldsymbol{v_{Bk+1}}$. Ces notions sont illustrées sur la Figure 36.

Pour une itération p de l'algorithme, un vecteur $\boldsymbol{v_B}^{\boldsymbol{p}}(\boldsymbol{x})$ est donc généré : Pour chaque x du vecteur $\boldsymbol{v_B}^{\boldsymbol{p}}(\boldsymbol{x})$, une valeur est tirée aléatoirement parmi $\boldsymbol{\pi_l}$ (selon une loi uniforme). Après chaque tirage, l'espace des valeurs probables est remis à jour. Un processus de pénalisation est alors introduit pour sélectionner les profils de fréquences Brillouin peu bruités. Pour cela, on calcule les écarts e_i entre les fréquences adjacentes.

Notons l'écart moyen e^p pour la réalisation p. Nous pouvons identifier les indices i pour lesquels $e_i > e^p$. Les valeurs ${v_B}^{p+1}(x_i)$ sont alors ré-estimées tant que l'écart moyen ne soit inférieur à l'écart

moyen du processus précédent. Enfin, l'adéquation aux données est calculée par l'erreur quadratique ξ entre les données et les données estimées $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{v_B}^{\boldsymbol{p+1}}(\boldsymbol{x}))$, avec $\boldsymbol{H}(.)$ définie dans l'équation (II-2-4).

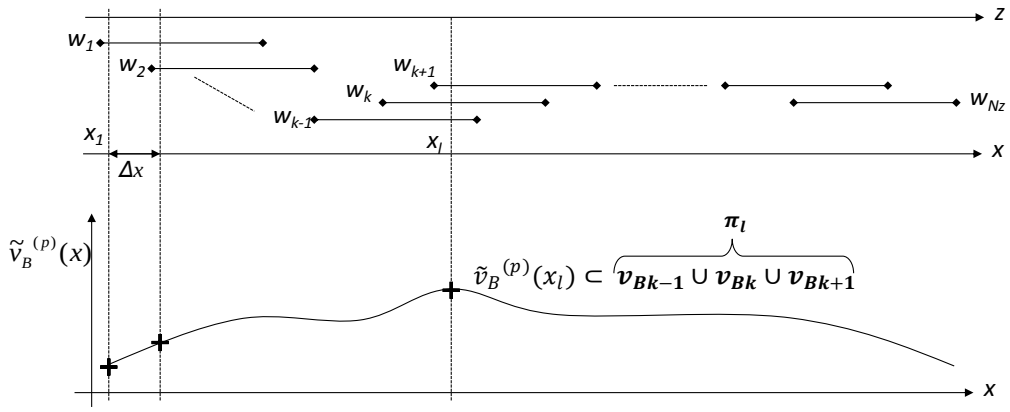


Figure 36 : Construction de l'espace des solutions possibles $\boldsymbol{\pi_l}$ pour le vecteur de fréquences Brillouin locales à une distance x_l.

La convergence de l'algorithme est assurée si le nombre d'itérations est suffisant. Dans certains problèmes, la convergence peut être lente et un critère d'arrêt pourra être utilisé, par exemple une erreur minimale.

Les différentes étapes de l'algorithme sont résumées ci-dessous :

<u>Algorithme d'échantillonnage de Gibbs avec pénalisation :</u>

1. Fixer p=0

2. - Générer $v_B^{p+1}(x_1)$ à partir de $\boldsymbol{\pi_1}\left(v_B(x_1)\middle|\widetilde{\boldsymbol{v_{B1}}}^{(p)}\right)$
   - Générer $v_B^{p+1}(x_2)$ à partir de $\boldsymbol{\pi_2}\left(v_B(x_2)\middle|\widetilde{\boldsymbol{v_{B1}}}^{(p+1)}, \widetilde{\boldsymbol{v_{B2}}}^{(p)}\right)$
   - …
   - Générer $v_B^{p+1}(x_l)$ à partir de $\boldsymbol{\pi_l}\left(v_B(x_l)\middle|\widetilde{\boldsymbol{v_{Bk-1}}}^{(p-1)}, \widetilde{\boldsymbol{v_{Bk}}}^{(p+1)}, \widetilde{\boldsymbol{v_{Bk+1}}}^{(p)}\right)$
   - …

3. Calculer l'écart entre les fréquences adjacentes. Trouver les indices i pour lesquels les écarts sont supérieurs à e^{p+1}, et régénérer des valeurs $v_B{}^{p+1}(x_i)$ tant que $e^{p+1} > e^p$

4. L'erreur quadratique moyenne ξ sur l'adéquation aux données est calculée :
   - $\xi^{p+1} = \left\|\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{z}) - \boldsymbol{H}(\boldsymbol{v_B}^{\boldsymbol{p+1}}(\boldsymbol{x}))\right\|_2^2$
   - $\begin{cases} \text{si } \xi^{p+1} < \xi^p, \text{alors } \widetilde{v_B}(x) = v_B{}^{p+1}(x) \\ \text{sinon } p = p+1 \text{ et retourner à l'etape 2} \end{cases}$

5. Le critère d'arrêt de l'algorithme peut être sur le nombre d'itérations, ou une erreur d'adéquation aux données minimale.

La solution trouvée par ce type processus dépend aussi de l'initialisation du vecteur ${v_B}^0(x)$. L'algorithme est donc répété plusieurs fois avec différentes initialisations et la solution optimale est celle dont l'erreur à l'adéquation aux données est minimale.

L'avantage de réduire l'espace des fréquences possibles grâce aux algorithmes de séparation de sources est de réduire considérablement le temps de calcul de cette méthode de reconstruction. Néanmoins, comme la méthode précédente, elle est dépendante du résultat de la décomposition des spectres et est assez compliquée en termes de mise en œuvre.

En résumé, la technique de reconstruction de la fréquence Brillouin avec un pas centimétrique repose sur une étape de séparation de sources. Nous avons choisi des algorithmes de décomposition dans une base prédéfinie adaptée au problème. Selon les résultats de cette étape, il sera possible d'estimer un profil de fréquence Brillouin centimétrique. Pour diminuer le nombre d'étapes au sein de la méthode, une solution alternative basée sur des techniques d'inversion avec régularisation est donc proposée.

II.2.3. Inversion paramétrique itérative

II.2.3.1. Principe

La notion de problème inverse est présente dans de nombreux domaines (Tarantola, 1984) et plus spécialement dans le domaine de la géophysique, pour obtenir l'imagerie sismique notamment (Virieux, 2009 ; Brossier, 2009 ; Vautrin, 2011) ou encore l'électromagnétisme (Trillon, 2010) dans lequel le modèle de propagation de l'onde est bien décrit mais le milieu de propagation est à estimer. Dans le cas de détection de fuites dans des structures, cette méthode permet d'estimer le débit d'une fuite (Kerzalé, 2012). Il existe une pléthore d'applications également dans la spectroscopie, la restauration d'images, etc. (Demoment, 2001 ; Tarantola, 2005).

Dans la plupart des applications, les problèmes inverses sont dits « mal posés » (Hadamard, 1923) puisqu'ils ne remplissent pas les conditions sur l'existence, l'unicité et la continuité de la solution. En effet, les données présentent du bruit de mesure avec des incertitudes dues à l'instrumentation ; le nombre d'observations, donc l'échantillonnage, doit être suffisant pour décrire de manière unique les paramètres recherchés. Rien ne garantit que pour une observation, plusieurs valeurs des paramètres recherchés ne soient pas possibles. Cette non-unicité peut être résolue grâce à l'introduction d'*a priori* qui va réduire l'espace des possibilités pour aboutir à une solution unique.

Appliqué dans notre cas, nous supposons que le fonctionnement réel de l'interrogateur B-OTDA présente une erreur $\boldsymbol{\varepsilon_{mod}}$ liée à la définition de notre modèle (II-2-4). Il est alors possible d'estimer un profil de fréquence Brillouin permettant de minimiser cette erreur :

$$\boldsymbol{G = H(v_B(x)) + \varepsilon_{mod}} \qquad \text{(II-2-21)}$$

avec $\boldsymbol{H(v_B(x))}$ définit dans (II-2-4).

Une solution linéaire du système au sens des moindres carrées est alors possible pour minimiser la fonction de coût $\boldsymbol{J_1(v_B(x))}$ entre les observations et la sortie du modèle :

$$\boldsymbol{J_1(v_B(x)) = \|G - H(v_B(x))\|_2^2} \qquad \text{(II-2-22)}$$

La matrice $\boldsymbol{H}$ est sous dimensionnée à cause des limites techniques (w = 1 m) exposées dans le chapitre précédent. Afin d'aboutir à une solution unique, une régularisation sur les solutions possibles est rajoutée, donnant une nouvelle fonction de coût à minimiser :

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})) = \boldsymbol{J_1}(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})) + \lambda.\boldsymbol{J_2}(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})) \qquad \text{(II-2-23)}$$

avec $\boldsymbol{J_2}(\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})) = \left\|\frac{\partial \boldsymbol{v_B}}{\partial \boldsymbol{x}}\right\|$ qui minimise l'écart entre les fréquences Brillouin.

Le coefficient de régularisation λ ajuste l'importance donnée à chaque terme et donc permet de faire un compromis entre la fidélité aux données et celle aux informations *a priori*. L'une des méthodes les plus connues pour la résolution de ce problème est celle de Tikhonov (Tikhonov, 1977) qui utilise la norme L_2 de la solution comme régularisation, ce qui revient à résoudre un problème d'optimisation convexe non contraint classique. L'inversion par méthode itérative convient d'être appliquée. Le principe de descente de gradient est appliqué pour minimiser la fonction de coût (Snyman, 2005).Un vecteur optimal de $\boldsymbol{v_B}(\boldsymbol{x})$ est estimé par itérations successives selon les contraintes d'adéquation aux données et d'*a priori*. Les inconvénients de cette technique sont le temps de calcul requis selon la complexité du modèle direct et sa sensibilité à la précision du modèle. De plus, selon l'initialisation, le résultat peut correspondre à un minimum local dans l'espace des solutions.

II.2.3.2. Détermination du coefficient de régularisation : méthode de la *L-curve*

Afin de déterminer le coefficient de régularisation λ, deux méthodes sont couramment utilisées. La première est la méthode empirique dans laquelle plusieurs valeurs de λ sont testées. Des bornes sont alors déterminées pour lesquelles l'erreur d'adéquation aux données est acceptable et le profil de fréquence n'est pas trop bruité.

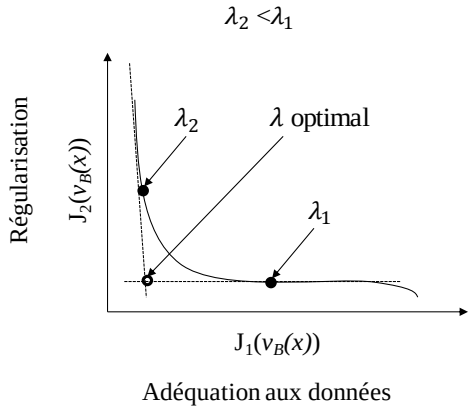


Figure 37 : L-curve en fonction des termes de régularisation λ ; lorsque $\lambda = \lambda_1$ et donc supérieur au λ optimal, l'erreur d'adéquation aux données J_1 est grande alors que lorsque $\lambda = \lambda_2$ est inférieure au λ optimal, J_2 est grande.

La deuxième est la détermination du terme optimal. Pour plusieurs valeurs de λ, les erreurs J_1 et J_2 sont représentées sur une échelle logarithmique (Figure 37). Théoriquement, deux droites peuvent être identifiées : lorsque λ est inférieur au coefficient optimal, l'erreur due à l'adéquation aux données J_1 est constante, alors que J_2 devient grande et inversement lorsque λ est inférieur au paramètre optimal. En estimant les deux droites correspondantes, il est alors possible d'estimer le λ optimal. Il a été montré que la courbure de la L-curve est exprimable analytiquement en fonction de λ (Hansen, 1993). Nous déterminerons un λ de manière empirique grâce à la première méthode.

II.2.4. Comparaison des méthodes

Dans un premier temps, les méthodes de reconstruction du profil de fréquence Brillouin, dont les techniques de séparation de sources, sont comparées sur un jeu de données simulées puis, dans un second temps, sur le jeu de données réelles du CER de Rouen. Les données simulées permettent de maîtriser les profils Brillouin tandis que les données réelles adressent le problème des déformations du sol lors d'un tassement localisé et maîtrisé.

II.2.4.1. Simulation

Un profil de fréquence Brillouin $\boldsymbol{\nu_B(x)}$ est généré pour caractériser plusieurs cas de figures au sein de la base de mesure (Figure 38. a.) avec une résolution de 1 cm :

- entre 0 m et 2 m, la fréquence est constante à 10.82 GHz ;
- ensuite entre 2 m et 4.5 m, la fréquence augmente constamment pour atteindre le maximum à 10.865 GHz, ce qui correspond à une variation de déformation relative entre 0 m et 4 m de 900 µm/m
- Entre le maximum global à 10.865 GHz et le minimum global à 10.77 GHz, cela représente une variation en déformation de 1900 µm/m entre 4.5m et 5.5m.
- Entre 5.5m et 7.2m, des variations locales comportent deux minima locaux et un maximum local entre 10.77 GHz et 10.775 GHz, ce qui représente une variation de 100µm/m.
- Enfin, entre 7.2 m et 8 m, la déformation imposée est constante de 1000 µm/m.

La base de mesure w = 1 m et le pas de mesure Δz = 0.4 m sont fixés pour se rapprocher des paramètres classiques de mesure d'un interrogateur B-OTDA industriel. Pour générer la matrice de spectres $\boldsymbol{G}$, le spectre élémentaire choisi suit une loi pseudo-Voigt avec une largeur à mi-hauteur de 0.95 GHz. Ce spectre est échantillonné à une fréquence de 0.001 GHz. La matrice des spectres Brillouin est donc composée de N_z = 24 spectres Brillouin (Figure 38. b.).

La matrice des histogrammes correspondante illustrée sur la Figure 38. c. est composée de N_z colonnes. Elle sera la référence pour la comparaison entre les estimations des deux algorithmes de déconvolution des spectres Brillouin.

L'algorithme d'estimation de la fréquence Brillouin de l'appareil est appliqué sur la matrice : le résultat est le profil échantillonné à Δz = 0.4 m, affiché en noir sur la Figure 38. a. A cause de la base de mesure de 1 m, le profil mesuré suit globalement le profil simulé mais ne permet pas d'estimer correctement les variations locales présentes sur le profil théorique.

Les paramètres de forme $\boldsymbol{R_A(z)}$ et $\boldsymbol{R_B(z)}$ sont calculés sur la matrice $\boldsymbol{G}$ générée (Figure 38. d.). Ils attestent des variations importantes de la fréquence Brillouin au sein de w.

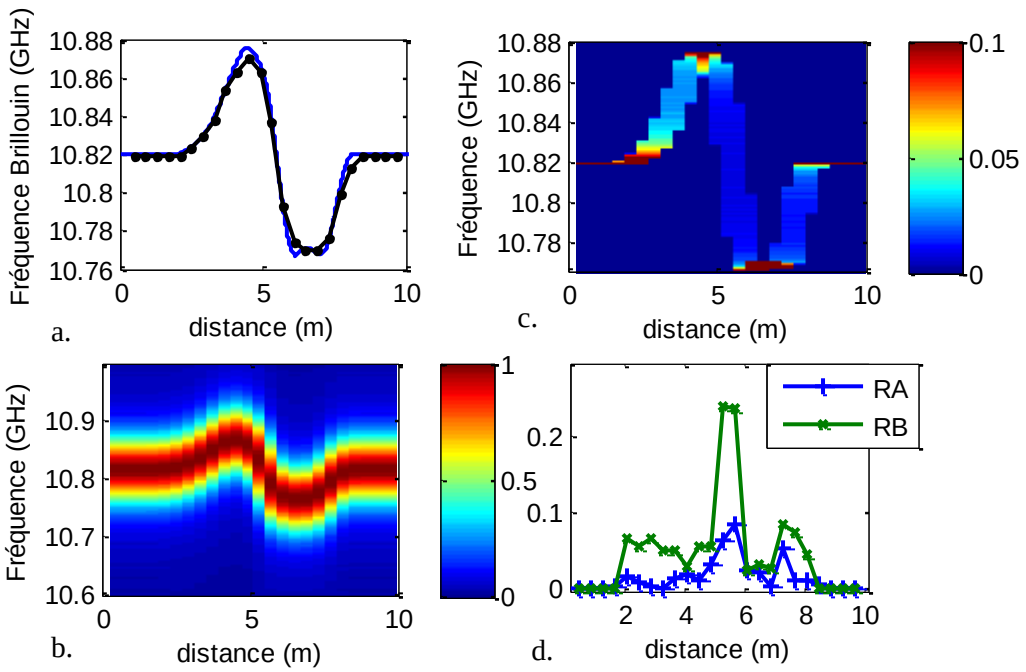


Figure 38 : a. Profil de fréquence Brillouin simulée en fonction de la distance (m) en bleu ; profil estimé par l'algorithme interne d'un interrogateur B-OTDA industriel en noir. b. Matrice de spectres Brillouin simulée pour le profil correspondant avec les paramètres d'acquisition suivant : w = 1 m, Δz = 0.4 m et $\Delta \nu$ = 0.001 GHz. c. Matrice des histogrammes $\boldsymbol{H_i}$ des fréquences Brillouin contenues dans chaque base de mesure. d. Evolution des paramètres de forme $\boldsymbol{R_A}$, et $\boldsymbol{R_B}$ en fonction de la distance.

II.2.4.2. Application des algorithmes de séparation de sources

Constitution de la matrice des sources

La première étape pour la décomposition des spectres Brillouin est de construire le dictionnaire de sources $\boldsymbol{S}$. Pour cela, le même spectre $\boldsymbol{s_e(\nu)}$ choisi pour la génération du jeu de données est décalé d'un pas $\Delta \nu_B$ = 0.001 GHz dans l'intervalle ν_{Bmin} = 10.74 GHz et ν_{Bmax} = 10.9 GHz. L'influence de la forme du spectre et du pas $\Delta \nu_B$ sur l'estimation du profil est discutée dans la suite.

Factorisation en Matrice Non Négative

Dans un premier temps, le coefficient α (qui est fonction de la confiance à l'estimation de $\boldsymbol{s_e(\nu)}$) est fixé à 1. Dans un deuxième temps, le coefficient θ est fixé empiriquement à 3 (Figure 39. a.). La parcimonie est inversement proportionnelle à l'évolution de la distorsion mesurée par $\boldsymbol{R_A}$ et $\boldsymbol{R_B}$. Lorsque le spectre n'est pas distordu, le coefficient de parcimonie est alors fixé à 1. Dans ce cas, l'algorithme doit déterminer un et un seul coefficient non-nul associé à un seul spectre contenu dans le dictionnaire. Entre 2 m et 8.6 m, la contrainte sur la parcimonie suit l'évolution de la distorsion des spectres Brillouin (Figure 39. a.). La contrainte sur la forme des spectres est fixée à 0.95. Le nombre d'itérations est de 500, ce qui représente un temps de calcul de quelques minutes (processeur IntelCore 2 Duo CPU @ 1.5GHz et 3Go de RAM). L'influence des paramètres θ et α sont discutées dans l'annexe II-1.

La matrice des composantes $\boldsymbol{A}$ est alors trouvée (Figure 39. b.). Par exemple, la Figure 39. c. permet d'illustrer la différence entre l'estimation de la FMN avec l'histogramme des fréquences Brillouin (Figure 39. c). En termes de nombres de composantes non nulles, l'algorithme en calcule seulement 50

% non nulles alors que la parcimonie est presque nulle. Sur l'ensemble de la matrice, 72 % des composantes sont non nulles. En augmentant le nombre d'itérations, ce pourcentage s'améliore jusqu'à 76 % pour $\theta = 3$. Cependant, à certaines distances (z compris entre 2 m et 4m), le nombre de composantes est surévalué. Cela peut s'expliquer par le fait que les paramètres de forme permettant de rendre compte de la distorsion ne sont pas assez sensibles au nombre de composantes contenues dans le spectre.

Lorsque le spectre n'est pas distordu (z compris entre 0 et 2 m), l'estimation de la fréquence Brillouin n'est pas précise ; oscillant entre 10.81 GHz et 10.84 GHz au lieu d'être unique à 10.82 GHz. Par conséquent, l'algorithme ne permet pas de caractériser précisément les composantes Brillouin contenues dans le spectre. Cette erreur d'estimation se répercutera sur le profil de fréquences Brillouin et constitue l'inconvénient principal de cette méthode par FMN.

Pour juger de l'efficacité des algorithmes, plusieurs indicateurs sont retenus. Le premier est l'erreur quadratique moyenne (EQM) entre le spectre exprimé comme une somme pondérée des éléments du dictionnaire et le spectre simulé. Les indicateurs également intéressants pour quantifier l'erreur entre la matrice $\boldsymbol{A}$ issue de la technique FMN (mais également de l'algorithme MCN) et l'histogramme théorique $\boldsymbol{h}$ sont : le pourcentage d'erreurs sur le nombre de composantes non nulles et les erreurs relatives moyennes sur l'estimation des fréquences Brillouin et les amplitudes associées. Ces erreurs sont retranscrites dans le Tableau 11 et permettent de comparer les deux algorithmes de séparation de sources à partir de ces indicateurs.

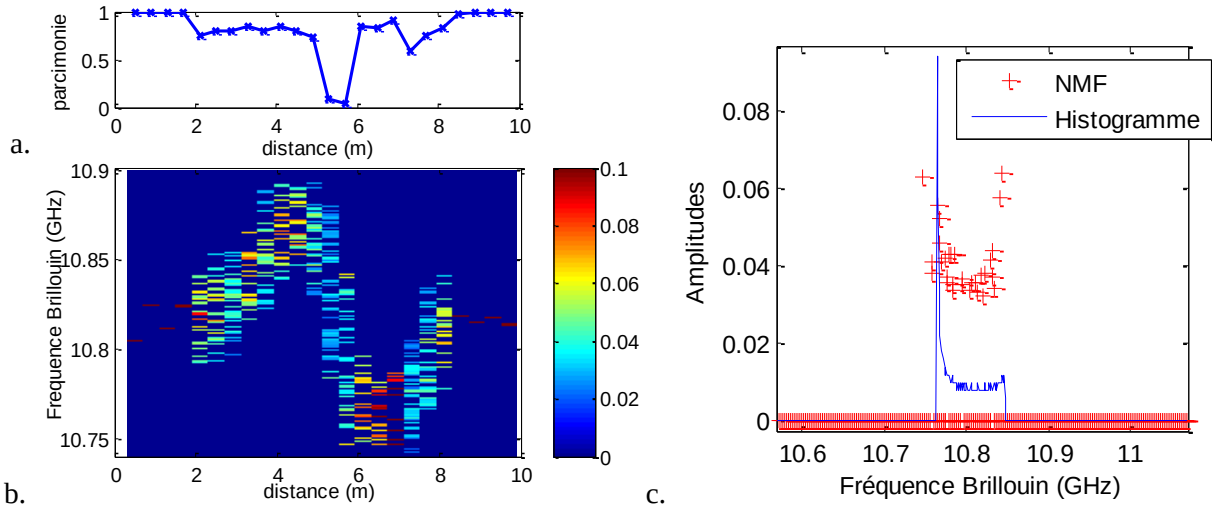


Figure 39 : a. Evolution du critère de parcimonie ***spa*** en fonction de la distance calculé à partir de l'équation II-2-12. b. Estimation de la matrice $\boldsymbol{A}$ par l'algorithme de la FMN avec contrainte sur la forme des sources. c. Pour z = 5.6 m, histogramme théorique des fréquences Brillouin contenues dans le spectre Brillouin (en bleu) ; résultat de la FMN avec le critère de parcimonie à 0.07 (en rouge).

Méthodes des Moindres Carrés Non Négatifs

Nous appliquons cet algorithme sur toute la matrice de spectres Brillouin avec la même base de décomposition que précédemment. La matrice $\boldsymbol{A}$ alors estimée est représentée dans la Figure 40. a. A la position z = 5.6 m, la précision élevée de cet algorithme est mise en évidence (Figure 40. b.) : les $\boldsymbol{P_k}$ et $\boldsymbol{v_{Bk}}$ estimés et théoriques sont identiques, seules les amplitudes sont surévaluées.

En termes d'erreurs de reconstruction des spectres (10^{-14} en termes d'EQM), de même qu'en termes d'estimation des fréquences Brillouin (0.1 % en terme d'erreurs absolues moyennes (EAM) entre les valeurs de fréquences Brillouin théorique et estimée), cet algorithme est plus performant que la FMN (Tableau 11), avec un temps de calcul moins important et moins de paramètres à fixer.

Toutefois, il est nécessaire de s'interroger sur l'influence de la forme du spectre élémentaire sur les performances des deux algorithmes de séparation. La section II.2.4.4 nous permet de comprendre l'influence de la base de décomposition sur les performances de l'algorithme MCN. En effet, la précision sur les valeurs de fréquences Brillouin se dégrade fortement lorsqu'on perturbe la forme de l'atome de la base de décomposition. L'étape de l'estimation du spectre élémentaire est donc cruciale pour ensuite estimer un profil de déformation cohérent.

Tableau 11 : Comparaisons des erreurs d'estimation des algorithmes de séparation de sources appliquées sur un jeu de données simulées.

Algorithme	**Temps de calcul**	P_k	a_k	v_{Bk}	**EQM spectres**
MCN	Seconde	99 %	1.2 %	0.1 %	10^{-14}
FMN	Minutes	72 %	12.5 %	19. 4 %	5.3

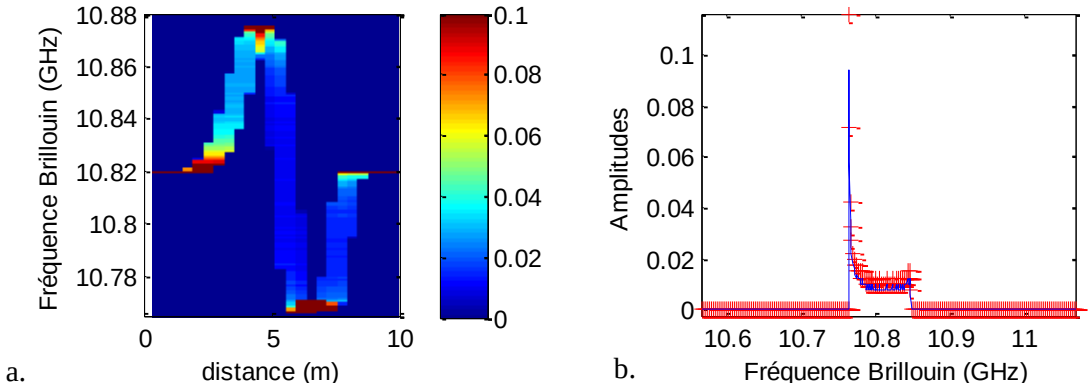


Figure 40 : a. Estimation de la matrice ***A*** par l'algorithme FastNNLS. b. Comparaison entre les composantes spectrales théoriques (en bleu) et estimées (en rouge) contenues dans le spectre Brillouin simulé à z = 5.6 m.

II.2.4.3. Comparaison des algorithmes de reconstruction

Reconstruction empirique

Cette méthode de reconstruction est appliquée sur les matrices ***A*** issues des méthodes de séparation de spectres. Le pas de mesure choisi est Δx = 1 cm. La Figure 41. a. nous permet de comparer qualitativement les profils estimés.

Le profil issu de la matrice ***A*** trouvée par la technique de la FMN est bruité, il suit les variations globales de la fréquence. Lorsque la fréquence est constante, les fréquences Brillouin locales n'étaient pas bien estimées, le profil présente des sauts en fréquence non justifiés théoriquement. Cela s'en ressent sur l'erreur de reconstruction : l'erreur absolue moyenne (EQM) entre le profil théorique et reconstruit est alors de 4.4×10^{-3}. Le profil de fréquences issu de la MCN est moins bruité et présente

une très faible erreur avec le profil simulé. Néanmoins, dans la zone où il existe plusieurs minima locaux, la méthode empirique est limitée dans sa capacité à retranscrire ces variations. La combinaison de l'étape de déconvolution grâce à la MCN et de reconstruction empirique permet de diminuer l'erreur de reconstruction à $1.2\text{x}10^{-3}$ (en termes d'EQM (Tableau 12)).

Comme nous pouvons le constater, les profils de fréquence reconstruits sont quantifiés en fréquence : cela vient de l'influence du pas en fréquence $\Delta\nu_B$. Plus $\Delta\nu_B$ est grand, moins les matrices $\boldsymbol{A}$ sont précises en fréquence (Buchoud, 2013). Si l'algorithme n'est pas capable d'estimer la fréquence et le segment associés à une fissure, alors l'algorithme de reconstruction ne rendra pas compte de cet évènement malgré un pas de mesure pouvant être centimétrique. Ce manque de précision se propage à l'erreur de reconstruction des spectres Brillouin puis à l'erreur du profil de fréquence Brillouin. Afin d'avoir l'estimation la mieux résolue en fréquence, il est préférable de construire le dictionnaire de sources avec $\Delta\nu_B$ faible.

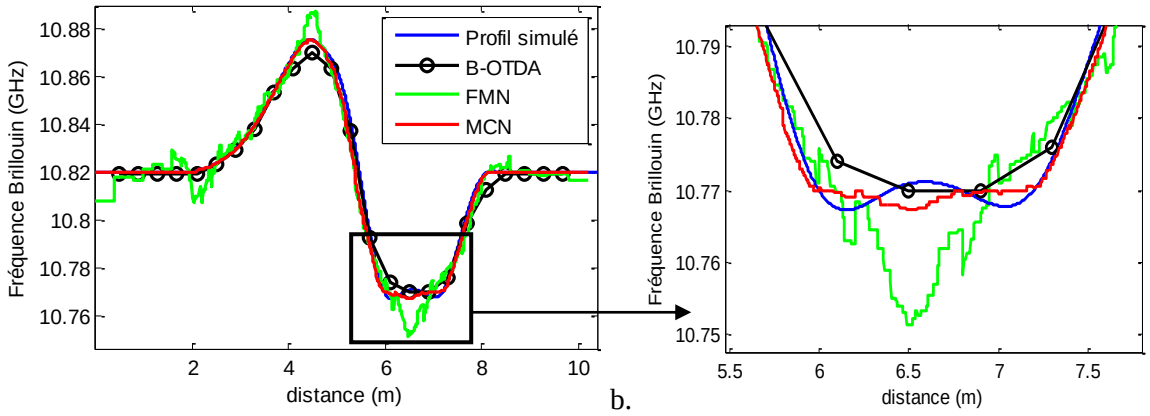


Figure 41 : a. Reconstruction du profil grâce à la méthode empirique : en noir le profil fournit par le B-OTDA (résolution 40 cm), en vert le profil estimé à partir de la FMN (résolution 1 cm) et en rouge le profil estimé à partir de la matrice de la MCN (résolution 1 cm). En bleu est affiché le profil simulé (théorique) avec une résolution de 1 cm. b. Zoom sur la zone des extrema locaux.

Reconstruction statistique

Cet algorithme est appliqué sur les matrices estimées par les algorithmes de séparation de sources. Comparé à l'algorithme empirique de reconstruction, cette méthode permet d'avoir un profil de fréquences très peu quantifié et donc continu après 500 itérations (Figure 42 – le profil du B-OTDA n'est pas affiché par souci de clarté). Elle présente également le net avantage de pouvoir choisir les fréquences Brillouin parmi celles fournies par les algorithmes.

Pour la FMN, l'erreur de reconstruction du profil de fréquence Brillouin par cette méthode est inférieure à la méthode empirique (Tableau 12). Au contraire, pour la MCN, l'erreur de reconstruction de cette méthode est supérieure à la méthode empirique. Cela est imputable à l'étape 3 de l'algorithme qui minimise les écarts entre les fréquences Brillouin adjacentes.

Pour la détection des variations locales (Figure 42. b.), cet algorithme estime un maximum local et des minima locaux pour le profil MCN, alors que le profil FMN ne présente qu'un seul minimum local à x = 6.45 m. Lorsqu'une forte variation apparait dans w, celle-ci sera d'abord détectée et quantifiée par

l'algorithme MCN, ensuite reconstruite par l'algorithme statistique, mais l'erreur de quantification sera importante (Figure 42. b.).

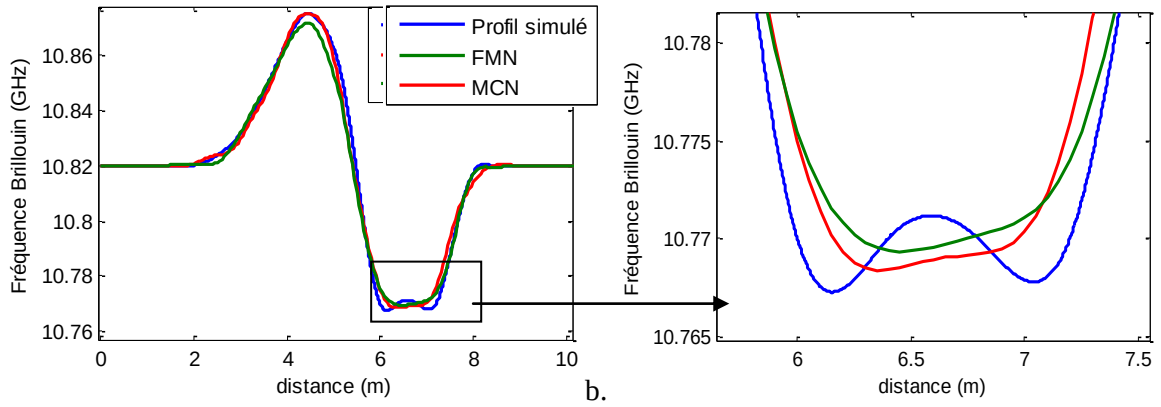


Figure 42 : a. Reconstruction du profil grâce à la méthode de l'échantillonneur de Gibbs appliquée aux matrices ***A*** estimées par l'algorithme de MCN (en rouge) et FMN (en vert). En bleu est affiché le profil simulé (théorique) avec une résolution de 1 cm. b. Zoom sur la zone des extrema locaux.

Inversion

La méthode d'inversion est appliquée sur les données simulées. Pour déterminer le coefficient de régularisation λ, nous avons donc employé la méthode empirique qui permet de déterminer une zone convenable pour les erreurs de reconstruction (Figure 43. a.). Pour un coefficient λ croissant de 0.01 à 5, J_2 diminue légèrement alors que J_1 reste constant. Entre λ = 5 et 10^3, J_1 diminue légèrement alors que J_2 reste constant. En choisissant $\lambda = 5$, un compromis est fait entre une bonne adéquation aux données et un profil de fréquence peu bruité, comme le montre la Figure 43. b. L'erreur de reconstruction des spectres avec cette méthode et cette valeur de paramètre est de 22.7 (Tableau 12) et donc supérieure aux autres méthodes. L'erreur entre le profil reconstruit et théorique est de 2.3×10^{-3} (en termes d'EQM (Tableau 12)).

L'avantage par rapport à la méthode de déconvolution est la reconstruction de variations locales : entre 6 m et 7 m, les minima locaux et le maximum local sont estimés même si leurs positions sont approximatives (Figure 43. c). Ce phénomène peut être dû à une propagation d'erreur dont la cause est l'optimisation des valeurs de fréquences Brillouin $\nu_B(x_k)$ avec k croissant. La résolution spatiale est alors améliorée du mètre à la dizaine de centimètres – correspondant aux longueurs des variations locales (minima locaux) présentes sur le profil entre 6.05 m et 6.15 cm et 6.95 m et 7.05m. Il serait alors intéressant d'effectuer des simulations supplémentaires pour caractériser la résolution spatiale minimale possible grâce à cet algorithme.

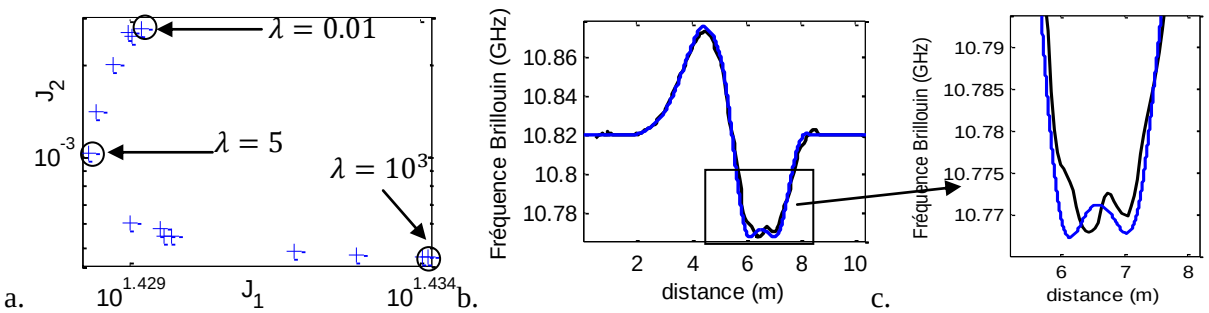


Figure 43 : a. L-curve pour des valeurs de λ allant de 0.01 à 10^3. La valeur optimale estimée est $\lambda = 5$. b. Résultat de l'inversion (profil noir) sur les données simulées (profil bleu) avec les paramètres de régularisation optimisés après 30 itérations. c. Zoom sur la zone des extrema locaux.

Les différentes performances des techniques de reconstruction sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Performances des techniques de reconstruction du profil de fréquence Brillouin avec un pas de 1 cm.

Méthodes	**Erreurs spectres**	**Erreurs profils ($x10^{-3}$)**	
		Empirique	Statistique
MCN	10^{-14}	1.2	1.8
FMN	5.3	4.1	3.2
Inversion	22.7	2.3	

II.2.4.4. Discussion

Robustesse vis-à-vis de la forme du spectre élémentaire

Comme nous l'avons mis en lumière précédemment, le paramètre important de ces méthodes est la forme du spectre élémentaire. Si nous estimons un spectre élémentaire avec une erreur importante par rapport au réel, alors qu'adviendrait-il des performances des méthodes utilisées ? Ces sources d'erreurs sont liées au bruit de mesure des spectres, au changement de paramètres de l'interrogateur au cours des mesures, à une contrainte non uniforme lorsque le spectre élémentaire est estimé. Les deux premiers cas peuvent être résolus par filtrage ou par ré-estimation du spectre élémentaire. Le dernier cas est assez probable. Nous allons donc perturber la forme du spectre en l'élargissant de 0.05 % de sa largeur à mi-hauteur initiale (Figure 44).

En appliquant les différentes méthodes de reconstruction du profil avec ce spectre de référence, nous calculons les erreurs de reconstruction des spectres et du profil (Tableau 13). Logiquement, les erreurs sur les spectres sont bien plus importantes que précédemment. Par propagation des incertitudes sur l'estimation des fréquences Brillouin, les erreurs de reconstruction de profil ont augmenté.

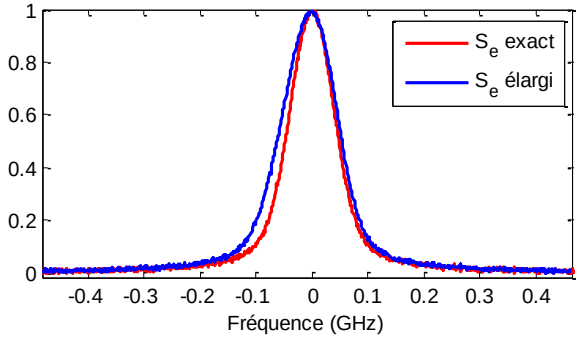


Figure 44 : Elargissement du spectre élémentaire $S_e(v)$ pour l'étude de son influence sur les performances des algorithmes.

Quelle que soit la méthode utilisée, l'influence de la forme du spectre sur les performances est importante (Tableau 13) : pour la MCN, les erreurs de reconstruction ont triplé par rapport à la configuration optimale précédente. L'estimation du spectre élémentaire est donc une étape cruciale sur l'erreur finale de l'estimation du profil de fréquences (et donc des déformations).

Tableau 13 : Influence de la forme du spectre élémentaire sur les performances des méthodes

Méthodes	**Erreurs spectres**	**Erreurs profils (x10^{-3})**	
		Empirique	Statistique
MCN	1.46	3.6	4.2
FMN	27.91	4.5	4.3
Inversion	166	4.1	

Analyse des méthodes de reconstruction du profil par déconvolution

Parmi les algorithmes de séparation de sources, la MCN présente plusieurs avantages en termes de performances et mise en œuvre : temps de calcul rapide et peu de paramètres à fixer. En termes de résultats, l'erreur entre la reconstruction des spectres et la précision des composantes spectrales de la MCN est inférieure à celle de la FMN et de l'inversion. Cependant, la MCN est la plus sensible à la forme du spectre élémentaire.

Entre les algorithmes de reconstruction, la méthode empirique présente moins de paramètres à fixer et est extrêmement simple et rapide à mettre en œuvre. Toutefois, le peu de cas recensés ne permet pas de reconstruire les variations locales de la fréquence. Associée à la MCN, cette méthode permet néanmoins d'atteindre l'erreur minimale à 1.2x10^{-3}. Associée à la FMN, cette méthode ne permet pas d'estimer un profil correct à cause du manque d'adaptabilité et des erreurs d'estimation des composantes locales de l'algorithme. Cela marque les limites de cet algorithme que nous ne conseillerons que pour avoir une estimation globale du profil de fréquence.

Associée à la FMN, la méthode statistique élimine au contraire les composantes locales sur ou sous estimées puisque la reconstruction du profil est faite en minimisant l'erreur de reconstruction globale. Associée à la MCN, la méthode statistique permet d'avoir une erreur de même ordre de grandeur qu'avec la reconstruction empirique.

Analyse de la méthode d'inversion itérative

La méthode d'inversion demande moins de paramètres pour sa mise en œuvre et fournit des résultats très satisfaisants en terme de reconstruction du profil : les variations locales sont plus marquées. Seul un réglage optimal du coefficient de régularisation est nécessaire.

II.2.4.5. Conclusion sur les données simulées.

Au vu des résultats obtenus sur les données simulées, pour **la méthode de reconstruction par déconvolution,** nous avons comparé deux algorithmes de séparation de sources assez proches en termes de principe et de résultats. Dans un souci de simplification du nombre de paramètres, **nous privilégions l'algorithme de la MCN associé à la méthode de reconstruction statistique**. La méthode de la FMN reste possible mais à cause des erreurs de reconstruction du profil trop importante. Entre la méthode de reconstruction par déconvolution et celle de l'inversion, d'après le nombre d'étapes, le temps de calcul, et l'automaticité, **nous privilégierons l'inversion itérative.**

Toutefois, les données analysées sont des données simulées ne reflétant qu'une partie des situations des données réelles. D'autre part, pour le calcul de la déformation, les méthodes doivent être appliquées sur deux matrices de spectres Brillouin acquises pour deux états de déformations différents. Ainsi deux profils de fréquences Brillouin avec un nouveau pas de mesure sont estimés. Par propagation d'erreurs, si celles-ci sont importantes, l'estimation de la déformation ne sera pas satisfaisante. Nous allons donc refaire l'analyse précédente sur des données acquises lors de l'expérience du CER de Rouen avant de conclure sur la méthode à adopter.

II.2.4.6. Application sur des données expérimentales : CER de Rouen

Les méthodes de séparation de spectres associées à la reconstruction empirique ont été appliquées sur des données expérimentales acquises lors d'une expérience en laboratoire pour la création d'une déformation constante sur 4 m de câble à fibre optique (Buchoud, 2013. b.). Nous avons prouvé la possibilité d'améliorer le pas de mesure à 5 cm et la capacité à détecter, localiser et quantifier un palier de déformation de + 2000 µm/m (Buchoud, 2013. a & b.).

Nous allons tester les méthodes présentées dans ce chapitre sur les données acquises aux CER de Rouen. Pour rappel (section I.4.1), les matrices de spectres Brillouin ont été acquises par l'interrogateur B-OTDA « DiTest » d'Omnisens avec les paramètres d'acquisition suivants : base de mesure w = 1 m, pas de mesure Δz = 40 cm et résolution spectrale $\Delta \nu$ = 1 MHz. A l'état initial du système E_0, lorsqu'aucun déplacement n'est appliqué, une matrice de spectres Brillouin est mesurée. Ensuite, lorsque la plaque est abaissée, à chaque état de déformation E_i, une matrice de spectres Brillouin est mesurée. Nous nous intéressons seulement aux mesures issues d'un câble A qui est le plus largement utilisé dans les applications géotechniques (Buchoud, 2014).

Mesures de référence

En parallèle, l'interrogateur Rayleigh a permis de mesurer la déformation relative entre deux états avec un pas de 3 cm. Il nous servira de profil de référence pour comparer les méthodes de reconstruction.

Estimation du spectre élémentaire

Nous supposons qu'à l'état initial E_0 du système, la fibre optique subit une déformation constante tout au long de la structure. Afin de minimiser les influences des contraintes locales qui peuvent exister, le

spectre Brillouin élémentaire $\widetilde{\boldsymbol{s_e}}(\boldsymbol{\nu})$ du système est estimé en moyennant tous les spectres Brillouin mesurés à l'état E_0 :

$$\widetilde{\boldsymbol{s_e}}(\boldsymbol{\nu}) = \frac{1}{N_z} . \sum_{k=1}^{Nz} \boldsymbol{G}_{E_0}(\boldsymbol{\nu}, z_k) \qquad \text{(II-2-24)}$$

D'autres solutions peuvent être envisagées, par exemple estimer le spectre élémentaire comme étant le spectre le plus corrélé avec tous les spectres Brillouin mesurés.

Comparaison des méthodes de reconstruction

Les méthodes ont été appliquées sur les matrices acquises à l'état initial E_0 et à l'état E_6 = 9 mm. Nous discutons ici leur capacité à retrouver la déformation. Le nouveau pas de mesure souhaité est Δx = 5 cm, ce qui permet d'avoir un compromis entre le pas de mesure centimétrique et le temps de calcul inférieur à la dizaine de minutes.
Les paramètres pour les deux méthodes sont les suivants et restent inchangés quelque soit E_i :

- **Reconstruction du profil par déconvolution**
  - **Séparation de sources** : algorithme MCN avec construction du dictionnaire tel que $\Delta\nu_B$ = 1 MHz
  - **Reconstruction statistique** : 300 itérations.
- **Inversion** : le coefficient de régularisation λ est fixé à 10 de manière empirique (Figure 45.a.) ; nous fixons le nombre d'itérations à 30, ce qui permet d'estimer les profils de fréquence Brillouin (Figure 45. b.) avec un pas de mesure Δx = 5 cm. Celui-ci est en adéquation avec les mesures de fréquences Brillouin fournies par le B-OTDA.

Pour effectuer les comparaisons, nous traitons distinctement les zones du câble à fibre optique (cf. I.4.1) enterré à z_{f2} = 1 m et à z_{f1} = 50 cm au dessous de la surface du sol. En effet, pour z_{f2} = 1 m, les déformations varient entre +171 µm/m et -439 µm/m sur une zone de 2 m (Figure 45. c.), alors que la déformation mesurée à z_f = 50 cm s'étend sur presque 6 m pour des valeurs de déformation moindres (Figure 45. d.).
En s'appuyant sur les erreurs calculées et présentées dans le Tableau 14, nous pouvons conclure :

- Globalement, la méthode d'inversion des spectres Brillouin nous livre un profil de déformation proche de celui de référence. La méthode de reconstruction par déconvolution propage plus d'erreurs et donc ne permet pas d'avoir une estimation fiable de ce profil.
- A z_{f2} = 1 m, l'algorithme d'inversion présente toutefois des erreurs plus importantes lorsque les gradients de déformation sont plus importants. La signature du fontis est toutefois reconnaissable malgré une sous-estimation du minima et des maxima (Figure 45. c.).
- A z_{f1} = 0.5 m, l'algorithme d'inversion reconstruit très précisément le profil de déformation (Figure 45. d.).

Ces résultats viennent conforter la validité de notre modèle et de l'interprétation que nous en avons faite sur les données simulées. Une solution complémentaire peut être ainsi apportée aux prochains interrogateurs ou à un déploiement industriel des interrogateurs B-OTDA actuels pour l'amélioration du pas de mesure et de la résolution en déformation.

Tableau 14 : Tableau comparatif des méthodes de reconstruction du profil de fréquence Brillouin sur les données du CER de Rouen.

Erreur estimation déformation (EQM)	**z_f=1m**		**z_f=0.5m**	
	Empirique	Statistique	Empirique	Statistique
MCN	88.18	**78.24**	80.37	**75.31**
Inversion	**61.23**		**48.20**	

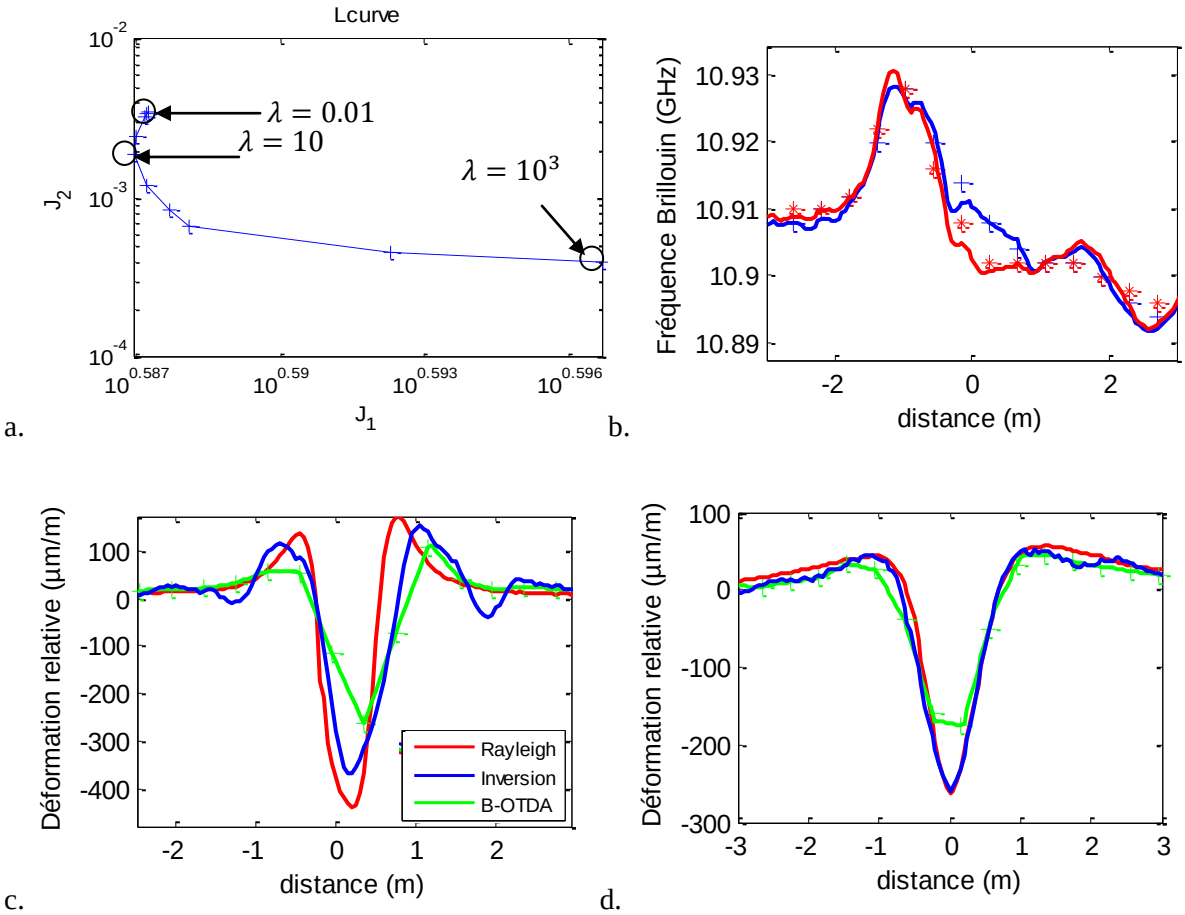


Figure 45 : a. L-curve sur les données du CER de Rouen pour la détermination du coefficient de régulation λ sur le profil optimal pour des λ compris entre 0.01 et 10^3. b. Profils de fréquence Brillouin mesurés (points) par l'interrogateur B-OTDA industriel DiTest d'Omnisens pour les deux états E_O (bleu) et E_6 (rouge) pour z_{f2} = 1 m et estimés par la méthode de l'inversion (en traits continus) avec un pas de mesure Δx = 5 cm. Déformation relative en fonction de la distance pour z_{f2} = 1 m (c) et z_{f1} = 0.5 m (d) : référence mesurée par l'interrogateur Rayleigh OBR Luna avec un pas de 3 cm (en rouge), par l'algorithme interne de l'interrogateur B-OTDA industriel DiTest d'Omnisens avec Δz = 40 cm (en vert) et par la méthode d'inversion avec Δz = 5 cm (en bleu) (Buchoud, 2014).

II.2.5. Conclusion et perspectives

Pour résumer, ce chapitre a été dédié à l'étude des appareils mesurant le spectre Brillouin grâce aux différentes technologies basées sur la physique optique (B-OTDA, B-OTDR,…). La principale limite est la faible durée de l'interaction des photons avec la silice de la fibre optique, ce qui implique une

base de mesure minimale de 1m. Plusieurs techniques alternatives ont vu le jour pour pallier à ce problème : le B-OCDA, B-OFDA, etc. Toutefois, ces techniques sont encore au stade expérimental ou pré-industriel, leur robustesse doit donc être étudiée avant leur utilisation sur des sites industriels.

Une technique de traitement du signal basée sur la déconvolution du modèle physique du fonctionnement du B-OTDA avait été proposée en 2007 par Ravet *et al.* (Ravet, 2007) pour améliorer le pas de mesure. Dans notre cas, cette technique n'est pas applicable puisque nous utilisons un appareil industriel dont certains paramètres d'acquisition ne sont pas fournis. Nous avons donc mis en place un modèle simplifié du fonctionnement de la chaîne de mesure dont les paramètres se résument à : la base de mesure w, le pas de mesure Δz, la longueur sensible de la fibre L et enfin le spectre élémentaire de la fibre $\mathbf{s_e(\nu)}$ qui peut être déterminé empiriquement.

A partir de ce modèle et de l'interprétation du phénomène de distorsion Brillouin, nous avons défini des paramètres de forme permettant de détecter plus efficacement les zones pour lesquelles la déformation n'est pas uniforme dans w. Ensuite, une première méthodologie de **reconstruction de profil Brillouin par déconvolution** a été mise en place pour estimer le profil de fréquence Brillouin avec un pas centimétrique. Elle comporte deux étapes :

- **La séparation des spectres Brillouin** afin d'estimer les fréquences Brillouin locales. Les amplitudes associées sont reliées au nombre de portions élémentaires dans w centrées en ces fréquences. Nous avons mis en place et comparé sur des données simulées deux algorithmes de séparation de sources : la méthode de la Factorisation en Matrices Non négatives et de la méthode des Moindres Carrés Non négatifs. Elles s'appuient toutes les deux sur la projection des spectres sur un dictionnaire de sources. Celui-ci est composé de spectres élémentaires $\mathbf{s_e(\nu)}$ centrés en des fréquences Brillouin locales séparées par un écart de fréquence $\Delta\nu_B$.
- **La reconstruction des profils de fréquence Brillouin** organise les fréquences Brillouin locales au sein de w pour fournir un profil de fréquence Brillouin avec un pas Δx souhaité de l'ordre du centimètre. La première méthode employée s'appuie sur l'interprétation du modèle et la redondance d'information entre les spectres. La seconde correspond à l'organisation statistique des fréquences Brillouin s'appuyant sur des *a priori* choisis par l'utilisateur.

Appliquées sur des données simulées, ces méthodes donnent des résultats encourageants quant à la possibilité d'améliorer le pas de mesure grâce aux informations contenues dans les spectres Brillouin. En effet, elles permettent de reconstruire des profils de fréquences Brillouin avec un pas d'1 cm et une précision en fréquence de l'ordre de 1 MHz. En termes d'algorithmes de séparation de sources, la MCN (lorsqu'elle est couplée avec la méthode empirique) présente les meilleures performances. Ces méthodes ont été également testées sur une expérimentation en laboratoire (Buchoud, 2013).

Toutefois, les performances de ces méthodes sont fortement influencées par les caractéristiques du dictionnaire de sources : la forme du spectre élémentaire $\mathbf{s_e(\nu)}$ et le pas de fréquence Brillouin minimal entre les sources $\Delta\nu_B$. Pour pallier à ce problème, nous avons proposé une deuxième méthode s'appuyant sur **l'inversion itérative paramétrique** du modèle de la chaine de mesure : il est possible d'optimiser le vecteur de fréquences Brillouin après N itérations pour minimiser l'erreur entre les spectres Brillouin mesurés et simulés. L'ajout d'un *a priori* permet de régulariser le profil pour éviter des écarts trop importants entre les fréquences Brillouin adjacentes. En optimisant la valeur du coefficient de régularisation, il est alors possible de déterminer un profil de fréquences Brillouin proche de celui théorique.

Pour calculer la déformation, les méthodes doivent être appliquées sur deux matrices de spectres Brillouin, correspondant à la même fibre, avec les mêmes paramètres, mais dont l'état de déformation a évolué. En comparant ces méthodes sur les données réelles acquises au CER de Rouen (signatures en déformation de fontis), l'inversion présente des résultats très satisfaisants avec un pas de mesure de 5 cm comparé à une mesure de déformation de référence. La méthode d'inversion permet ainsi d'améliorer la localisation et la quantification de la déformation lors de la formation d'un fontis (Buchoud, 2014). Il serait intéressant de tester ces méthodes sur des spectres mesurés par un B-OTDR : le spectre élémentaire estimé s'approchera d'un spectre naturel Brillouin.

Pour la suite, nous préconiserons donc la méthode de l'inversion paramétrique pour l'amélioration de la résolution en déformation de l'estimation. Cependant, sa sensibilité et sa capacité de détecter d'évènements inférieurs à la dizaine de centimètres restent à tester sur des applications de détection de fissures sur des ouvrages en béton.

L'expérience ayant pour but la création d'un renard hydraulique (maquette ERINOH) a révélé des signatures similaires (Annexe A) à un fontis mesuré par l'interrogateur Rayleigh, mais sur un étalement plus petit de l'ordre de la dizaine de centimètres. Une perspective serait d'appliquer l'ensemble des algorithmes développés (paramètres de distorsion, amélioration du pas de mesure) pour approcher un profil centimétrique proche de celui de référence (i.e. du profil mesuré par l'interrogateur Rayleigh).

Partie III : De la mesure de la déformation à l'estimation du déplacement

Introduction

Comme nous l'avons constaté dans les parties I et II, la dépendance de la fréquence Brillouin à la température et la déformation est très utilisée dans les applications de capteurs à fibre optique, notamment pour la surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre, pour la détection et localisation de déplacements irréversibles. Les déplacements sont le signe de la présence de phénomènes d'érosion interne ou externe affectant l'intégrité de la structure sur le long terme : renard hydraulique, fontis, etc. La problématique majeure de cette partie est de quantifier les déplacements irréversibles (fissures, ou tassements verticaux) pour pouvoir estimer le degré de dégradation subi par la structure.

Les capteurs à fibre optique fournissent une mesure de déformation relative à partir de la fréquence Brillouin supposant que la température est constante au sein de la fibre. Cette hypothèse est valable lors d'expérience dans des conditions contrôlées. Cependant, les ouvrages sont soumis à des conditions thermiques cycliques et en partie aléatoires. Nous identifions plusieurs sources de bruits thermiques venant bruiter la déformation athermique.

La première étape consiste à corriger les effets thermiques sur les mesures de déformation. Elle sera l'objet du chapitre 1 dans lequel deux méthodes seront proposées. La première s'appuie sur la connaissance *a priori* des sources, la deuxième est un algorithme de séparation de source aveugle. Ces méthodes seront comparées sur des données expérimentales acquises sur une digue.

Cette correction est suivie d'une deuxième étape faisant l'objet du chapitre 2. Notre but est de quantifier les déplacements irréversibles grâce aux estimations des déformations irréversibles. Pour cela, deux algorithmes sont mises en place pour le suivi de l'évolution de fissures dans le béton et la quantification de tassements verticaux dans le sol.

Chapitre 1 :

Correction de l'effet thermique sur les mesures de déformations acquises par des capteurs à fibre optique

Chapitre 1 : Correction de l'effet thermique sur les mesures de déformations acquises par des capteurs à fibre optique 91
III.1.1. Influence de la température sur la mesure de déformation 92
III.1.1.1. Problématique 92
III.1.1.2. Identification des sources thermiques influençant la déformation 93
III.1.1.3. Les solutions existantes 96
III.1.2. Correction des effets thermiques sur les mesures de déformations 97
III.1.2.1. Soustracteur de bruit 98
III.1.2.1.1. Elimination de l'influence des facteurs internes 98
III.1.2.1.2. Filtre de Wiener 98
III.1.2.1.3. Les différentes observations possibles de la température 99
III.1.2.2. La décomposition modale empirique 100
III.1.3. Etude de cas : la digue de Contrisson 101
III.1.3.1. Présentation du site et des données 101
III.1.3.1.1. Présentation du site 101
III.1.3.1.2. Données de déformation 102
III.1.3.1.3. Données de température 103
III.1.3.2. Applications des méthodes proposées 104
III.1.3.2.1. Soustraction de la température interne 104
III.1.3.2.2. Soustraction de bruit : Filtre de Wiener 105
III.1.3.2.3. Discussions sur les références de température 106
III.1.3.2.4. Décomposition modale empirique 107
III.1.4. Conclusion et perspectives 109

III.1.1. Influence de la température sur la mesure de déformation

Grâce aux algorithmes que nous avons proposés dans la partie précédente, il nous est possible d'estimer la fréquence Brillouin avec un pas centimétrique et une très bonne résolution spatiale. Or, cette fréquence Brillouin est proportionnelle à la déformation et la température dans la fibre optique. La plupart des interrogateurs actuels fournissent une mesure brute de déformation en supposant que la température soit constante. Cette hypothèse n'est pas vérifiée dans les conditions d'exploitation des structures. Pour les ouvrages hydrauliques en terre, la température de la structure varie généralement pendant la période de l'auscultation. Les causes sont d'ordre climatique avec des périodes de pluie, de sécheresse, des variations journalières et saisonnières de la température. Par ailleurs, des facteurs d'usure peuvent aussi apparaître et modifier la température le long de l'ouvrage ausculté comme l'infiltration d'eau par des fissures ou des fuites.

Ces éléments viendront polluer les informations enregistrées par les capteurs à fibre optique. L'analyse et l'interprétation de ces mesures sont alors cruciales pour une optimisation de la détection et localisation des déformations irréversibles dans la structure. Pour ce faire, on introduit les effets de diffusion et de dilatation d'un ouvrage en terre. En rapport avec ces phénomènes, des méthodologies basées sur le filtrage adaptatif et la séparation aveugle de sources sont utilisées pour estimer la déformation athermique dans la fibre optique.

III.1.1.1. Problématique

La fréquence Brillouin est sensible à la température relative dans la fibre optique, mais également à la déformation (Sikali, 2012). Bao *et al.* (Bao, 1995) ont relié ces trois mesurandes par la relation linéaire suivante :

$$\Delta \boldsymbol{\nu}_{\boldsymbol{BFO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = C_{\varepsilon}.\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) + C_{T}.\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-1)}$$

avec $\Delta \boldsymbol{\nu}_{\boldsymbol{BFO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ les fréquences Brillouin relatives entre les instants $\boldsymbol{t} = \{t_1, \dots, t_i, \dots, t_k\}$ et t_0 (l'instant de référence, état initial ou pour lequel la structure n'est pas encore soumise à une contrainte). Contrairement à la partie précédente, nous notons l'abscisse curviligne de la fibre optique $\boldsymbol{x}$, qui est en général confondue avec l'axe principal de la structure. Cela nous permet d'intégrer le référentiel de la structure, dans lequel $\boldsymbol{x}$ est la distance le long de la structure et $\boldsymbol{z}$ la profondeur.

Notons $\boldsymbol{x} = \{x_1, \dots, x_{N_x}\}$ le vecteur des points de discrétisation de l'axe de la fibre échantillonné avec un pas Δx telle que N_x = L / Δx, où L est la longueur d'auscultation de l'ouvrage. Si la fréquence Brillouin est estimée directement par un interrogateur B-OTDA industriel, le pas est de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Si l'algorithme d'amélioration du pas de mesure présenté dans le chapitre 2 de la Partie II est utilisé, alors le pas Δx sera au choix de l'utilisateur et donc possiblement centimétrique.

Les coefficients de calibration C_{ε} et C_T sont de l'ordre de 0.05 MHz/με, et 1 MHz/°C pour une fibre optique classique SMF 28 (Sikali, 2013).

Les appareils commerciaux de type B-OTDA (et notamment le DiTest d'Omnisens) fournissent une estimation de la déformation en négligeant les variations de température dans la fibre optique :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{B-OTDA}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = \frac{1}{C_{\varepsilon}} \Delta \boldsymbol{\nu}_{\boldsymbol{BFO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-2)}$$

Toutefois, lorsqu'une variation de température de +/- 1 °C apparait, cela implique une variation de fréquence Brillouin de 1 MHz, ce qui équivaut à une augmentation de la déformation de l'ordre de +/- 20 µm/m pour la distance considérée. Cette dépendance est donc problématique pour l'interprétation des mesures de déformations. Nous allons ainsi proposer des solutions pour caractériser la déformation athermique le plus finement possible.

III.1.1.2. Identification des sources thermiques influençant la déformation

En s'appuyant sur l'interprétation de phénomènes physiques régissant la thermométrie d'un ouvrage hydraulique en terre (Cunat, 2012 ; Khan, 2011 ; Guidoux, 2008), il s'avère que des facteurs internes et externes à la structure influencent la température dans la structure :

- Les éléments internes sont l'eau qui peut être issue de la nappe phréatique, du canal si une fuite existe, de l'infiltration de la pluie, etc. Nous notons les variations de température issues de ces éléments $\boldsymbol{T}_{int}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},\boldsymbol{z})$ qui dépendent du temps $\mathbf{t}=\{t_1,\dots,t_i,\dots,t_k\}$, de la distance $\boldsymbol{x}=\{x_1,\dots,x_{N_x}\}$ et de la profondeur $\boldsymbol{z}$.
- L'élément externe principal est l'air extérieur par diffusion de la chaleur dans la terre (Guidoux, 2008). Ce phénomène intervenant sur toute la longueur de la structure, il introduit des variations de température notées $\boldsymbol{T}_{ext}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{z})$. On les considère comme indépendantes de la distance $\boldsymbol{x}$, mais elle dépend de la profondeur $\boldsymbol{z}$ de la fibre optique dans la structure. La dilatation induite par ce phénomène est réversible et doit être corrigée de la déformation athermique de la structure.

Nous avons identifié les différentes sources possibles qui induisent des variations thermiques dans la structure. Nous explicitons maintenant la relation entre ces sources et la déformation mesurée. Nous souhaitons dans cette étude corriger les effets thermiques et les dilatations réversibles qui se manifestent dans les mesures de déformation.

Le phénomène de diffusion

En considérant le transfert thermique dans le câble à fibre optique négligeable, la température de la structure au niveau de la fibre optique est égale à la température dans la fibre optique. Nous explicitons le terme lié à la température de l'équation (III-1-1) par :

$$\Delta\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = \Delta\boldsymbol{T}_{int}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},\boldsymbol{z}) + \Delta\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{ext}}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{z})\ . \qquad \text{(III-1-3)}$$

Nous considérons que l'élément extérieur principal influençant la température dans la structure est uniquement la température de l'air extérieur. Celle-ci est notée $\boldsymbol{T}_{surf}(\boldsymbol{t})$ et peut être considérée comme un signal sinusoïdal, indépendant de la distance $\boldsymbol{x}$ le long de la structure (DeVries, 1963) :

$$\boldsymbol{T}_{surf}(\boldsymbol{t}) = \bar{T}_{surf} + a_{surf}\sin(\omega\boldsymbol{t} - \varphi)\ , \qquad \text{(III-1-4)}$$

avec $\bar{T}_{surf}$ la moyenne de la température à la surface, a_{surf} l'amplitude associée au signal sinusoïdal, $\omega = \frac{2.\pi}{T}$ sa pulsation en rad.s^{-1}, T la période en seconde associée et φ le décalage de phase.

En considérant la structure comme un massif de sol semi-infini, la résolution de l'équation de la chaleur permet d'estimer la température de la structure en fonction de la profondeur $\boldsymbol{h}$ (Chang, 1958) :

$$\boldsymbol{T}_{ext}(\boldsymbol{t},z) = \bar{T}_{surf} + a_{surf}.e^{-\frac{z}{\delta(\omega)}}.\sin\left(\omega\boldsymbol{t} - \varphi - \frac{z}{\delta(\omega)}\right), \qquad \text{(III-1-5)}$$

avec $\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2.\alpha_{dif}}{\omega}}$ la profondeur de pénétration dans le sol pour la pulsation ω (en rad.s^{-1}) et le coefficient de diffusion du matériau α_{dif} exprimé en m^2/s. Typiquement, pour la terre, le coefficient de diffusion est égal à 5.11x10^{-7} m^2/s (DeVries, 1963). La Figure 46 illustre la diffusion de la chaleur dans la terre. Pour avoir une idée des grandeurs en jeu, la longueur de pénétration pour un cycle journalier est inférieure au mètre pour de l'argile, alors que le cycle annuel se fera ressentir jusqu'à une quinzaine de mètres.

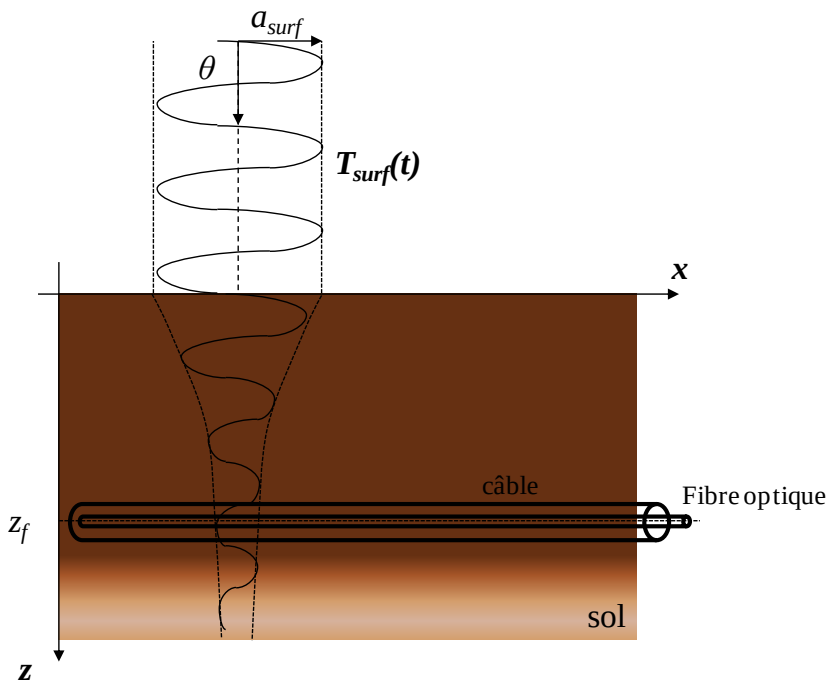


Figure 46 : Illustration de l'atténuation d'un signal sinusoïdal $\boldsymbol{T}_{ext}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{z})$ de période θ et d'amplitude a_{surf} en fonction de la profondeur $\boldsymbol{z}$. A z_f la position de la fibre, la température de la structure est donc influencée par un signal retardé et atténué du signal de température de surface. Ce phénomène ne dépend pas de $\boldsymbol{x}$ si la fibre optique est à une profondeur constante (contrôlée lors de l'installation du câble dans la structure) sur la longueur de la structure.

Le phénomène de dilatation

Lors d'une excitation thermique ΔT_{st}, un matériau se dilate ou se contracte d'une longueur longitudinale ΔL telle que la déformation du matériau issue de la dilatation ε_{dil} s'exprime par la relation suivante :

$$\varepsilon_{dil} = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha_{dil}.\Delta T_{st}\ , \qquad \text{(III-1-6)}$$

avec L_0 la longueur initiale du matériau en question et α_{dil} le coefficient de dilatation du matériau exprimé en µm/m/°C.

Yamauchi *et al.* (Yamauchi, 2010) ont mis en évidence l'influence de la dilatation d'un matériau sur les mesures réparties de déformation. Ils ont introduit cette notion dans l'équation (III-1-1) en définissant un nouveau coefficient de calibration C_T' défini par:

$$C_T' = C_T + C_\varepsilon . \alpha_{dil} \qquad \text{(III-1-7)}$$

Une méthode de calibration de ce coefficient est proposée en plaçant dans un bain d'eau thermostaté une fibre optique enroulée autour des principaux matériaux contenus dans la structure (Yamauchi, 2010). En l'occurrence, dans notre cas d'application, la structure étudiée est un ouvrage hydraulique en terre, type digue ou canal. Ces structures sont assez hétérogènes car constituées de limon, de terre humide, de sable, etc. Le coefficient de dilatation va alors évoluer selon le type de matériaux et la distance dans la fibre optique $\boldsymbol{x}$. Il est donc nécessaire d'étendre cette notion.

A l'aide des équations (III-1-5), et (III-1-7), nous pouvons alors réécrire l'équation (III-1-1) en explicitant les sources induisant des variations thermiques :

$$\Delta \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{B}FO}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = C_\varepsilon . \boldsymbol{\varepsilon}_{FO}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) + (C_T + C_\varepsilon . \boldsymbol{\alpha}_{dil}(\boldsymbol{x})) . (\Delta \boldsymbol{T}_{int}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) + \Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{ext}}(\boldsymbol{t})) \qquad \text{(III-1-8)}$$

En réorganisant les termes de l'équation (III-1-8), il est possible d'identifier les températures nécessaires pour corriger l'essentiel des variations thermiques influençant la mesure de déformation athermique $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{B-OTDA}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) = \widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) + \boldsymbol{\varepsilon}_{th}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) + \boldsymbol{\varepsilon}_{dil}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) \qquad \text{(III-1-9)}$$

Le deuxième terme est lié aux variations thermiques atteignant le câble, $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$, et exprimé par :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{th}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) = \frac{C_T}{C_\varepsilon}(\Delta \boldsymbol{T}_{int}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) + \Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{ext}}(\boldsymbol{t},z)) = \beta . \Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) \qquad \text{(III-1-10)}$$

Il est proportionnel à la température dans la fibre optique avec un coefficient $\beta = \frac{C_T}{C_\varepsilon}$ exprimé en µε/°C. Le troisième est lié à la dilatation dans la structure, $\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) = \boldsymbol{\alpha}_{dil}(\boldsymbol{x}) . \left(\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{ext}}(\boldsymbol{t}) + \Delta \boldsymbol{T}_{int}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z)\right) \qquad \text{(III-1-11)}$$

Dans notre cas d'étude, nous supposons l'effet de dilatation dû à une infiltration d'eau comme une déformation irréversible à détecter. On définit alors la déformation réversible due à la dilatation, $\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$, seulement proportionnelle à la température extérieure de la structure.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) = \boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{x},z) . \Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{surf}}(\boldsymbol{t} - \tau(z)) \qquad \text{(III-1-12)}$$

avec $\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{x},\mathrm{z}) = \boldsymbol{\alpha}_{dil}(\boldsymbol{x}) . e^{-\frac{\mathrm{z}}{\delta(\omega)}}$ exprimé en µε/°C. Nous introduisons également le retard $\tau(\mathrm{z}) = \varphi - \frac{\mathrm{z}}{\delta(\omega)}$ qui traduit le déphasage entre les températures à la surface et à la profondeur z.

La déformation athermique peut alors s'exprimer comme :

$$\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) = \boldsymbol{\varepsilon}_{FO}^{B-OTDA}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) - \boldsymbol{\varepsilon}_{th}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) - \boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t},z) \qquad \text{(III-1-13)}$$

Le but de ce chapitre est d'estimer la déformation athermique $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ dans la fibre optique. Nous étudions d'abord les solutions disponibles dans la littérature.

III.1.1.3. Les solutions existantes

Il existe plusieurs solutions en termes de mise en œuvre dans la structure, mais également en termes de nouvelles technologies optiques (Tableau 15).

Les combinaisons possibles entre interrogateurs et câbles

Dans un premier temps, des solutions existent dans le domaine de l'instrumentation. Les câbles à fibre optique sont composés de plusieurs fibres optiques multi et mono modes. Dans un même câble, mais sur deux fibres différentes, il est possible de connecter à la fois un interrogateur de type Raman mesurant seulement la température absolue dans la fibre et un interrogateur Brillouin. En appliquant l'équation (III-1-2), il est alors possible d'estimer la déformation dans la fibre optique $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}$ (Blairon, 2011) par :

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{FO}^{B-OTDA}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) - \frac{C_T}{C_\varepsilon}.\Delta\boldsymbol{T}_{FO}^{Raman}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-14)}$$

L'inconvénient majeur de cette méthode est de ne pas prendre en compte les variations dues aux phénomènes de dilatation de la structure.

Une seconde solution est l'utilisation d'un câble à fibre optique composé de deux fibres optiques seulement : la première est désolidarisée du câble et donc peut coulisser de manière longitudinale dans celui-ci. Cette solution est appelée « loose tube » et est donc seulement sensible à la température dans le câble. La deuxième fibre optique est liée mécaniquement au câble et va suivre les déformations subies par celui-ci. En mesurant la fréquence Brillouin dans ces deux fibres, il est alors possible d'estimer la température dans le loose tube et finalement d'approcher la déformation relative (Klar, 2014). Pour des déformations s'étendant sur une dizaine de mètres, l'ensemble du câble à fibre optique les subira et par conséquent le loose tube aussi, et ce, malgré le degré de liberté de la fibre dans le câble. C'est un inconvénient majeur de cette solution.

Une troisième solution possible est d'effectuer simultanément une mesure avec un interrogateur Brillouin et avec un interrogateur Rayleigh dans un même câble. Ceux-ci mesurent un décalage en fréquence (notée $\Delta\boldsymbol{\nu_R}$ pour la technologie Rayleigh) qui n'a pas la même sensibilité à la température et à la déformation dans la fibre optique. Comme les coefficients de calibration sont différents, il suffit de résoudre ce système d'équation à deux inconnues :

$$\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{T}_{FO}\\ \boldsymbol{\varepsilon}_{FO}\end{pmatrix} = \frac{1}{D}\begin{pmatrix}-C_\varepsilon^R & C_\varepsilon\\ C_T^R & -C_T\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\boldsymbol{\nu_B}\\ \Delta\boldsymbol{\nu_R}\end{pmatrix} \qquad \text{(III-1-15)}$$

avec C_T^R et C_ε^R les coefficients de calibration liés à la technologie Rayleigh, dont les valeurs classiques pour une fibre optique mono-mode standard de type G. 652 sont respectivement -1.25 GHz/°C et -0.15 GHz/µε (Sikali, 2012). Le coefficient D est le déterminant de la matrice, $D = C_\varepsilon\ .C_T^R - C_\varepsilon^R.C_T$.

Un interrogateur commercial fonctionne sur ce principe (Che-Hsien, 2008), avec des incertitudes de mesures de 0.5 °C et de 5 µε pour une résolution spatiale minimale de 2 cm et une portée de 20 km. Néanmoins, son coût reste très important (~ 400 k€) pour l'auscultation de plusieurs ouvrages.

Le changement des propriétés de la fibre optique

Plus récemment, des propositions ont été avancées pour diminuer le rapport des coefficients $\frac{C_T}{C_\varepsilon}$ et donc l'influence de la température. En dopant la fibre optique avec de l'aluminium, les propriétés acoustiques de la fibre optique au passage d'une onde lumineuse se trouvent changées. Sikali *et al.* (Sikali, 2012) ont réussi à déterminer les dopants nécessaires pour augmenter C_ε de 12 % tout en gardant C_T constant. Toutefois, les câbles à fibre optique associés restent à prototyper.

Tableau 15 : Les différentes solutions possibles pour la correction de l'effet de la température dans la fibre optique sur les mesures de déformations.

Méthodes	Technologie de(s) interrogateur(s)	Câble à fibre optique	Détermination de la déformation	Mise en œuvre de la solution
Combinaison d'interrogateurs / câbles	2 Brillouin	Un câble avec une fibre Loose – tube et l'autre liée mécaniquement	(III-1-14)	(Klar, 2014)
	Brillouin + Raman	1 câble avec 2 fibres optiques monomode et multimode	(III-1-14)	(Blairon, 2011)
	Brillouin + Rayleigh	1 câble avec deux fibres optiques monomode standard	(III-1-15)	(Yamauchi, 2010)
Dopage des propriétés de la fibre optique	Brillouin	Fibre G.652	Augmentation du C_ε	(Sikali, 2012)

III.1.2. Correction des effets thermiques sur les mesures de déformations

Au vu des inconvénients de chaque solution, EDF s'est orienté vers l'association d'une mesure de température et de déformation au sein d'un même câble à fibre optique avec des interrogateurs Brillouin et Raman (éq. III-1-14). En effet, cela permet de coupler les mesures de température (et donc l'analyse de la thermométrie de la structure pour la détection de fuite (Khan, 2011)) et la mesure de déformation.

Cependant, cette solution ne permet pas de corriger les effets de la dilatation dans la structure. En effet, cette dilatation est liée à la température de surface de la structure. En connaissant les coefficients de dilatation et de diffusion des matériaux, une solution serait de soustraire le terme $\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$. Cette solution n'est pas envisageable puisque ces coefficients sont difficilement estimables à cause de l'hétérogénéité des matériaux dans la structure.

Le problème se résume alors à un problème de soustraction de bruit. En ayant accès à la mesure de température dans la fibre optique et à celle de la surface de la structure, il est possible d'estimer la

déformation irréversible dans la fibre optique $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$. Dans un premier temps, nous étudions des algorithmes de filtrage adaptatif qui nécessitent des connaissances sur la nature du bruit. Dans un deuxième temps, en s'appuyant sur le fait que le bruit peut être modélisé comme sinusoïdal dans notre application, et sachant qu'aucune mesure de température n'est disponible, la méthode de Décomposition Modale Empirique (Huang, 1998) (DEM – ou Empirical Mode Decomposition en anglais) sera étudiée.

III.1.2.1. Soustracteur de bruit

La première méthode suppose que des mesures de température aient été acquises au sein de la fibre optique par un interrogateur Raman, mais également à l'extérieur de la structure.

III.1.2.1.1. Elimination de l'influence des facteurs internes

Si une mesure répartie de température est effectuée dans le même câble, il est possible de minimiser l'influence du bruit thermique dû aux facteurs internes, $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$, et ce, grâce à l'équation (III-1-12).

Trois possibilités existent :

- les coefficients de calibration C_T et C_ε sont disponibles dans la bibliographie selon le type de fibre optique composant le câble utilisé,
- la calibration de ces coefficients a été effectuée en laboratoire avant l'installation du câble à fibre optique,
- les coefficients de calibration C_T et C_ε sont identifiés *a posteriori* en minimisant l'erreur entre la déformation fournie par l'interrogateur B-OTDA et la température mesurée par l'interrogateur Raman. En effet, grâce à la méthode des moindres carrées, il est possible d'optimiser le coefficient β qui correspond au rapport des deux coefficients C_T et C_ε :

$$\beta = arg\min_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}}\left(\left\|\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{B-OTDA}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) - \beta.\Delta\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}^{Raman}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})\right\|_{\boldsymbol{2}}^{\boldsymbol{2}}\right) \qquad \text{(III-1-16)}$$

Pour évaluer β, il est nécessaire de centrer ces matrices autour de leur moyenne. Etant donné que nous utilisons la méthode des moindres carrés, si leur moyenne n'est pas nulle, cette méthode va surestimer le coefficient. Ensuite, à partir des matrices brutes, nous pouvons estimer la déformation non influencée par les facteurs internes : $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ (cf. (III-1-14)). Elle est égale à la somme de la déformation athermique et la déformation due à la dilatation :

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-17)}$$

III.1.2.1.2. Filtre de Wiener

Après avoir enlevé l'influence de la température interne de la structure, il est possible d'estimer l'influence des facteurs externes induisant des variations réversibles sur les mesures de déformation $\boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}$. Pour répondre à cette problématique, il existe alors deux classes de filtres optimaux :

- Le filtre de Wiener, dans le cas où les signaux considérés sont stationnaires (Wiener, 1949).
- Le filtre de Kalman, qui est la généralisation du filtre de Wiener pour des processus non stationnaires.

Dans notre cas, les signaux sont supposés stationnaires et donc nous pouvons utiliser le filtre de Wiener. On considère N+1 observations de la température $\boldsymbol{Y_0(t)}, \ldots, \boldsymbol{Y_N(t)}$, (pouvant être issus de plusieurs capteurs de température) telles qu'elles soient réelles, stationnaires au second ordre et centrées. La relation entre $\boldsymbol{Y}$ et $\boldsymbol{\varepsilon_{dil}^{rev}}$ est définie par l'intermédiaire du filtre de Wiener $\boldsymbol{W}$:

$$\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon_{dil}^{rev}}}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{W^t}.\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-17)}$$

Le bruit réversible est donc un mélange pondéré d'observations de température dans le milieu considéré ou dans son environnement. L'approche statistique du problème consiste alors à minimiser la moyenne statistique du carré de l'erreur entre la déformation fournie par le B-OTDA, $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}}$, et l'estimation du bruit $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon_{dil}^{rev}}}$ (Baudois, 1989). L'expression du filtre de Wiener $\boldsymbol{W}$, qui est optimal, en découle directement dans notre cas :

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{\Gamma_{YY}}^{-1}.\boldsymbol{\Gamma}_{\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}}\boldsymbol{Y}} \qquad \text{(III-1-18)}$$

avec $\boldsymbol{\Gamma_{YY}}$ la fonction d'autocorrélation des observations de température et $\boldsymbol{\Gamma}_{\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}}\boldsymbol{Y}}$ la fonction d'intercorrélation entre les observations de déformation $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}}(\boldsymbol{x})$ et les observations de température. En soustrayant l'estimation du bruit, il est alors possible d'estimer la déformation athermique irréversible $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon_{FO}}}$ comme schématisé sur la Figure 47.

Nous avons vu que la dilatation induit une déformation réversible proportionnelle à la température de surface à un coefficient et à un retard près. Ce retard $\tau(z)$ entre la référence de la température de la surface et la déformation doit être estimé pour corriger par la suite la déformation par filtrage de Wiener (Figure 47). Pour cela, la corrélation entre le signal utile et la référence de température permet de déterminer ce retard pour chaque distance z_k : il correspond à la position du maximum de l'intercorrélation.

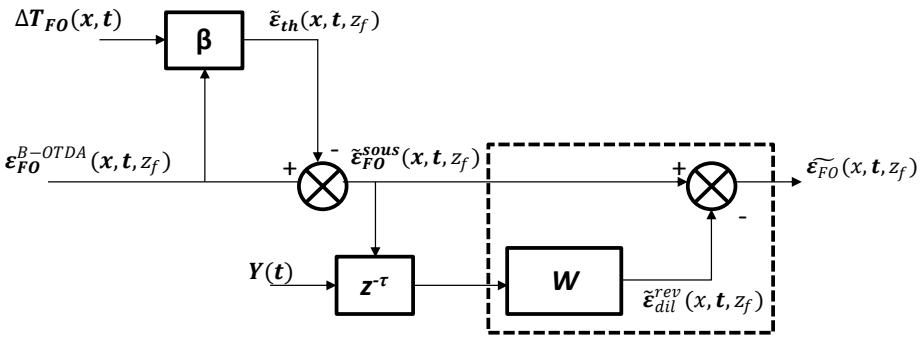


Figure 47 : Schéma de principe du soustracteur de bruit ayant comme données nécessaires : la déformation fournie par l'interrogateur B-OTDA industriel $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}}$, ainsi que des observations de la température de surface $\boldsymbol{Y}$ (ponctuelles, fibre optique, site distant, etc.) et au niveau de la fibre optique $\Delta\boldsymbol{T_{FO}^{Raman}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ fournies par l'interrogateur Raman.

III.1.2.1.3. Les différentes observations possibles de la température

L'utilisation de cette méthode exige la connaissance de $\boldsymbol{\Gamma_{YY}}$ et $\boldsymbol{\Gamma}_{\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}}\boldsymbol{Y}}$, sinon elle n'est pas applicable. Dans notre cas, l'élément limitant est l'observation de la température $\boldsymbol{Y}$. Dans le cadre des applications concernées par ce travail, plusieurs mesures de température peuvent être envisagées :

- La température de l'air à la surface de la structure peut être mesurée par *N* capteurs ponctuels classiques (type Pt 100) situés dans l'environnement proche de la structure.

- Elle peut être également estimable grâce à un capteur à fibre optique à la surface de la structure (dans un local abrité) couplé à un interrogateur Brillouin (en supposant que la déformation est constante selon le temps et la distance) ou Raman.
  Dans ce cas, il est possible de moyenner les températures mesurées pour minimiser le bruit de mesure, en fonction de la distance, que nous notons $\boldsymbol{y} = \overline{\Delta \boldsymbol{T}_{loc}}(\boldsymbol{t})$

III.1.2.2. La décomposition modale empirique

Dans le cas où aucune mesure de température à la surface de la structure ou dans son environnement proche n'est disponible, la séparation aveugle de sources peut être appliquée. Pour cela, comme le bruit est de type sinusoïdal, la Décomposition Modale Empirique (DME ou en anglais EMD – Empirical Mode Decomposition) est particulièrement intéressante à appliquer. En effet, le but de cet algorithme est de décomposer un signal temporel en différentes Fonctions Modales Intrinsèques (FMI et appelées également Intrinsic Mode Functions – IMF en anglais) qui représentent les modes oscillatoires présents dans le signal (Huang, 1998) :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{B-OTDA}}(x,\boldsymbol{t}) \cong \sum_{i=1}^{M} FMI_i(x,\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-19)}$$

avec *M* le nombre de modes contenus dans le vecteur $\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{B-OTDA}}(x,\boldsymbol{t})$ à *x* fixé. L'algorithme comporte plusieurs étapes :

- Identifier les extrema de $\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{B-OTDA}}(x,\boldsymbol{t})$
- En déduire les enveloppes des minima (resp. les maxima) par interpolation $\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{min}}(x,\boldsymbol{t})$ (resp. $\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{max}}(x,\boldsymbol{t})$)
- Calculer la moyenne des enveloppes $\boldsymbol{m}(x,\boldsymbol{t}) = (\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{max}}(x,\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{min}}(x,\boldsymbol{t}))/2$
- Soustraire la moyenne au signal : $FMI(x,\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{B-OTDA}}(x,\boldsymbol{t}) - \boldsymbol{m}(x,\boldsymbol{t})$
- Itérer tant que l'erreur entre le signal d'entrée et la somme des FMI est inférieure à un seuil de reconstruction du signal donné : de manière empirique, ce seuil est fixé à 10^{-17} (Huang, 1998). Le nombre d'itérations est égal à *M*, le nombre de modes dans le signal. De manière théorique, cette décomposition se rapproche d'un banc de filtres successifs (Flandrin, 2003 ; Oberlin, 2013).

Les sinusoïdes contenues dans le signal observé dues aux variations journalières et annuelles devraient être séparées dans une ou plusieurs FMI. En fixant un sous ensemble de *P* FMI telles qu'elles ne contiennent pas d'informations sur ces deux cycles, il est possible d'estimer la déformation athermique :

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{DME}}(x,\boldsymbol{t}) \cong \sum_{i \in P} FMI_i(x,\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-20)}$$

Cette décomposition, appliquée à chaque distance $\{x_1, \dots, x_{N_x}\}$, présente l'avantage de pallier à un manque d'observations de la température au sein ou dans l'environnement de la structure. Néanmoins, de l'information sur la déformation athermique peut être contenue au sein des *M-P* FMI enlevées du signal et peut donc fausser l'estimation de la déformation athermique. Le choix des *P* FMI se fait par l'utilisateur de manière empirique. La valeur de *P* peut changer entre les sites étudiés selon les facteurs

influençant les mesures. Cette technique est assez sensible pour une estimation correcte de la déformation athermique.

III.1.3. Etude de cas : la digue de Contrisson

L'application de ces méthodes sur les données expérimentales acquises sur une digue instrumentée par plusieurs capteurs à fibre optique (cf. I.4.2) a été effectuée avec l'aide de Marine Camps, dans le cadre d'un stage.

III.1.3.1. Présentation du site et des données

III.1.3.1.1. Présentation du site

Une digue industrielle, schématisée sur la Figure 48, de 100 m de longueur sur 3 m de hauteur a été instrumentée en 4 points d'intérêt : en crête de digue à une profondeur $z_f = 0.2$ m, au milieu et en bas du talus, à une profondeur z_f supérieure à 1 m et enfin en pied de digue à la profondeur $z_f = 0.2$ m. Le câble Geodetect est couplé avec un interrogateur Brillouin (le DiTest d'Omnisens) et un interrogateur Raman. En termes d'instrumentation, les fibres optiques sont soudées entre elles dans des boîtiers prévus à cet effet. Cela permet d'avoir une ligne optique continue et opérationnelle pour effectuer des mesures avec un rapport signal sur bruit maximal. La présentation du site est détaillée dans la section I.4.2.

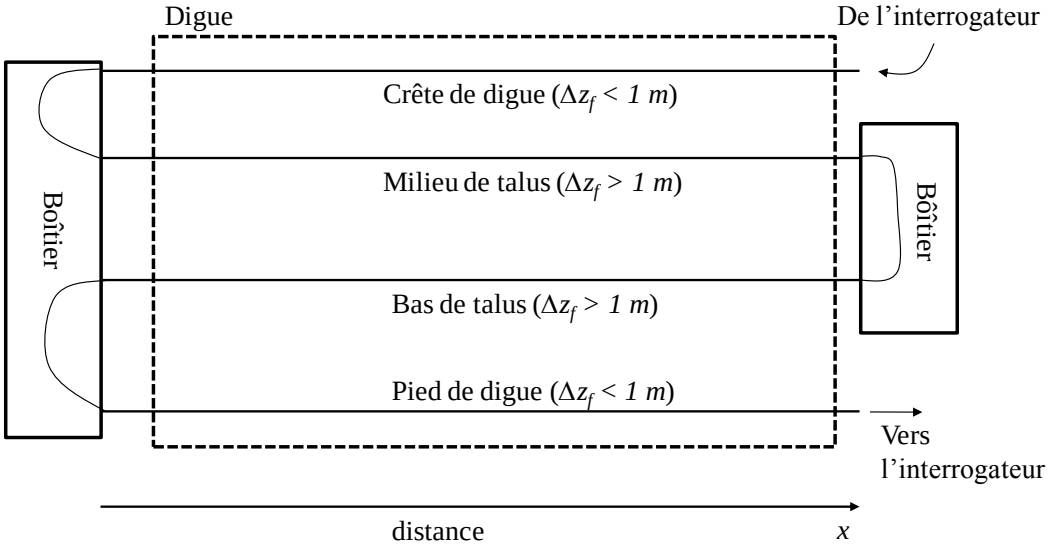


Figure 48 : Schéma de la ligne optique pour la surveillance de la digue de Contrisson par un capteur à fibre optique à 4 points d'intérêt : en milieu et bas de pente, en crête et pied de digue. Deux boîtiers de soudure permettent d'avoir une ligne optique continue et opérationnelle pour une mesure avec des interrogateurs Brillouin et Raman.

La surveillance de la digue s'est effectuée pendant 2 mois en continu avec un échantillonnage en temps d'une mesure toutes les heures. La fréquence d'échantillonnage temporel du signal est donc f_e = 1 hrs^{-1}. Pour les deux interrogateurs, le pas d'échantillonnage spatial est de 50 cm. Par souci de concision, seule l'analyse des données issues du câble en pied de digue est présentée dans cette partie. L'analyse de l'ensemble des données pour les différents niveaux d'observations de la déformation dans la digue est présentée dans l'Annexe D. Les résultats de cette analyse sont toutefois synthétisés dans la conclusion des différentes méthodes.

III.1.3.1.2. Données de déformation

Les données de déformations sont issues de l'interrogateur B-OTDA avec un pas de mesure de 50 cm pour une base de mesure de 1 m et une longueur d'auscultation de 100 m. Comme aucun spectre Brillouin n'a été enregistré, l'algorithme de l'amélioration du pas de mesure n'a pas pu être appliqué. Nous n'utilisons donc que le signal de déformation fourni par l'interrogateur, $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}(x,t)}$ (cf. eq. (III-1-2)).

La Figure 49 (a) illustre la matrice de déformation en fonction du temps sur la période du 26/06 au 20/08 (2 mois) et de la distance pour le pied de digue. Différentes zones sont à distinguer (matérialisées par des flèches) : à 3 m, elle diminue de 50 µm/m à -154 µm/m en l'espace de 15 jours (du 15/08 au 20/08) ; entre 10 m et 20 m ainsi qu'entre 35 m et 55 m, des variations réversibles liées à un cycle journalier apparaissent sur la mesure de déformation ; autour de 95 m, de fortes déformations apparaissent jusqu'à atteindre 525 µm/m à la fin de la période de mesure.

Les variations réversibles sont mises en évidence en projetant la matrice sur l'axe temporel (Figure 49 (b)) : la moyenne de la matrice présente des variations journalières à une fréquence normalisée $f_{jrs} = 2\pi/(T_{jrs} \times f_e) = 0.26$. Deux mois de mesures ont été effectuées, la variation annuelle n'est pas perceptible sur cette courte période. Néanmoins, des variations saisonnières réversibles peuvent être identifiées par plusieurs maxima locaux en juillet (matérialisés par des flèches le 06/07, 18/07 et 26/07).

Nous appliquons dans la suite les méthodes proposées pour essayer de distinguer les variations athermiques et le bruit thermique.

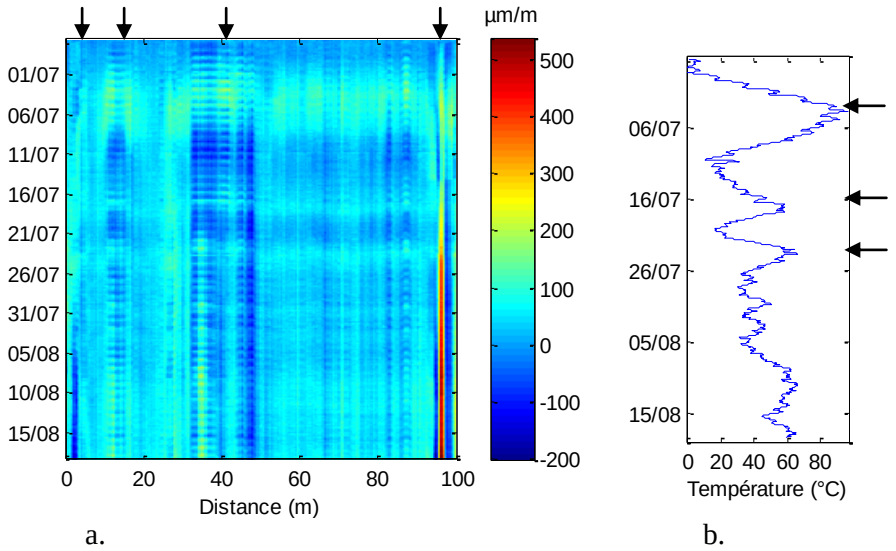


Figure 49 : (a) Mesure de déformation fournie par l'appareil Brillouin (matrice $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}(x,t)}$) au pied de la digue en fonction du temps $\boldsymbol{t}$ et de la distance $\boldsymbol{x}$. (b) Projection de la matrice de déformation sur l'axe temporel.

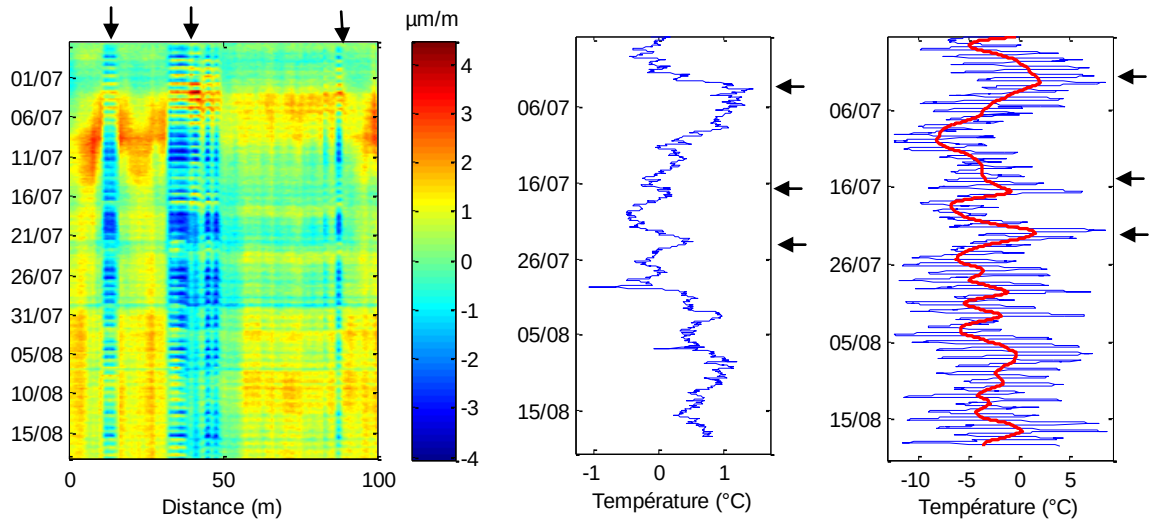
III.1.3.1.3. Données de température

Les données réparties de température dans la fibre optique

Les données de température réparties $\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{Raman}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ sont acquises par un interrogateur Raman avec une résolution de 50 cm. La Figure 50 représente la température relative dans la fibre optique. Logiquement, la corrélation entre les déformations brutes fournies (Figure 49) et les mesures de températures sont fortes. On retrouve alors les variations thermiques au pied de la digue dans les zones entre 10 m et 20 m ainsi qu'entre 35 m et 55 m. Ce sont des anomalies thermiques qui peuvent être liées à des fuites.

Les données de température Météo France

Aucun capteur de température n'a été installé sur le site dans la période de surveillance. Néanmoins, une station Météo France située à 5 km a permis de relever les températures avec un pas temporel d'une heure (Figure 50. b.). Les variations hebdomadaires sont mises en évidence en filtrant ces mesures de température par un filtre passe-bas (fréquence de coupure normalisée à f_{jrs}= 0.26). A partir de ces données de température, nous essayons de corriger le bruit thermique des mesures de déformations.



a. b. c.

Figure 50 : Mesures de température (°C) réparties fournies par l'interrogateur Raman (matrice $\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{Raman}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$) au pied de la digue. Les flèches indiquent les anomalies thermiques dans la digue. b. Moyenne de l'évolution temporelle des températures dans la fibre optique. Les flèches indiquent les variations communes avec la mesure de déformation c. Température (°C) fournie par une station Météo France située à 5 km du site de Contrisson : la tendance (moyenne locale) est mise en évidence en rouge.

Etude de corrélation entre la déformation et la température de l'air

La thermométrie de la digue est soumise aux variations de la température de l'air extérieur à cause du phénomène de diffusion. Le coefficient moyen de corrélation entre la déformation et la température de l'air sur toutes les distances est de 0.4. Cette valeur signifie que le profil de déformation en fonction du temps a des similitudes avec le signal de la température : les variations journalières et saisonnières. Un

retard également dû à la diffusion apparaît entre la température et la déformation. Le signal de température doit donc être retardé en fonction de la position du maximum de la corrélation afin de pouvoir mieux corriger l'influence de la température.

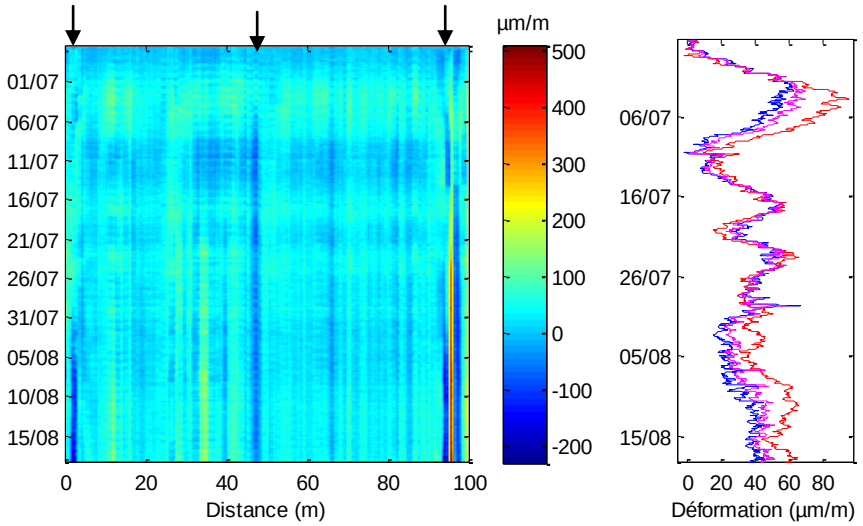
III.1.3.2. Applications des méthodes proposées

Le soustracteur de bruit est d'abord appliqué sur les mesures de déformations avec comme référence la mesure de température répartie dans la fibre optique acquise par l'interrogateur Raman et la mesure de l'air (station Météo France). Les choix des références de températures sont ensuite discutés. Enfin, une méthode de séparation de sources aveugle est testée et comparée avec le soustracteur de bruit.

III.1.3.2.1. Soustraction de la température interne

Notre but est d'estimer la déformation athermique sur les différentes lignes optiques. Nous appliquons donc la méthode proposée du soustracteur de bruit. Nous présentons ici les résultats pour la ligne en pied de digue. Les autres résultats et analyses sont disponibles dans l'Annexe C.

Le coefficient β est optimisé à 28.4 με/°C en utilisant la méthode des moindres carrés (eq. (III-1-16)). Il reste dans l'ordre de grandeur de celui de la littérature qui est $\beta^{littérature} = 20$ με/°C. Cet écart peut s'expliquer par l'influence du type de gaine de protection, mais surtout par l'influence de la température de l'air. Pour les câbles enterrés à une profondeur inférieure au mètre, ce terme a été optimisé à 28.4 με/°C en pied de digue et 30.99 με/°C en crête de digue (Annexe C). Pour une variation de 1°C, cela induit environ 30 µm/m de déformation. Nous pensons que cette augmentation est due aux effets de dilatation dans la terre. Lorsque la profondeur du câble est assez importante, le volume de matériaux ne se dilate que très peu sous l'effet de la température.



a. b.

Figure 51 : a. Estimation de la déformation dans la fibre optique $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{t})$ par soustraction de la température dans la fibre optique au pied de la digue avec β optimisé à 28.4 με/°C. b. Projection sur l'axe temporel de : $\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{FO}}^{\boldsymbol{B-OTDA}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ en rouge, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$: en bleu pour $\beta^{littérature} = 20\ \mu\varepsilon/°C$ et magenta pour $\beta^{opt} = 28{,}4\ \mu\varepsilon/°C$ (méthode des moindres carrées).

Le résidu entre la mesure de déformation fournie par le B-OTDA et la mesure de température dans la fibre $\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$, calculé avec la relation (III-1-17), est affiché sur la Figure 51. a. Le résultat de la

soustraction est peu affecté par l'écart entre les coefficients (Figure 51. b.). Il est intéressant de noter que la déformation obtenue ne présente plus que deux anomalies en distance à x = 5 m et x = 95 m déjà remarquées. Mais une troisième anomalie apparait à x = 46 m. En fonction du temps (Figure 51. b.), il reste encore des variations réversibles dues à la dilatation thermique de la structure, que nous avons mises en évidence grâce à l'équation (III-1-14).

III.1.3.2.2. Soustraction de bruit : Filtre de Wiener

Afin de supprimer les effets de la dilatation de la structure, la deuxième étape consiste à appliquer le filtre de Wiener avec comme référence la température à la surface de la structure. La température de l'air mesurée par Météo France, à 5 km du site, est choisie comme référence. Nous verrons par la suite l'estimation de la déformation avec d'autres références. Pour chaque x, le retard entre cette température et la déformation $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ est estimé et corrigé.

La Figure 52 montre l'estimation de la déformation athermique dans la fibre optique $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$. Le filtre de Wiener est basé sur la corrélation entre le bruit et le signal utile. Celui-ci permet de séparer de manière optimale les variations dues à la température de l'air par effet de diffusion et dilatation à chaque distance. Pour x = 95 m, comme les signaux de déformation et de température sont très peu corrélés, la déformation ne sera que très peu corrigée : le maximum est toujours de 525 µm/m. En projetant l'estimation de la déformation sur l'axe temporel, nous obtenons une signature globale de la déformation en fonction du temps (Figure 53, en vert) qui n'évolue que très peu autour de sa moyenne : 24,5 µm/m. La déformation thermique totale est également affichée dans la Figure 52 (b). La déformation thermique totale s'exprime comme la somme de tous les termes que nous avons supprimés :

$$\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{th}}^{\mathrm{tot}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{th}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{dil}^{rev}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t}) \qquad \text{(III-1-21)}$$

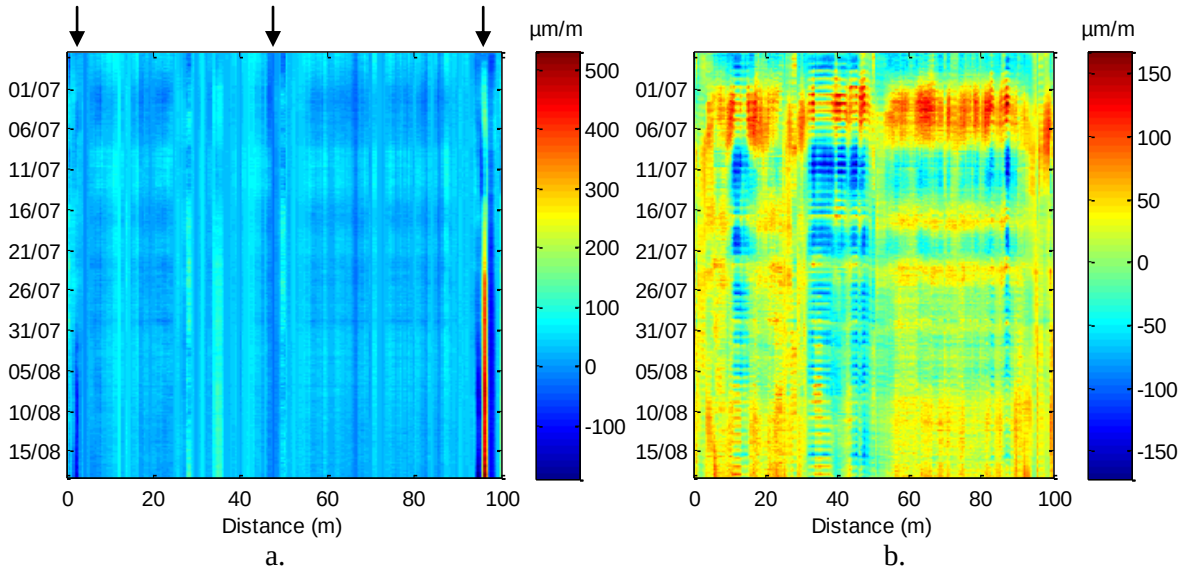


Figure 52 : a. Estimation de la déformation irréversible $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ en µm/m par soustracteur de bruit en µm/m. b. Estimation des déformations thermiques totales $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{th}}^{\mathrm{tot}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ en µm/m.

III.1.3.2.3. Discussions sur les références de température

Température de la structure dans l'environnement du câble

Nous étudions ici le cas où aucune mesure de température dans le câble n'est disponible. Ce cas est très intéressant d'un point de vue industriel puisque l'auscultation ne pourrait se faire qu'avec un seul interrogateur, le B-OTDA.

L'étape d'optimisation du coefficient β ne peut alors pas être effectuée. Dans le cas où la fibre optique est proche de l'interface structure / air, la température de la digue est proche de la température de l'air. Le filtre de Wiener est alors capable de corriger l'essentiel de la déformation thermique (Figure 53, en bleu). Néanmoins, comparée au cas idéal (Figure 53, en vert), la moyenne de la déformation est plus importante et des variations thermiques demeurent.

Si la profondeur du câble est plus importante, l'influence de la température de l'air est moindre sur la température interne de la structure (Annexe C). La corrélation entre les mesures de la température extérieure et de la température de la fibre optique est plus faible et l'étape du filtre de Wiener n'impacte que très peu l'estimation de la déformation athermique. L'étape de soustraction reste dans ce cas primordiale pour supprimer les déformations thermiques dues aux facteurs internes (fuite, remontée nappe phréatique, etc.).

Température de l'air à la surface de la structure

Si aucun capteur de température n'est disponible sur site, il est possible de supposer que la température dans les locaux de soudure est proche de celle à la surface de la structure. Pour cette étude de cas, la mesure de température dans le câble est disponible grâce à l'interrogateur Raman.

Deux possibilités peuvent être alors envisagées. Comme l'interrogateur Raman est disponible, la température dans les boîtiers de soudure, notée $\overline{\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{loc}}}^{\boldsymbol{Raman}}(\boldsymbol{t})$, peut être directement mesurée. Sinon, en supposant que la déformation du câble soit constante dans les boîtiers de soudure, la température, notée $\overline{\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{loc}}}^{\boldsymbol{Brillouin}}(\boldsymbol{t})$, peut être déduite uniquement grâce à l'interrogateur Brillouin. Sur notre jeu de données, nous avons conclu que la première possibilité présente un meilleur coefficient de corrélation (0.92) avec la température de Météo France que la deuxième possibilité (0.89).

Afin de pouvoir analyser ce cas, ces deux mesures sont utilisées en tant que référence du bruit dans la méthode de soustraction de bruit présentée à la section 1.2.1. Les résultats sur les données de Contrisson sont présentés en Figure 53, courbes en noir et magenta. En utilisant uniquement la mesure $\overline{\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{loc}}}^{\boldsymbol{Brillouin}}(\boldsymbol{t})$ fournie par l'interrogateur Brillouin, l'algorithme ne permet pas de corriger les variations thermiques présentes. En utilisant la mesure $\overline{\Delta \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{loc}}}^{\boldsymbol{Raman}}(\boldsymbol{t})$ des boîtiers fournie par l'interrogateur Raman, les variations thermiques sont mieux corrigées. En conclusion, plus la température de référence est corrélée avec la température de l'air, plus le filtre optimal sera efficace pour la correction des variations thermiques.

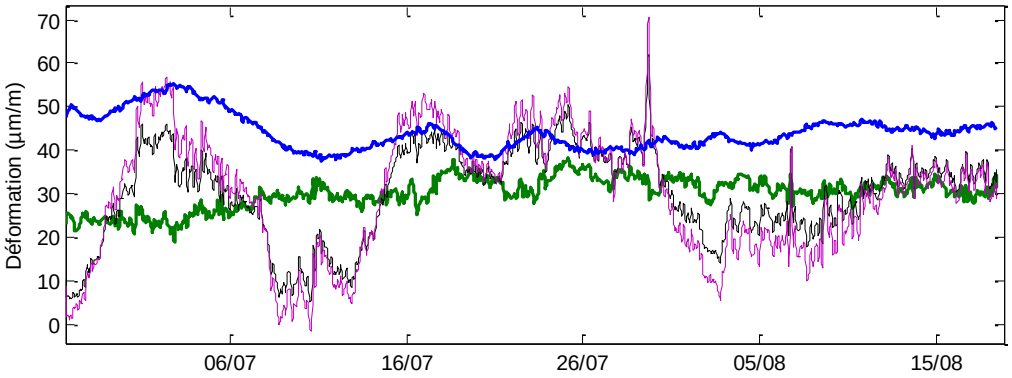


Figure 53 : Projections sur l'axe temporel des déformations estimées dans les cas où : aucune mesure de température dans la fibre optique n'est disponible, mais la température de référence de l'air est mesurée par Météo France sur un site à 5km (en bleu) ; une mesure de température de la fibre est disponible et les références de température sont : la température de l'air mesurée par Météo France à 5 km du site (en vert) ; $\overline{\Delta \boldsymbol{T}_{loc}}^{\boldsymbol{Raman}}(\boldsymbol{t})$ en noir et $\overline{\Delta \boldsymbol{T}_{loc}}^{\boldsymbol{Brillouin}}(\boldsymbol{t})$ en magenta.

III.1.3.2.4. Décomposition modale empirique

Dans le cas, où aucune mesure de température extérieure ou interne de la structure n'est relevée, la décomposition modale empirique peut être appliquée. L'algorithme de décomposition du signal permet de séparer les différents comportements sinusoïdaux contenus dans le signal.

Pour illustrer le procédé de la DME, la décomposition du signal de déformation mesuré à x = 55 m est représentée dans le domaine temporel en Figure 54 (a) et dans le domaine fréquentiel en Figure 54 (b). Le premier mode comprend le bruit haute fréquence du signal. Le pic en fréquence (matérialisé par une flèche) à 0.023 (fréquence normalisée) correspond au cycle journalier contenu dans le signal de départ. Celui-ci est retrouvé dans les FMI_2 et FMI_3. Le cycle saisonnier est distinguable dans les FMI_{4-5}. Le critère pour l'estimation du signal athermique est donc de garder seulement les deux dernières FMI pour séparer les différentes variations dues au comportement thermique de la structure tel que $P = \{ M-1, M \}$.

L'algorithme est appliqué à l'ensemble de la matrice de déformation. L'estimation de la déformation athermique est alors montrée dans la Figure 55 (a). A x = 95 m, la valeur maximale de la matrice est alors estimée à 506 µm/m. L'algorithme n'influe donc peu lorsque la température n'est pas corrélée avec la déformation. Une troisième zone est repérée entre 30 m et 50 m. Elle correspond à des variations thermiques repérées dans les températures réparties de la fibre optique. Comme celles-ci ne sont pas nécessairement sinusoïdales, de l'information sur la température n'est pas complètement corrigée.

En projetant le résultat sur l'axe temporel, on remarque que l'écart entre l'estimation du soustracteur de bruit (Figure 55. b. – en vert) et celle de la décomposition modale empirique (Figure 55. b. – en noir) est assez grand. Certaines variations thermiques dues à la dilatation du matériau subsistent. Néanmoins, comme aucune mesure de déformation de référence n'est disponible, il est difficile de quantifier les erreurs d'estimation des algorithmes présentés. Les variations thermiques sont estimées dans la Figure 55 (c) : les variations saisonnières et journalières sont nettement identifiables.

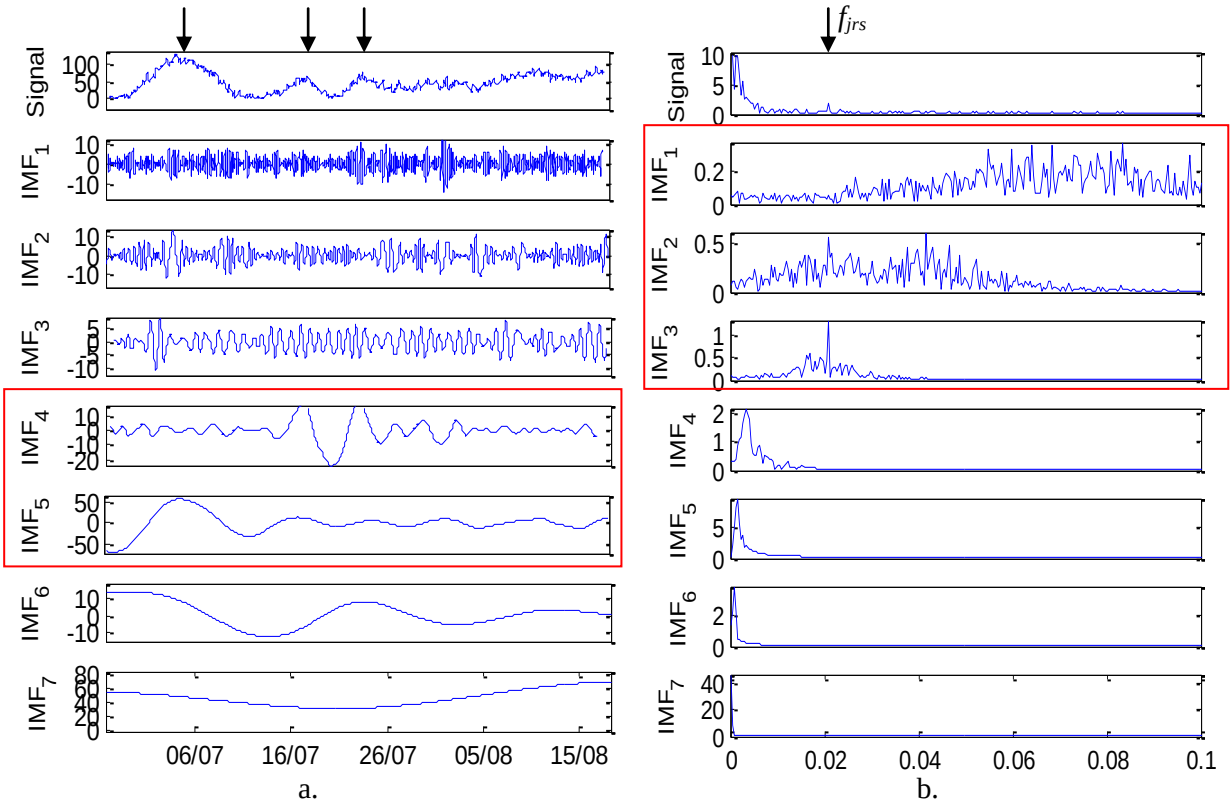


Figure 54 : Décomposition modale empirique du signal de déformation au pied de la digue pour x = 55m. Représentation temporelle (a) et spectrale (b) des modes fréquentiels (FMI) du signal. Les encadrés rouges permettent de distinguer les variations contenus dans le signal de départ.

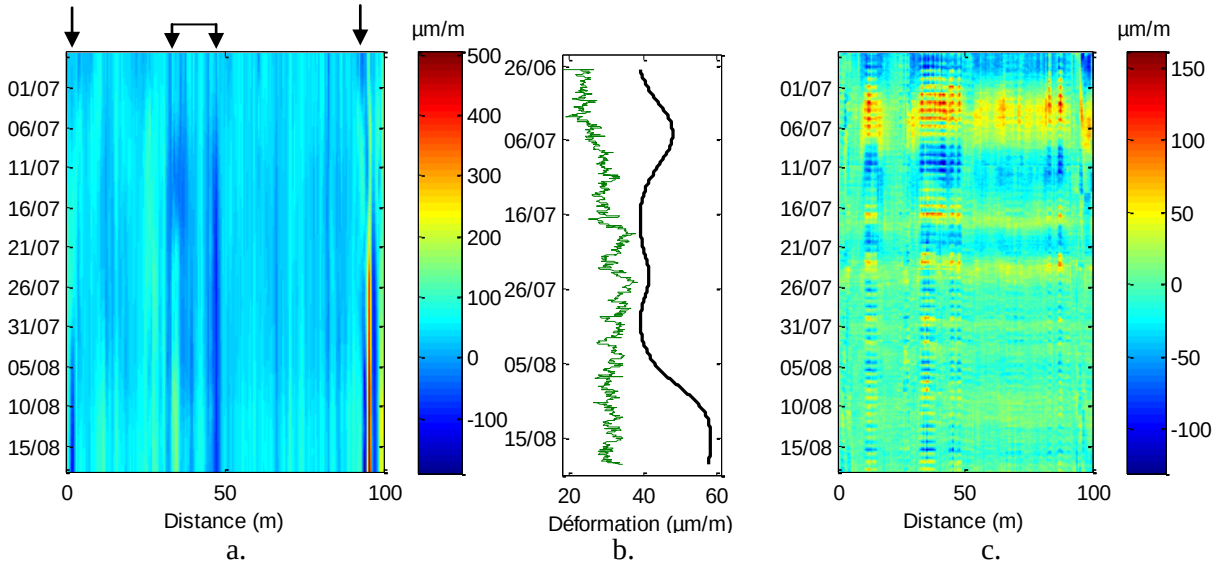


Figure 55 : Estimation de la déformation athermique par décomposition modale empirique (a). L'ensemble P fixé empiriquement à l'ensemble $\{M\text{-}1, M\}$ permet d'enlever les composantes sinusoïdales du signal. La projection sur l'axe temporel de cette déformation athermique est affichée en noir (b) – la projection de l'estimation de la déformation athermique par filtre de Wiener est affichée en vert sur la même figure. (c) Estimation de la déformation thermique totale grâce à la décomposition modale empirique.

III.1.4. Conclusion et perspectives

La fréquence Brillouin est proportionnelle à la déformation et à la température dans la fibre optique à des coefficients de calibration près. Afin de déterminer la déformation athermique d'une structure hydraulique en terre, nous avons étudié les phénomènes influençant sa thermométrie : la diffusion et la dilatation des matériaux qui en découle. Les différentes sources thermiques sont : les fuites, la température de l'air, de la structure, de l'eau du canal, etc. L'interprétation des mesures de déformation fournies par des interrogateurs B-OTDA peut être biaisée.

Pour éviter cela, nous avons explicité les termes de la relation entre la fréquence Brillouin, les déformations athermiques et thermiques au sein de la structure et leurs sources. Pour améliorer l'analyse des mesures de déformation, deux méthodes de correction de l'effet thermique, schématisés sur la Figure 56, ont été proposées :

- La soustraction de bruit avec référence de température. Cette méthode requiert deux étapes. La première est d'estimer la proportion de la température de la fibre optique dans les mesures de déformation en optimisant un coefficient de calibration par des méthodes de moindres carrés. En soustrayant cette partie à la mesure de déformation, l'effet de dilatation de la structure est mis en évidence. La deuxième étape est basée sur l'utilisation d'un filtre de Wiener pour corriger ce bruit résiduel grâce à l'utilisation d'une mesure de température à la surface de la structure.
- La décomposition modale empirique. Si aucune mesure de référence n'est disponible, alors cette solution permet de séparer le signal utile en plusieurs modes oscillants comprenant les variations thermiques de la structure supposées sinusoïdales. En fixant un seuil de reconstruction empirique, une sélection des modes utiles permet d'estimer la déformation athermique.

Ces méthodes ont été comparées sur des données réelles acquises sur une digue instrumentée à plusieurs niveaux. Nous présentons une conclusion commune pour les différentes profondeurs instrumentées de l'ouvrage.

Quelle que soit la profondeur dans la structure, les mesures de déformations sont influencées par des facteurs thermiques externes (température de l'air) et internes (fuites, température de la structure). Plus le câble est profond (par exemple dans le talus dans notre application), moins l'influence des facteurs externes sera prédominante. Il est alors primordial d'avoir une mesure de température répartie dans le câble afin de pouvoir enlever les influences des facteurs internes (1ère étape du soustracteur de bruit). La deuxième étape impacte peu, voire presque pas, l'estimation de la déformation athermique puisque les déformations ne sont que très peu corrélées avec la température extérieure.

Lorsque le câble est proche de la surface (en pied et crête de digue), la température de l'air est plus corrélée aux mesures de déformations. Le filtre optimal est alors efficace selon la référence de température de l'air extérieur. La température à la surface de la structure a été mesurée à 5 km du site par Météo France. D'autres mesures de température ont été testées : fournies par l'interrogateur Brillouin ou Raman dans des boîtiers de soudure optique. En testant l'influence de chaque référence, nous en avons déduit que la température mesurée par Météo France est plus efficace pour enlever les variations thermiques saisonnières. Cela peut s'expliquer par la position des boîtiers de soudures, qui sont recouverts d'une plaque en métal qui va influencer la température dans le boîtier de soudure. Il serait intéressant de valider cette proposition de combinaison optimale en utilisant un capteur ponctuel dans l'environnement proche de la structure (de type Pt 100).

La décomposition modale empirique présente l'avantage d'estimer une déformation irréversible sans mesure de température de référence. Lorsque les déformations sont moins influencées par les températures extérieures (pour des profondeurs de fibre optique supérieures au mètre), alors l'estimation de la déformation est très proche de la solution du soustracteur de bruit. La seule différence est de ne pas soustraire la température dans la fibre optique. Plusieurs points nuancent son utilisation : un critère de reconstruction doit être fixé empiriquement par l'utilisateur pour enlever les composantes sinusoïdales. Toutefois, de l'information utile peut être contenue dans ces composantes et donc supprimée.

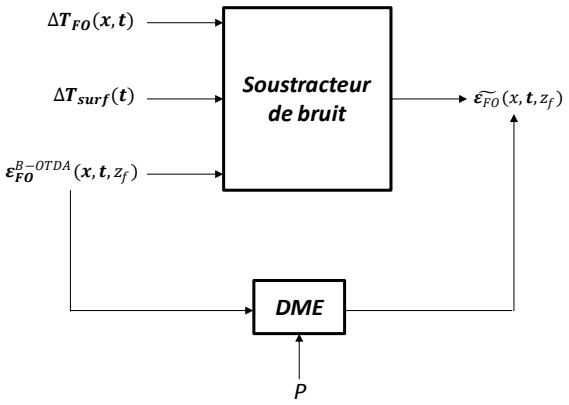


Figure 56 : Les deux méthodes proposées permettant d'estimer la déformation irréversible dans la fibre optique à partir de l'information fournie par un interrogateur B-OTDA industriel : le soustracteur de bruit qui nécessite d'avoir comme entrée la température dans la fibre ainsi que la température à la surface de la structure ; la décomposition modale empirique qui nécessite un critère *P* de reconstruction du signal à fixer empiriquement.

Nous n'avons pas pu comparer quantitativement ces estimations puisqu'aucune mesure de déformation ponctuelle de référence n'a été effectuée. Afin de valider ces méthodes, une expérience dans des conditions semi-contrôlées dans laquelle un câble à fibre optique serait installé dans de la terre (à une profondeur entre 25 cm et 50 cm) et dont les caractéristiques thermiques sont contrôlées devrait être réalisée. Les fibres contenues dans le câble seraient couplées avec des interrogateurs Brillouin et Raman. Des capteurs ponctuels de déformation classiques (type LVDT) espacés de 50 cm permettront de mesurer la déformation réelle dans l'axe longitudinal des câbles. L'expérience devrait être réalisée en extérieur pour pouvoir disposer de l'influence de l'air sur plusieurs semaines. Une sonde de température devrait être installée à la surface de la structure et une autre dans un voisinage (quelques km). Il serait intéressant de créer une infiltration d'eau artificielle ainsi qu'un déplacement contrôlé pour générer une perturbation en déformation. Nous ne l'avons pas mise en œuvre, mais cette expérience devrait permettre de comparer quantitativement les différentes méthodes proposées dans cette étude. L'étape suivante est alors de pouvoir interpréter ces déformations athermiques pour pouvoir estimer le déplacement dans la structure.

Chapitre 2 :

Quantification des déplacements grâce à un capteur à fibre optique

III.2.1. Introduction 112
III.2.2. Influence de la chaîne de mesure sur la mesure de déformation 112
III.2.2.1. Introduction de la fonction de transfert mécanique du câble à fibre optique 112
III.2.2.2. Suivi de l'évolution des fissures 113
III.2.3. Quantification de tassements dans un ouvrage hydraulique en terre 114
III.2.3.1. Modèles empiriques de déplacements 115
III.2.3.1.1. Modèle gaussien 115
III.2.3.1.2. Modèle gaussien modifié 115
III.2.3.1.3. Modèle pseudo-Voigt 116
III.2.3.2. Expression de la déformation dans la fibre optique 116
III.2.3.3. Procédé d'estimation du déplacement 118
III.2.3.3.1. Inversion paramétrique 118
III.2.3.3.2. Estimation de la profondeur de la cavité 118
III.2.3.4. Application sur les données du CER de Rouen 120
III.2.3.4.1. Présentation de l'expérience 120
III.2.3.4.2. Estimation de la profondeur et du tassement 121
III.2.3.4.2.1. Confrontation des modèles 121
III.2.3.4.2.2. Estimation de la profondeur et du tassement 122
III.2.3.4.3. Influence de la chaîne de mesure 125
III.2.3.4.3.1. Mise en évidence des FTM des câbles 125
III.2.3.4.3.2. Influence de la FTM sur l'estimation du déplacement 126
III.2.3.4.3.3. Influence de l'interrogateur 127
III.2.4. Conclusion et perspectives 128

III.2.1. Introduction

Après avoir développé des méthodes de reconstruction de profils de fréquence Brillouin avec un pas centimétrique (Partie II-2), la relation entre la fréquence Brillouin, déformation et température a été explicitée pour la surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre (Partie III-1). Les méthodes alors développées ont permis de corriger les effets thermiques dans la structure pour estimer la déformation athermique. Celle-ci est la conséquence de l'apparition de défauts pathologiques pouvant aggraver la stabilité d'un ouvrage : les fissures et tassements. Le principal but de ce chapitre est de quantifier les déplacements induits par ces événements.

Dans un premier temps, nous introduisons l'influence de la fonction de transfert de la chaîne de mesure sur les mesures de déformations. Nous verrons alors des moyens de quantification de fissures grâce à ce modèle.

Dans un deuxième temps, l'étude se portera sur l'estimation du déplacement dans un ouvrage en terre. Récemment, dans le domaine d'application des tunneliers, des avancées suggèrent qu'il est possible d'estimer un déplacement vertical issu de la création d'une cavité souterraine, dont la profondeur est maîtrisée. Dans notre application, un fontis, ou un renard hydraulique engendrant les déplacements se développent à des profondeurs inconnues dans la structure. Nous établissons un procédé d'estimation de cette profondeur. Grâce à celui-ci, une méthodologie d'estimation du déplacement est alors possible grâce aux capteurs à fibre optique. Nous la testons sur l'expérience du CER de Rouen et confrontons les résultats à des capteurs de référence. L'influence de la fonction des câbles à fibre optique et des interrogateurs sur l'estimation du déplacement est discutée.

III.2.2. Influence de la chaîne de mesure sur la mesure de déformation

III.2.2.1. Introduction de la fonction de transfert mécanique du câble à fibre optique

Pour l'utilisation de capteurs à fibre optique dans des applications industrielles, le câble à fibre optique est renforcé pour protéger la fibre optique des agressions extérieures mécaniques ou chimiques, mais également pour assurer l'intégrité de la ligne optique. A cause de l'effet de cisaillement du câble, la déformation dans la fibre optique diffère de la déformation au sein de la structure (Ansari, 1998). Cela se traduit par l'introduction d'une fonction de transfert du câble qui dépend des propriétés mécaniques de ses composants et de l'interface entre le milieu et celui-ci (présence de résine, point d'ancrage, etc. (Figure 57). La fonction de transfert mécanique (FTM) traduit les mécanismes d'efforts à travers les différents matériaux et au niveau des interfaces. Elle dépend donc des épaisseurs, des propriétés élastiques des matériaux constitutifs du câble et des lois de comportements aux interfaces.

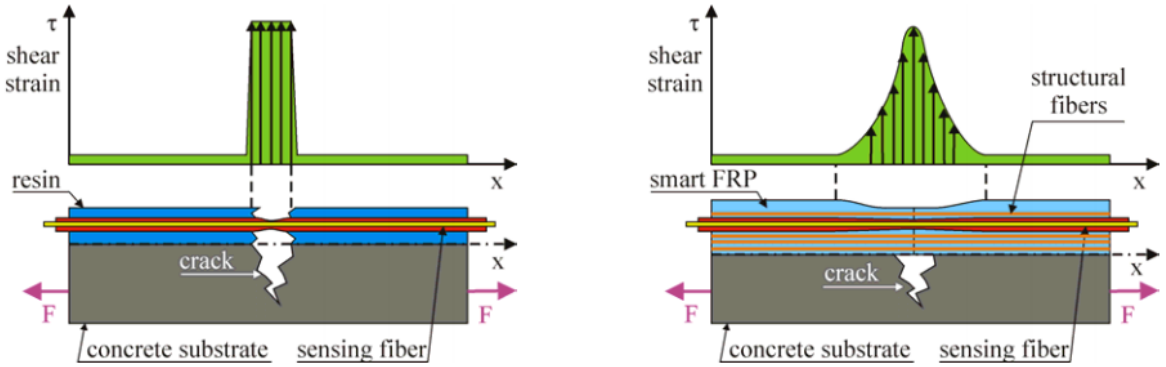
Hénault *et al.* proposent d'exprimer la déformation mesurée par un capteur de déformation à fibre optique comme la convolution entre la déformation de la structure $\boldsymbol{\varepsilon}_{st}(\boldsymbol{x})$ et la fonction de transfert mécanique du câble $FTM_{cable}(\boldsymbol{x})$ (Hénault, 2012) :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{st}(\boldsymbol{x}) \otimes FTM_{cable}(\boldsymbol{x}) \otimes \Pi_{\text{interrogateur}}(\boldsymbol{x}) \qquad \text{(III-2-1)}$$

où $\Pi_{\text{interrogateur}}(\boldsymbol{x})$ représente l'effet de l'interrogateur sur la mesure. C'est une fonction porte dont la largeur dépend de la base de mesure de l'interrogateur utilisé. Dans cette partie, $\boldsymbol{x}$ est l'abscisse curviligne au sein de la fibre. Par exemple, pour un interrogateur de type Rayleigh, celle-ci sera de

résolution centimétrique ; alors qu'avec un BOTDA, elle sera plutôt métrique. Pour rappel, en appliquant l'algorithme de la Partie II-2, la reconstruction de la déformation sera également de résolution centimétrique.

Il est intéressant de noter que si la FTM a une largeur à mi-hauteur (LMH) plus petite que la base de mesure, l'influence de l'interrogateur prédomine sur la FTM. Au contraire, si la résolution spatiale est plus grande, alors la FTM influencera les mesures de déformation de la structure. Ce dernier cas s'illustre lors de l'apparition de fissures sur les mesures de déformation à résolution centimétrique (avec des interrogateurs de type Rayleigh).



a. b.

Figure 57 : Représentation de la répartition de la contrainte de cisaillement (en anglais shear strain) le long de la fibre optique : (a) dans le cas d'un câble installé sur la structure par scellement au moyen d'une résine époxy ou (b) pour un câble intégré dans une bande FRP (Fiber Reinforced Polymer) collé sur le béton fissuré (Bastianini, 2005).

III.2.2.2. Suivi de l'évolution des fissures

Au sein du béton, les fissures apparaissent par sollicitations mécaniques (traction) ou chimiques du milieu. La signature des fissures se traduit par un pic positif en déformation (Hénault, 2013 ; Villalba, 2013 ; Regier, 2014). En résistance des matériaux, une fissure dans un béton se modélise par un Dirac, $\delta(\boldsymbol{x} - x_i)$ centré en x_i et dont l'amplitude a_i est proportionnelle à son ouverture.

Dans le cas du béton, plusieurs fissures peuvent apparaître. La déformation alors mesurée par l'interrogateur Rayleigh est supposée être la somme des Diracs convolués avec la fonction de transfert mécanique du câble (Figure 58. a.) :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}^{Rayleigh}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{N_{pic}} MTF_{cable}(\boldsymbol{x}).a_i.\delta(\boldsymbol{x} - x_i) \qquad \text{(III-2-2)}$$

avec N_{pic} le nombre de fissures dans le béton. Comme le pas de mesure d'un interrogateur de type Rayleigh est de l'ordre du centimètre, on peut négliger son effet. Une méthodologie a été développée afin d'estimer la FTM des câbles à fibre optique (Hénault, 2013). La question sur le vieillissement des câbles a également été soulevée pour comprendre l'effet des agressions chimiques sur le long terme sur la FTM des câbles. Une recommandation sur les composants du câble en a résulté pour que sa FTM soit constante dans le temps (Hénault, 2013).

En connaissant la FTM du câble, la méthode de déconvolution développée pour la caractérisation des fissures est appliquée sur des mesures de déformation acquises lors de la mise en traction d'une poutre

en béton armé (Figure 58. b.). Elle consiste en une méthode de séparation de sources itérative par soustraction successive des signatures de fissures. L'intérêt est de pouvoir suivre l'évolution des fissures en fonction du temps ou du chargement de la structure. Comme l'ouverture de la fissure est proportionnelle à l'amplitude a_i, l'intérêt est de suivre l'évolution de l'ouverture de la fissure. En fixant des seuils de détection de pics en déformation de 50 µm/m et un espacement entre fissures minimal de 2 cm, nous suivons l'évolution de 9 fissures qui apparaissent à différents chargements (Buchoud, 2012).

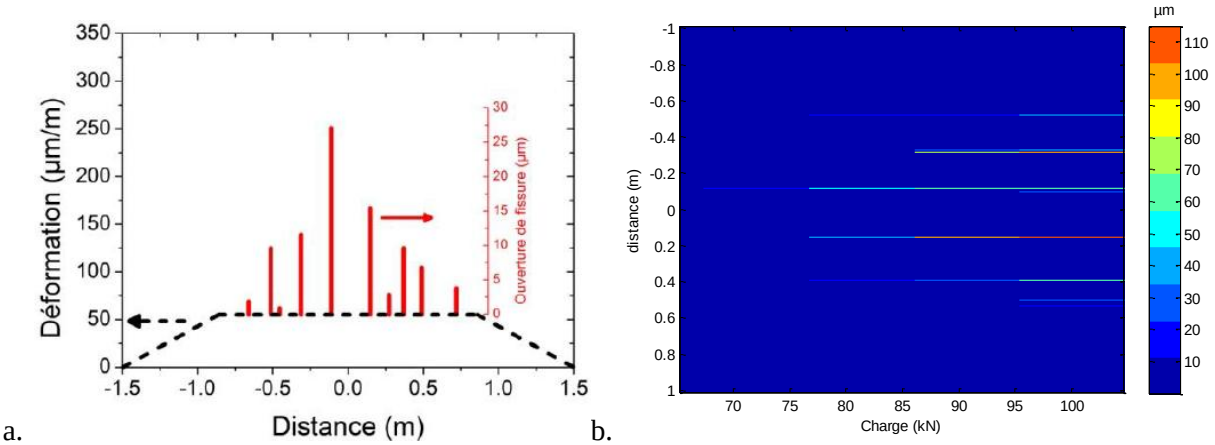


Figure 58 : a. Estimation du profil de déformation du béton obtenu par déconvolution par la FTM du câble noyé dans le béton (Hénault, 2013). b. Evolution des fissures en termes de localisation et d'ouverture (µm) en fonction de la charge appliquée (Buchoud, 2012).

Il serait alors intéressant d'appliquer l'algorithme de reconstruction du profil centimétrique de déformation à partir des données brutes du B-OTDA (cf. Partie II-2) sur des mesures issues d'une poutre en béton multi-fissurée. L'algorithme de reconstruction du profil de déformation proposé serait-il alors capable mesurer la signature d'une fissure ? Si oui, est-ce que la combinaison des deux algorithmes serait capable de détecter, localiser et quantifier les fissures de manières fiables ? Ce questionnement est légitime pour une future industrialisation des procédés développés dans ce manuscrit.

III.2.3. Quantification de tassements dans un ouvrage hydraulique en terre

Dans le domaine de la surveillance d'ouvrages en terre, les méthodes de quantification grâce à des capteurs à fibre optique sont assez récentes. L'intérêt majeur de cet outil comparé aux capteurs classiques est d'avoir un profil réparti de déformation sur plusieurs kilomètres.

Pour les glissements de terrain, un modèle a été développé pour interpréter les déformations lors d'un cisaillement (Iten, 2011 ; Hauswirth, 2010). Il est spécifique à l'utilisation de câbles avec points d'ancrage. Dans le domaine des tunneliers, Klar *et al.* ont proposé une méthodologie afin de quantifier le déplacement engendré par la création d'un tunnel grâce à un capteur à fibre optique classique (Klar, 2014). Celle-ci est basée sur un modèle 2D de déplacement du sol au dessus d'un tunnel.

Notre problématique est l'estimation du déplacement vertical engendré lors de la création d'une cavité souterraine : celle-ci peut avoir comme origine un fontis ou un renard. Cela s'approche de la problématique des tunneliers. Néanmoins, la profondeur de l'origine du déplacement est inconnue. Pour une meilleure compréhension de la méthode développée par Klar *et al.* (Klar, 2014), nous étudions les modèles de déplacement disponibles.

III.2.3.1. Modèles empiriques de déplacement

Dans le domaine de la surveillance du déplacement engendré par la création de tunnels, deux approches sont utilisées pour modéliser le déplacement. L'approche analytique a le mérite d'être précise, mais difficilement utilisable sur site puisque beaucoup de paramètres sont nécessaires et le temps de calcul peut être long (Sagaseta, 1988). L'approche empirique présente l'avantage d'avoir peu de paramètres et d'être applicable sur le terrain, même si son domaine de validité peut être limité. Dans les conditions 2D, leur but est de décrire le déplacement vertical du sol $\boldsymbol{u_z(x,z)}$ lors de la création d'une cavité (Figure 59).

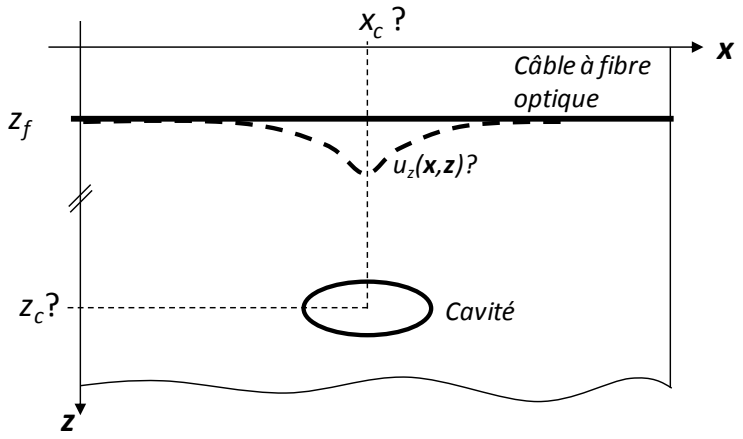


Figure 59 : Illustration de la problématique de l'estimation du déplacement vertical et de la profondeur de la cavité grâce aux capteurs à fibre optique.

III.2.3.1.1. Modèle gaussien

Tout d'abord, d'après des expériences dans des conditions contrôlées (test dans une centrifugeuse), un premier modèle (Peck, 1969) propose que le déplacement d'un sol s'approche d'une loi gaussienne :

$$\boldsymbol{u_z(x,z)}^{\text{gauss}} = \boldsymbol{s_{max}(z)}.\, e^{-\frac{1}{2}.\frac{x-x_c{}^2}{i_x{}^2}}, \qquad \text{(III-2-3)}$$

avec i_x la largeur du tassement, s_{max} le déplacement vertical maximal – qui est le paramètre à estimer dans notre cas, $\boldsymbol{x_c}$ l'abscisse de la cavité et $\boldsymbol{z}$ la profondeur de l'observation. A partir de cette loi, Attewell *et al.* proposent un modèle 3D basé sur le fait que les déplacements verticaux sur l'axe *x* et *y* suivent des lois gaussiennes de ce type (Attewell, 1986).

Cette loi empirique a été établie sur un type de sol donné et pour une expérience en laboratoire. Le domaine de validité de cette loi est assez restreint selon le type de sol utilisé (Celestino, 2000, Jacobsz, 2002).

III.2.3.1.2. Modèle gaussien modifié

Pour avoir une meilleure description des mesures observées, une loi empirique alternative testée sur une expérience en centrifugeuse a été proposée (Vorster, 2005) :

$$\boldsymbol{u_z(x,z)}^{mod} = \boldsymbol{s_{max}(z)}.\frac{q+1}{q+e^{\xi.\frac{x-x_c{}^2}{i_x{}^2}}}, \qquad \text{(III-2-4.a)}$$

$$q = e^{\xi}.\frac{2.\xi-1}{2.\xi+1}, \qquad \text{(III-2-4.b)}$$

avec ξ le facteur de forme contrôlant la largeur du profil du tassement. Lorsque $\xi = 0.5$ (i.e. q = 0) ce modèle rejoint le modèle gaussien de l'équation (III-2-3), comme visible sur la Figure 60.

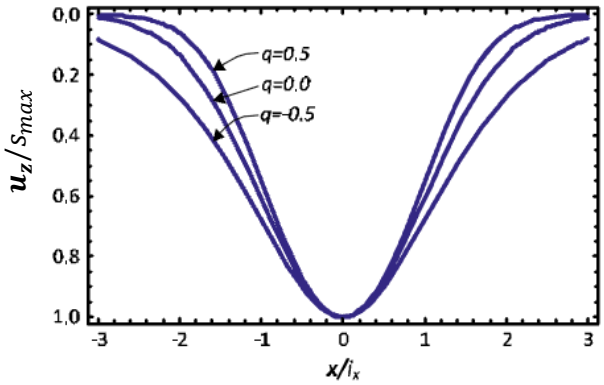


Figure 60 : Déplacement vertical normalisé selon le modèle gaussien modifié en fonction de la distance et de différentes valeurs de q. (Klar, 2010).

III.2.3.1.3. Modèle pseudo-Voigt

Nous rappelons que ces modèles sont spécifiques pour la création de tunnel. Les cavités naturelles formées par des renards hydrauliques ou par des fontis ont des formes plus variées et pas forcément symétriques par rapport à leur centre.
Afin de prendre en compte davantage de profils de déplacements, nous proposons un modèle empirique généralisé en combinant les profils gaussiens avec des profils lorentziens :

$$\boldsymbol{u_z(x,z)^{voigt}} = \boldsymbol{s_{\max}(z)}.\left(\frac{c}{1-((x-x_c)/\Gamma)^2} + (1-c).e^{-\frac{1}{2}.\frac{x-x_c{}^2}{i_x{}^2}}\right), \qquad \text{(III-2-5)}$$

avec c un paramètre de forme du profil du tassement ; s'il est égal à 0, le tassement suit la loi gaussienne définie en (III-2-3), si c = 1, le tassement suit une lorentzienne. Cela permet de décrire davantage de profils de déplacement : les points d'inflexion de ceux-ci ne sont plus rattachés à un seul paramètre. Sa largeur dépend de la combinaison de paramètres c, Γ et i_x. Un second point d'inflexion apparait dans le cas où c < 0.5 et Γ < i_x. Nous verrons dans la suite de cette étude, l'influence de ces paramètres sur le profil de déformation.

III.2.3.2. Expression de la déformation dans la fibre optique

Maintenant que nous avons proposé des modèles empiriques du profil de déplacement, nous cherchons à développer une relation entre la déformation dans la fibre optique et le déplacement. Or, comme les longueurs déformées considérées sont de l'ordre de la dizaine de mètres ou du mètre, l'influence de l'interrogateur est négligeable et la déformation longitudinale $\boldsymbol{\varepsilon_{st}(x)}$ dans la structure ne dépend que de la FTM du câble utilisé :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{FO}(x)} = \boldsymbol{\varepsilon_{st}(x)} \otimes FTM(\boldsymbol{x}) \ . \qquad \text{(III-2-6)}$$

Afin de simplifier ce modèle, un système équivalent (SE) est introduit qui lie l'influence de la FTM du câble à la déformation dans le sol, tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{FO}}(\boldsymbol{x}) \cong^{SE} \boldsymbol{\varepsilon_{st}}(\boldsymbol{x})\,. \qquad \text{(III-2-7)}$$

Nous verrons par la suite l'impact de cette hypothèse sur l'estimation du déplacement. Par conséquent, en reliant la déformation longitudinale dans la structure aux déplacements, un modèle direct sera disponible.

Pour cela, le tenseur des déformations $\boldsymbol{E} = \frac{1}{2}.(\nabla\boldsymbol{u} + (\nabla\boldsymbol{u})^t)$, avec $\nabla = \frac{\partial.}{\partial x} + \frac{\partial.}{\partial y} + \frac{\partial.}{\partial z}$, est lié au déplacement $\boldsymbol{u}$ dans la structure. Nous nous plaçons dans la configuration 2D : l'axe y est considéré comme infini. La déformation dans la structure $\boldsymbol{\varepsilon_{st}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z})$ selon l'axe $\boldsymbol{x}$ à une profondeur $\boldsymbol{z}$ s'écrit alors :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{st}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}) = \frac{\partial \boldsymbol{u}_x(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z})}{\partial \boldsymbol{x}}\,. \qquad \text{(III-2-8)}$$

Or le déplacement longitudinal $\boldsymbol{u_x}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z})$ peut être supposé lié au déplacement vertical $\boldsymbol{u_z}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z})$ selon (Mair, 1993) :

$$\boldsymbol{u_x}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}) = -\frac{n.x}{\Delta z}.\boldsymbol{u_z}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}), \qquad \text{(III-2-9)}$$

avec n un paramètre lié à la rigidité du sol et $\Delta z = z_f - z_c$, la distance entre la profondeur de la cavité et le point d'observation. La déformation longitudinale mesurée dans la fibre optique s'exprime alors en fonction du déplacement vertical du système équivalent :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{FO}}(\boldsymbol{x}, z_f) \cong -\frac{n}{\Delta z}.\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}}(\boldsymbol{x}.\boldsymbol{u_z}(\boldsymbol{x}, z_f)) \qquad \text{(III-2-10)}$$

Par conséquent, pour chaque modèle de déplacement, il existe une expression de déformation équivalente (Klar, 2014). Pour le modèle généralisé exposé dans la section III.2.3.1.3, l'expression de la déformation devient alors :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{FO}}^{voigt}(\boldsymbol{x}, z_f) \cong -\frac{n.s_{max}(z_f)}{\Delta z}.\left[\frac{\boldsymbol{u_z}^{voigt}(\boldsymbol{x}, z_f)}{s_{max}(z_f)} - c.\frac{2.\left(\frac{x-x_c}{\Gamma}\right)^2}{\left(1-\left(\frac{x-x_c}{\Gamma}\right)^2\right)^2} - (1-c).\left(\frac{x-x_c}{i_x}\right)^2.e^{-\frac{1}{2}.\left(\frac{x-x_c}{i_x}\right)^2}\right] \qquad \text{(III-2-11)}$$

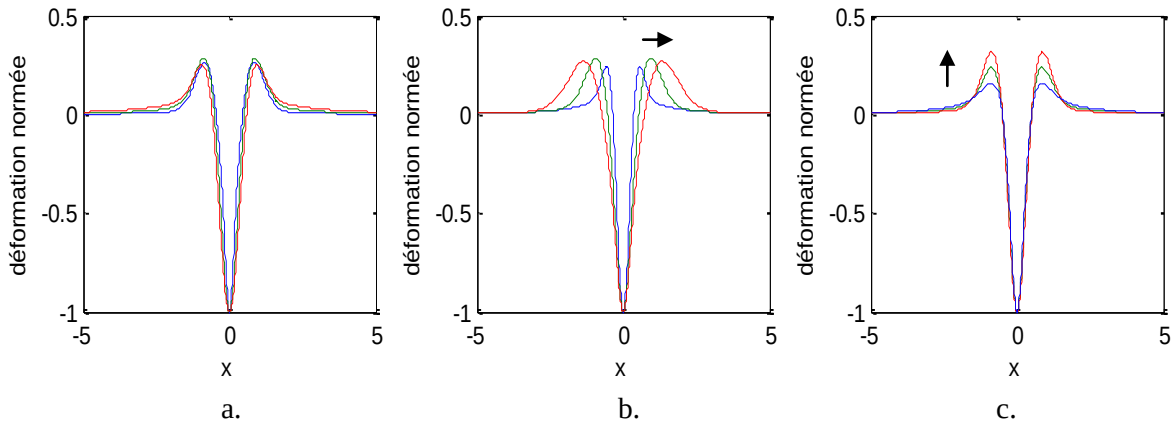


Figure 61 : Modélisation de la déformation dans la fibre optique $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}}^{voigt}(\boldsymbol{x}, z_f)$ (normalisée par le minimum) pour différentes valeurs de i_x (a), Γ (b), et c (c), variant indépendemment entre 0 et 1 grâce au modèle généralisé proposé.

La forme du profil de déformation est liée aux paramètres c, Γ et i_x. Ils commandent respectivement la proportion entre minimum et maximum, l'élargissement entre les points d'inflexion et la largeur du profil (Figure 61). Pour comprendre l'influence de chaque paramètre, nous les faisons varier de manière indépendante entre 0.1 et 1. Pour Γ et c fixés à 0.5, si i_x augmente entre 0 et 1 (Figure 61. a.), la proportion entre maxima et minimum reste constante, seule la largeur du profil augmente. Pour i_x et c fixés à 0.5, si Γ augmente (Figure 61. b.), la longueur entre les maxima augmente (i.e. les points d'inflexion sur le profil de déplacement). Pour Γ et i_x fixés à 0.5, si c augmente, alors le rapport entre maximum et minimum augmente (Figure 61. c.). Il y a donc trois degrés de liberté sur la forme du profil de déformation, ce qui permet d'augmenter les chances de décrire les différentes signatures possibles d'un tassement du sol.

III.2.3.3. Procédé d'estimation du déplacement

Maintenant qu'une relation directe relie le tassement vertical maximal s_{max}, que nous souhaitons estimer, avec la profondeur z_c et la déformation dans la fibre optique, nous définissons un procédé permettant d'estimer ces deux paramètres grâce aux capteurs à fibre optique.

III.2.3.3.1. Inversion paramétrique

Notons f les différents modèles empiriques de déformation définis précédemment et par Klar *et al.* (Klar, 2014). Ces derniers proposent d'optimiser les paramètres des modèles f (spécifiques à chaque modèle de déplacement) liant la déformation dans la fibre optique aux différentes expressions des déplacements pour minimiser l'erreur quadratique entre les signaux de déformation modélisé et mesuré. Pour cela, la méthode des moindres carrés est utilisée :

$$\{s_{max}, n, \Delta z, i_x, c, \xi, \Gamma\}^* = argmin(\|f(x, n, s_{max}, \Delta z, i_x, c, \xi, \Gamma) - \varepsilon_{mes}{}^{FO}(x)\|^2) \qquad \text{(III-2-12)}$$

Les paramètres communs aux modèles sont les paramètres $\{s_{max}, n, \Delta z, i_x\}$ liés aux géométries de la structure et du tassement. Dans le domaine des tunneliers, la profondeur de la cavité est contrôlée. Sous réserve de la connaissance du coefficient n, lié à la rigidité du sol, il est alors possible d'estimer le tassement vertical s_{max} grâce à cette optimisation. Néanmoins, dans notre cas, la profondeur de la cavité à l'origine du tassement (naturelle, ou causé par un renard) n'est pas connue : le rapport $\frac{n.s_{max}(z_f)}{\Delta z}$ est estimable mais pas les deux paramètres séparément.

III.2.3.3.2. Estimation de la profondeur de la cavité

Il est alors nécessaire d'établir une deuxième équation intégrant le tassement vertical maximal ou la profondeur de la cavité. De manière empirique, Mair *et al.* ont établi une relation linéaire entre la profondeur et la largeur du profil de déplacement i_x que nous avons généralisée (Mair, 1993) :

$$i_x(z_f) = \alpha + \beta(z_c - z_f), \qquad \text{(III-2-13)}$$

où α et β sont des coefficients de calibration. En traçant la droite $i_x(z_f)$, les coefficients (α, β) sont estimés. Pour une profondeur z_{fi},avec $i \in \{1, \dots, N\}$, et N le nombre de profondeurs auxquelles un câble est installé (Figure 62), il est alors possible d'estimer la profondeur de la cavité z_{ci} grâce à la relation :

$$z_{ci} = \frac{i_x(z_{fi}) - \alpha + \beta.z_{fi}}{\beta} \qquad \text{(III-2-14)}$$

Puisqu'il y a N profondeurs de fibre optique, il y aura N estimation de la profondeur. En moyennant les z_{ci} profondeurs trouvées, nous pouvons estimer la position réelle de la cavité z_c. Le procédé est résumé dans la Figure 63.

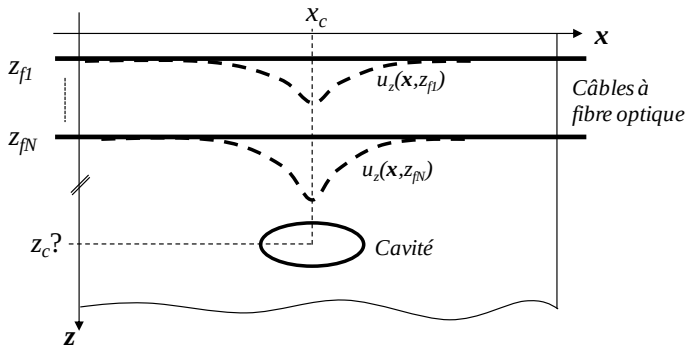


Figure 62 : Installation de N câbles à fibre optique dans une structure pour l'estimation de la profondeur de la cavité.

Pour l'appliquer, au moins $N \geq 2$ observations du tassement du sol doivent être acquises. On préconise alors l'installation de $N \geq 2$ câbles à fibre optique dans la structure afin d'estimer ces paramètres et ainsi la profondeur de la cavité (Figure 62). En termes d'installation, la profondeur de la première fibre optique est supérieure à 50 cm pour minimiser l'influence des variations thermiques que nous avons mises en évidence précédemment. La distance entre deux câbles recommandée est entre 50 cm et 1 m pour avoir des points espacés sur la droite $i_x(z_f)$ (en supposant que le déplacement est continu entre les câbles). Dans le cas où le déplacement n'est pas continu entre les câbles, la relation entre la forme des signatures et la profondeur risque de ne plus être linéaire. Le procédé doit être alors étendu pour ce cas.

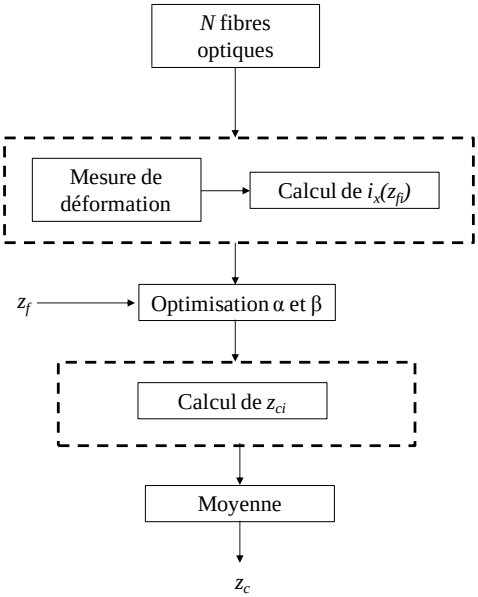


Figure 63 : Procédé d'estimation de la profondeur d'une cavité naturelle grâce à un capteur à fibre optique : les encadrés en pointillé indique que l'opération est effectuée N fois.

Grâce à l'estimation de la profondeur de la cavité, il est alors possible de lever l'indétermination sur le tassement vertical maximal $s_{max}(z_f)$, sous réserve de connaitre le coefficient n lié à la rigidité du système étudié.

III.2.3.4. Application sur les données du CER de Rouen

Ce procédé est appliqué sur les données expérimentales du CER de Rouen, qui nous a permis de générer des fontis de manière contrôlée. Les différents modèles présentés y sont confrontés.

III.2.3.4.1. Présentation de l'expérience

Pour rappel, l'expérience du CER de Rouen a été créée pour contrôler l'apparition d'une cavité souterraine. Une plaque de dimension de 1x1x4 m, contrôlée par des vérins hydrauliques, a été recouverte de 1,50 m de sables cohésif et non cohésif. L'abaissement de la plaque crée un tassement vertical du sol (par effet de gravité). Une cavité souterraine apparait par effet voûte. Finalement, le sol ne réagit plus aux abaissements de la plaque. Nous allons nous focaliser dans cette étude sur les mesures de déformation et déplacement issues du remblai n°2, pour lequel la plaque a été abaissée plus progressivement.

Pour tester le procédé d'estimation de la profondeur d'une cavité souterraine naturelle et du tassement généré, N = 2 profondeurs de sol ont été instrumentées pour mesurer le déplacement et la déformation. Pour la mesure de tassements verticaux, deux capteurs à câble de déplacement (DS) ont été installés à z_{f1} = 50 cm et z_{f2} = 1 m de la surface du sol (Figure 64). Ces capteurs ont une incertitude de mesure de +/- 0.1 mm. Pour les mêmes profondeurs, plusieurs câbles industriels ont été installés. Ils ont été couplés avec des interrogateurs Rayleigh et Brillouin dont les pas de mesures respectifs sont 3 cm et 40 cm (avec une base de mesure de 1m). En fonction de leurs qualités de mesure de déformation (bruit, signature symétrique, etc.), nous nous intéressons dans cette partie uniquement aux mesures issues de 5 câbles parmi tous les câbles installés. Ils sont notés de A à E.

Dans un premier temps, les mesures du câble A sont utilisées. Les modèles de déplacement seront confrontés aux mesures de déformation issues de l'interrogateur Rayleigh (car très résolues spatialement). Le procédé d'estimation de la profondeur et du tassement vertical sera alors testé. Dans un deuxième temps, il est intéressant alors de voir l'influence de la FTM des câbles sur l'estimation du tassement et, enfin, l'influence de l'utilisation d'un interrogateur Brillouin avec un pas de 5 cm, grâce à l'algorithme d'amélioration du pas de mesure présenté dans la Partie II.

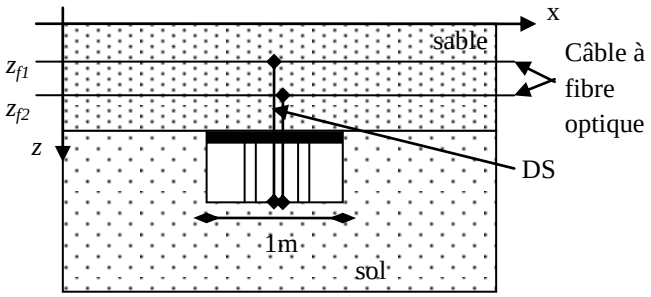


Figure 64 : Schéma de l'instrumentation pour la mesure de la déformation (câbles à fibre optique espacés de 50 cm) et le déplacement (DS) lors de la création de la cavité souterraine.

III.2.3.4.2. Estimation de la profondeur et du tassement

III.2.3.4.2.1. Confrontation des modèles aux mesures

Les modèles de déplacement / déformation présentés sont confrontés aux mesures de déformation issues de l'interrogateur Rayleigh et du câble A. Pour cela, l'optimisation des paramètres est effectuée sur tous les abaissements et pour les deux niveaux d'observations z_{f1} = 50 cm et z_{f2} = 1 m.
L'espace des solutions des paramètres est contraint :

- $n \in [0.1, 0.91]$; selon les bornes obtenues expérimentalement par Mair *et al.* (Mair, 1993) : pour le sable, le coefficient 0.4 est retenu lors de l'initialisation de l'algorithme d'optimisation.
- $\{s_{max}, \Delta z\} \in \mathbb{R}_+$
- $\{i_x, \Gamma\} \in \mathbb{R}_+^*$
- $\{\xi, c\} \in [0,1]$

Nous nous focalisons d'abord sur la corrélation entre les modèles et les mesures.

Pour z_{f2} = 1 m, le signal de déformation présente des points d'inflexion à environ -1 m et 1 m du centre de la plaque, comme illustré sur la Figure 65 a. (résultats obtenus pour un abaissement de la plaque E_1 = 2 mm). Le minimum est centré sur l'axe de la plaque. Le modèle qui correspond le mieux à la mesure de déformation est le modèle défini par la pseudo-Voigt (cf. équation III-2-11). En moyenne, sur tous les déplacements, le coefficient de corrélation est de 0.99 pour ce modèle contre 0.96 pour le modèle 2D gaussien et 0.97 pour le modèle 2D gaussien modifié.

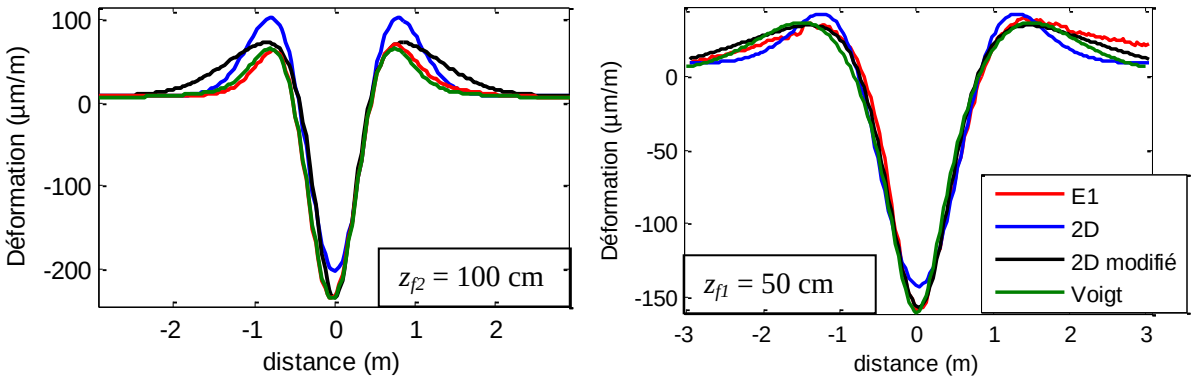


Figure 65 : Mesures de déformation issues du câble A acquises par l'interrogateur Rayleigh (pas de mesure Δx = 3 cm ; abaissement de la plaque E1 = 2mm ; en rouge) et les différents modèles pour les deux profondeurs d'observations z_{f2} = 1 m (a) et z_{f1} = 50 cm (b) : 2D gaussien (en bleu) ; 2D modifié (en noir) et le pseudo-Voigt (en vert).

Pour z_{f1} = 50 cm (Figure 65 b., même abaissement de la plaque E_1 = 2 mm), le signal de déformation présente deux lobes positifs dont la pente est constante jusqu'aux maxima. Le minimum est centré sur l'axe de la plaque. Le modèle qui correspond le mieux à la mesure de déformation est le modèle défini par la pseudo-Voigt (cf. équation III-2-11). En moyenne, sur l'ensemble des déplacements de la plaque, le coefficient de corrélation est de 0.99 pour ce modèle contre 0.97 pour le modèle 2D gaussien, et 0.98 pour le modèle 2D gaussien modifié. **En conclusion, le modèle pseudo-Voigt est un**

modèle empirique permettant de décrire complément le signal de déformation quelle que soit la profondeur d'observation.

III.2.3.4.2.2. Estimation de la profondeur et du tassement

Estimation de la profondeur de la cavité

Comme nous avons $N = 2$ niveaux d'observation dans la structure, il est alors possible de déterminer les coefficients (α, β) grâce à l'évolution de $i_x(z_f)$. Pour chaque déplacement de plaque, le couple doit être ré-optimisé puisque $i_x(z_f)$ évolue. Donc, pour chaque hauteur et chaque déplacement de la plaque, une profondeur de la cavité est estimée. En moyenne sur les deux profondeurs, la profondeur de la cavité augmente légèrement avec les abaissements : pour E_1, z_c = 1.52 cm, alors que de E_3 jusqu'à E_7, z_c = 1.55 cm. La profondeur de la cavité reste constante puisqu'une voûte se créée au fur et à mesure de l'abaissement de la plaque.

Néanmoins, une réévaluation des coefficients (α, β) mériterait d'être effectuée avec une expérimentation dans laquelle N > 3 profondeurs seront instrumentées avec un même câble à fibre optique.

Estimation du tassement vertical

Dans un premier temps, le coefficient *n* lié à la rigidité du sol doit être déterminé. Trois choix sont alors possibles dans ce cas :

- Soit ce coefficient est considéré indépendant de la FTM des câbles. Il est donc possible de l'estimer selon les caractéristiques du sol (Mair, 1993). Dans ce cas, le déplacement estimé est alors dépendant de la FTM des câbles.
- Soit nous considérons que *n* permet de prendre en compte l'influence de la FTM. En considérant cette FTM indépendante de la profondeur d'observation (pour un même câble), il est possible de déterminer le coefficient *n* grâce à une optimisation sur toutes les signatures pour un même déplacement. L'inconvénient de cette méthode est de rendre l'estimation du déplacement dépendante du résultat de l'optimisation puisqu'elle est globale.
- Soit une mesure de déplacement complémentaire est mise en place sur la structure. Dans ce cas, le coefficient peut être réglé afin de minimiser le biais entre l'estimation de déplacement effectué grâce à notre procédé et la mesure de référence.

Théoriquement, ce dernier cas permet d'avoir un biais minimal entre les mesures de déplacement estimées par le capteur à fibre optique et de référence. Cependant, en pratique, les ouvrages hydrauliques en terre ne sont pas équipés de capteurs ponctuels de déplacement vertical dans la structure. En général, seules des mesures topographiques à la surface sont effectuées. Nous choisissons alors d'optimiser le paramètre *n* sur toutes les signatures de manière globale. Pour le câble A, celui-ci a été estimé à 0.12 et est alors gardé pour le reste de l'étude.

Dans ce cas, le tassement vertical maximal s_{max} est recalculé pour les deux profondeurs des câbles et chaque déplacement de la plaque. En comparant les résultats de l'estimation affichés sur la Figure 66 avec les tassements mesurés par les capteurs ponctuels DS (affichés avec les barres d'incertitudes associées de +/- 0.1 mm), les capteurs à fibre optique permettent de quantifier des tassements verticaux de l'ordre du mm (à z_{f2} = 1 m), avec une très bonne précision (erreur maximale d'estimation de 0.1 mm). Pour des déplacements inférieurs au millimètre (à z_{f1} = 0.5 m), la méthode proposée

surévalue les tassements de 0.2 mm. Pourtant, nous retrouvons l'évolution des déplacements mesurés : entre E_1 et E_7, le tassement vertical augmente puis reste constant à 0.2 mm +/- 0.1 mm (mesures de référence).

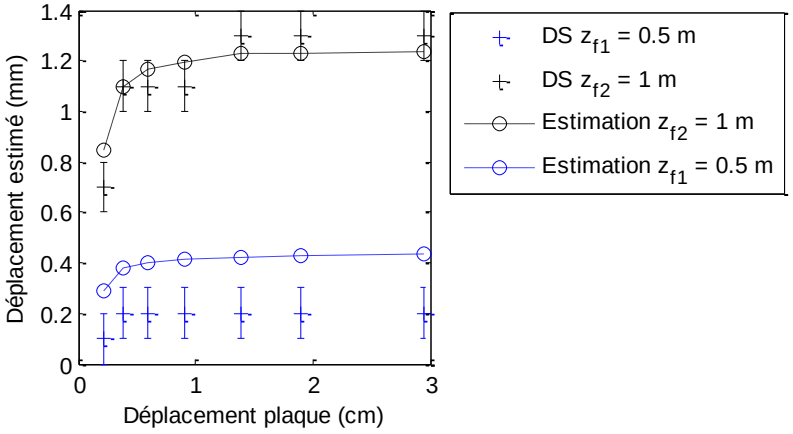


Figure 66 : Tassements verticaux maximaux aux deux points d'observations dans la structure z_{f2} = 1 m (en noir) et z_{f1} = 50 cm (en bleu) : mesurés par le capteur à câble (DS) et estimés grâce à notre procédé avec le câble A.

Cette erreur d'estimation pourrait venir de l'installation du capteur ponctuel de déplacement. Toutefois, en comparant le profil de déplacement à z_{f1} = 0.5 m avec la mesure du déplacement 0.2 mm +/-0.1 mm, le capteur serait alors excentré du centre de la plaque d'un minimum de +/- 38 cm, ce qui parait une erreur de placement trop importante.

Une autre hypothèse est de reconsidérer l'option choisie pour déterminer le coefficient *n*. L'incertitude liée à la détermination de ce paramètre est forte. Il est borné entre 0 et 1. Lorsqu'il diminue, s_{max} augmente et inversement lorsque *n* augmente, s_{max} diminue. Par exemple, lorsqu'il est fixé à 0.5 ou 1, les estimations des déplacements augmentent d'un facteur 2 ou 10 par rapport à sa valeur optimale de 0.1.

Nous supposions ce paramètre indépendant du niveau d'observation puisque le sol est supposé homogène (compactage, type de sol et granularité contrôlés), et que le câble utilisé est le même. Néanmoins, comme nous avons intégré la FTM du câble dans le paramètre *n*, il est nécessaire de prendre en compte le phénomène des interactions entre le sol et le câble. Le câble à fibre optique peut être plus sensible aux déplacements de la structure si l'interaction sol-câble est plus efficace en termes de transmission d'effort. Cela pourrait expliquer le biais de 0.2 mm observé à z_{f1} = 0.5 m.

Une dernière hypothèse est de considérer que le capteur de déplacement est ponctuel. Alors une partie des sollicitations n'est pas transmise au capteur et il sous-estime le déplacement vertical. Une solution pour vérifier ces hypothèses serait alors d'instrumenter à la même profondeur du câble à fibre optique plusieurs capteurs de déplacement ponctuels excentrés de la plaque. Cela permettrait d'avoir plusieurs points de comparaisons selon *x*.

Il est intéressant de noter que le modèle proposé permet d'avoir les profils de déplacements du sol aux deux niveaux d'observation (Figure 67). Nous proposons alors d'extrapoler ces profils pour estimer un champ de déplacement du sol en fonction de la profondeur, qui pourrait être utilisé dans d'autres domaines d'application.

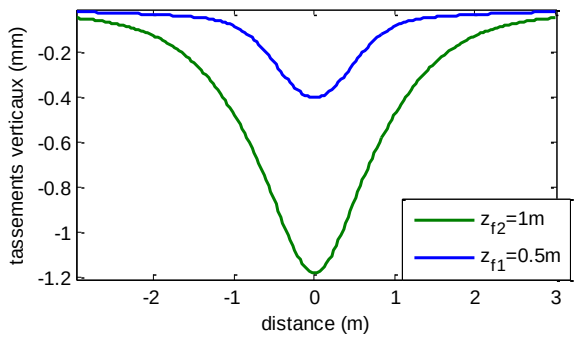
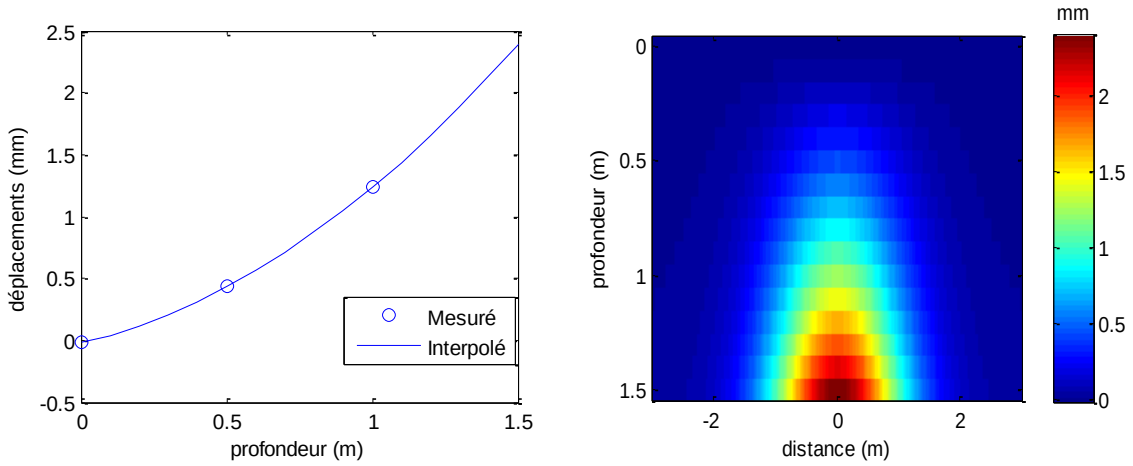


Figure 67 : Profils des tassements verticaux aux deux points d'observation dans la structure z_{f2} = 1 m (en noir) et z_{f1} = 50 cm (en bleu) : mesurés par le capteur à câble (DS) ; et estimés pour le déplacement de la plaque E_2.

Estimation du champ de déplacement par extrapolation

Une troisième mesure ponctuelle du déplacement est disponible à la surface du sol, au dessus de la plaque. Un capteur LVDT est placé entre un point fixe et la surface du sol pour mesurer le déplacement vertical de la surface (Figure 68. a.). Celle-ci se déplace très peu quelque soit l'abaissement imposé par la plaque. Le modèle proposé permet de décrire les deux signatures à deux profondeurs différentes. En supposant le champ de déplacement continu en fonction de $\boldsymbol{z}$, le choix a été pris d'extrapoler les mesures de déplacements mesurés avec une courbe du second ordre au vu des mesures ponctuelles de déplacements :

$$\boldsymbol{s_{max}}(\boldsymbol{z}) = a + b.\boldsymbol{z} + c.\boldsymbol{z}^2 \qquad \text{(III-2-15)}$$



a. b.

Figure 68 : a. Extrapolation du déplacement maximal en fonction de la profondeur d'observation et des mesures ponctuelles de déplacement pour l'abaissement E_7. b. Estimation du champ de déplacement dans la structure pour l'abaissement E_7 en fonction de la profondeur.

Les coefficients de la fonction sont optimisés et la fonction $\boldsymbol{s_{max}}(\boldsymbol{z})$ représente alors le déplacement maximal en x_c. Comme la forme du tassement est décrite par z et (α, β) connus, il est alors possible d'estimer un champ de déplacement en fonction de la profondeur d'observation z (Figure 68. a.). A la profondeur de la plaque (z = 1.5 m), le déplacement vertical maximal est alors de 2.49 mm pour

l'abaissement de la plaque E_7 = 2.9 cm. Il serait intéressant d'avoir des mesures de déplacements de référence intermédiaires afin d'estimer plus précisément le champ de déplacement.

III.2.3.4.3. Influence de la chaîne de mesure

Pour des déplacements très locaux induits par des fissures dans le béton, Hénault *et al.* nous indiquent que la FTM des câbles influence la signature des déformations issues des capteurs à fibre optique (Hénault, 2013). Récemment, Klar *et al.* ont supposé que pour des déplacements de l'ordre de la dizaine de mètres, la FTM du câble est négligeable pour la quantification du tassement vertical (Klar, 2014). Pourtant, Blairon *et al.* ont mis en évidence l'influence de la FTM de différents câbles industriels sur la signature d'un tassement vertical (Blairon, 2011). Dans notre domaine d'étude, les longueurs déplacées peuvent aller de la dizaine de mètres lors d'un fontis issu d'une cavité souterraine naturelle, mais également de l'ordre du mètre lors de la création de renards. Nous étudions alors l'influence de la FTM des câbles sur l'estimation d'un tassement vertical issu d'un fontis de l'ordre du mètre.

III.2.3.4.3.1. Mise en évidence des FTM des câbles

Blairon *et al.* ont défini des métriques s'appuyant sur la forme de la signature d'un fontis pour mettre en évidence l'influence de la FTM de différents câbles industriels (Blairon, 2011). Celle-ci est caractérisée par deux lobes positifs et un négatif en déformation (Figure 69). En définissant des points d'intérêt pour chaque lobe, des métriques ont été définies pour classer les câbles en fonction de la FTM et les caractéristiques mécaniques des câbles.

Nous nous focalisons sur les différentes signatures des câbles pour un des abaissements, E_2. Nous avons fait ce choix puisque pour certains câbles la mesure de déformation fournie est trop bruitée sur les autres déplacements. Pour rappel, les minima des signatures sont liés au rapport $\frac{n.s_{max}(z_f)}{\Delta z}$. L'étalement est lié à i_x et donc susceptible de modifier l'estimation de la profondeur de l'origine du tassement.

Nous pouvons constater que pour un même tassement, à z_{f2} = 1 m, les minima évoluent de -200 µm/m (câble A) à – 397 µm/m (câble E). Pour z_{f1} = 50 cm, les signatures sont plus homogènes, sachant que les minima évoluent de -150 µm/m (câble E) à -172 µm/m (câble C). La plupart des signatures sont symétriques, sauf celles des câbles D et E. A z_{f1} = 50 cm, les maxima des lobes droits (abscisses positives par rapport au minimum) sont inférieurs de 25 µm/m par rapport aux maxima du lobe gauche. Cette asymétrie est clairement visible à z_{f2} = 1 m pour le câble E qui présente un lobe gauche atteignant les 200 µm/m. Des effets de bord sont peut-être à l'origine de cette particularité. En effet, les câbles sont positionnés selon l'axe *y* de la structure avec un étalement de plusieurs mètres de part et d'autre du centre de la plaque. Sinon, l'apparition d'une fissuration de la terre (apparition d'un pic positif en déformation) sous l'effet du tassement peut être une hypothèse alternative. Il serait intéressant d'étendre le modèle proposé à la configuration 3D pour expliquer cette asymétrie. Cela permettrait également de faire varier l'orientation de la fibre optique selon l'axe de la cavité, afin de prendre en compte des cas plus généraux.

Contrairement à l'évolution des minima, l'étalement spatial de la signature diminue entre le câble E et le câble A (Figure 70). Globalement, pour les deux profondeurs, il est intéressant de noter que les FTM des câbles vont influer sur le maximum et l'étalement de la signature (Figure 70). Une relation existe entre l'étalement de la signature et son minimum. Plus la signature est étalée, moins le

minimum est important. Nous allons étudier l'influence de la FTM sur les estimations de la profondeur de la cavité et du déplacement.

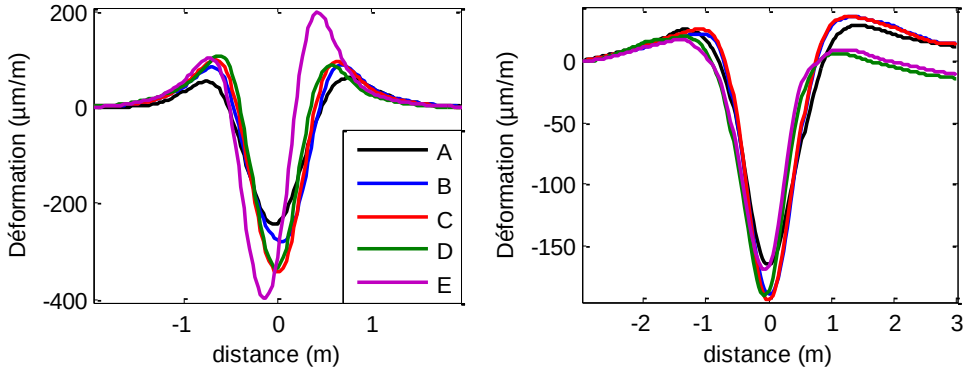


Figure 69 : Influence de la FTM des câbles (notés de A à E) pour une même signature de déformation, lors d'un fontis et selon la profondeur d'observation : (a) pour z_{f2} = 1 m et (b) z_{f1} = 50 cm.

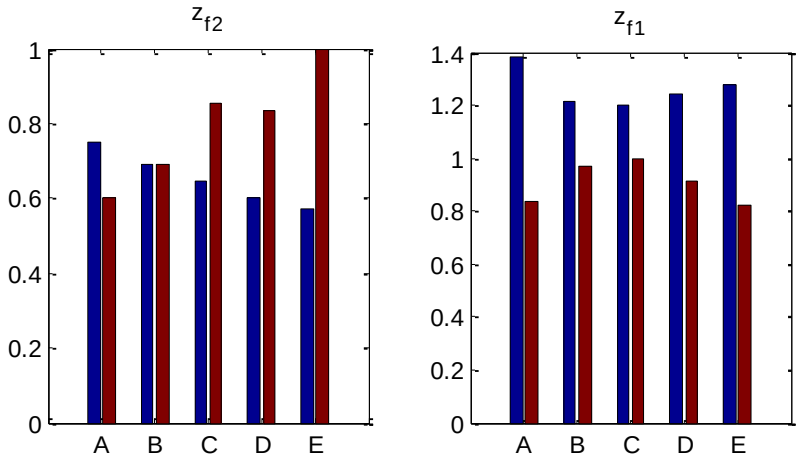


Figure 70 : Evolution du minimum (en rouge) et de l'étalement (en bleu) des signatures en déformation pour différents câbles à fibre optique (notés de A à E) lors d'un tassement vertical.

III.2.3.4.3.2. Influence de la FTM sur l'estimation du déplacement

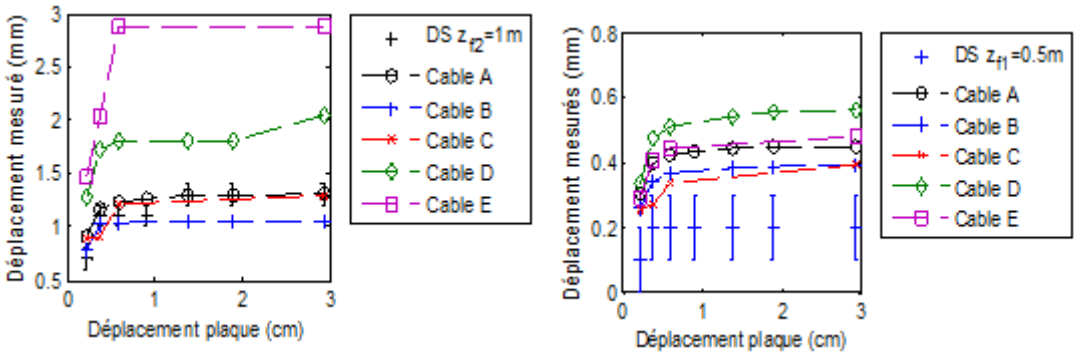
Dans un premier temps, la profondeur de la cavité doit être estimée pour chaque câble. Cette profondeur, dépend donc de la FTM de chaque câble. Son estimation varie entre 1.53 cm (en moyenne sur tous les abaissements E_i pour câble A, pour lequel l'étalement est le plus important) et 1.37 cm (en moyenne sur tous les E_i pour câble E, pour lequel l'étalement est le plus faible). Comme aucun relevé à la fin de l'essai n'a été effectué, nous ne pouvons savoir quelle estimation est la plus proche de la profondeur véritable de la cavité.

Nous avons fait l'hypothèse que la déformation dans la fibre optique est égale à la déformation dans la structure (éq. (III-2-7)). Cela sous-entend que le coefficient *n* est également dépendant de la FTM des câbles. Il est alors nécessaire d'appliquer la même méthode d'optimisation de ce coefficient que pour le câble A. Le coefficient *n* varie entre 0.12 (câble A) et 0.3 (câble E), la moyenne entre les 5 câbles étant de 0.19.

Finalement, les estimations du déplacement vertical maximal pour chaque câble sont les suivantes :

Pour la profondeur z_{f2} = 1 m, les estimations du déplacement vertical pour les câbles A-C présentent un très faible biais (Figure 71. (a)) par rapport aux mesures de déplacement de référence (capteurs DS). Celles issues des câbles A et B restent dans l'incertitude de la référence, alors que celles issues du câble C présentent un biais constant quel que soit les E_i de 0.1 mm. Pour les câbles D et E, l'estimation du déplacement est très supérieure à celles des autres câbles. Ce résultat était attendu grâce au classement des câbles établi en fonction de leurs minima de déformation et de leurs étalements.

Toutefois, cet écart est réduit pour z_{f2} = 0.5 m puisque les biais entre les mesures de déplacement de référence et les estimations restent relativement constantes (quels que soit les E_i) pour tous les câbles. Le biais minimal est de 0.15 mm pour le câble C, alors que le maximal est de 0.4 mm pour le câble D. Il est intéressant de noter que le biais pour ce câble est constant quel que soit z_f. Cela peut être dû à l'optimisation du coefficient *n*, mais plus probablement à la particularité de sa signature.



a. b.

Figure 71 : Estimation du déplacement avec 5 câbles à fibres optiques commerciaux : (a) pour z_{f2} = 1 m et (b) z_{f1} = 50 cm, en connaissant la profondeur de la cavité.

Finalement, on s'aperçoit que la FTM des câbles influence les estimations du déplacement. Toutefois, celles-ci sont très proches de la mesure de déplacement de référence. Seul un biais important pour les câbles D et E apparait. Pour les autres câbles, ce biais est très faible. On constate alors que le coefficient *n* permet d'absorber l'effet de la FTM des câbles et permet de fournir des mesures de déplacement adéquates quel que soit le câble utilisé lors d'un effondrement d'une cavité souterraine.

III.2.3.4.3.3. Influence de l'interrogateur

Si l'interrogateur utilisé a une résolution spatiale supérieure au centimètre (type B-OTDA), alors il va influencer la mesure du profil de déformation. Nous l'avons mis en évidence dans la Partie II et nous avons proposé une méthodologie pour améliorer l'estimation du profil de déformation avec un pas de mesure centimétrique Δx = 5 cm.

Pour l'estimation du déplacement, nous prenons les profils de déformation obtenus avec la méthode d'inversion (II.2.4.6). Cette méthode a été utilisée sur le câble B, puisque la détermination du spectre de référence a été possible. Pour le câble A, il n'a pas été possible de déterminer le spectre de référence pour cause de problèmes instrumentaux.

La méthode de quantification de tassement a été effectuée sur le profil centimétrique de la déformation obtenue grâce à la méthode d'inversion. La corrélation entre les signatures et le modèle est inférieure (0.982 en moyenne sur les E_i et pour les deux profondeurs) à celle issue des signaux obtenus avec l'interrogateur Rayleigh puisque la déformation reconstruite est bruitée.

La profondeur de la cavité a été estimée à 1,38 m pour E_1 et augmente jusqu'à 1,43 m pour E_7. La différence est due à la forme entre la signature estimée par notre méthode et mesurée par l'interrogateur Rayleigh. Pour z_{f2}, la signature est plus large que celle mesurée par l'interrogateur Rayleigh (cf. II.2.4.6 - Figure 45).

Pour le coefficient *n*, qui est censé être relatif à la FTM du câble et la rigidité du sol, nous gardons la même valeur que pour le câble B associé à un interrogateur Rayleigh. Le tassement vertical maximal est alors estimé pour les deux profondeurs (Figure 72). A z_{f2}, l'erreur d'estimation est paradoxalement plus faible, alors que les minima des deux signatures (II.2.4.6 - Figure 45) présentaient une différence de 50 µm/m. Les deux estimations restent dans le même ordre de grandeur que les mesures ponctuelles.

L'erreur d'estimation du déplacement vertical est plus grande à z_{f2} puisque le maximum de la signature de déformation estimée était inférieur à celle de la signature de référence. Cependant, à z_{f1}, comme la déformation reconstruite était fidèle à celui mesuré par l'interrogateur Rayleigh, les biais des estimations pour les deux signatures sont très proches de 0.01 mm.

Ces observations suggèrent que la chaîne de traitement proposée sur les données brutes du B-OTDA pour l'amélioration du pas de mesure est efficace. Même si la signature retrouvée est bruitée, cela influence peu les estimations des déplacements dans le sol. Finalement, les outils développés dans cette étude sont adaptés pour l'interprétation des mesures de déformation par capteur à fibre optique pour la quantification de déplacements dans des structures en terre.

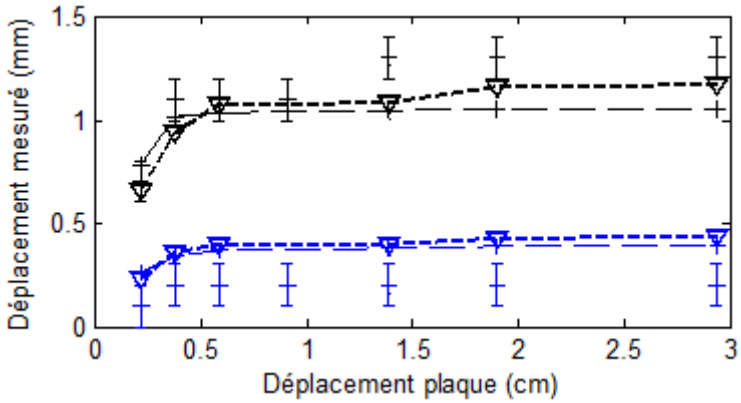


Figure 72 : Influence de l'interrogateur sur l'estimation du déplacement pour le câble B aux deux profondeurs d'observation (z_{f2} = 1 m en noir et z_{f1} = 50 cm en bleu) : reconstruction du profil de déformation centimétrique à partir des données du B-OTDA (triangle) et Rayleigh (croix).

III.2.4. Conclusion et perspectives

Ce chapitre a mis en lumière le lien entre le déplacement dans la structure et la déformation mesurée par un capteur à fibre optique. Lorsqu'un défaut apparait dans une structure instrumentée par capteur à fibre optique, la déformation subie par la structure atteint le câble à fibre optique. A cause de la

fonction de transfert mécanique du câble et de l'influence de l'interrogateur, la déformation mesurée est le résultat de la convolution de ces facteurs avec celle de la structure. L'influence de la FTM du câble a été mise en évidence lors de la quantification de fissures : la signature d'une fissure en déformation, dans le domaine de la mécanique des milieux continus, se modélise par la convolution d'un Dirac avec la FTM. Selon le câble, la signature est plus ou moins étendue en distance. Lors de l'apparition de plusieurs fissures, leurs signatures en déformation peuvent se superposer. Afin de suivre l'évolution des fissures, en temps et en distance, nous avons mis au point un algorithme de déconvolution basé sur le principe de soustraction des signatures des fissures (Buchoud, 2011).

Les phénomènes de renard hydraulique ou de fontis induisent pour leur part des tassements verticaux dans les structures hydrauliques en terre. D'après les modèles empiriques issus du domaine des tunneliers, ceux-là sont décrits par des lois gaussiennes classiques ou modifiées. Or, des études montrent que ces lois ne sont valables que dans un certain domaine de validité (types de terres utilisés, de tassements engendrés, etc). Pour étendre ces modèles, nous proposons une loi pseudo-Voigt, prenant ainsi en compte plusieurs types de forme puisque c'est un mélange de lois gaussienne et lorentzienne.

Dans notre domaine d'application, nous cherchons à estimer le tassement vertical maximal. Cela étant, nous disposons comme données de profils de déformation. Or, la déformation est reliée au déplacement par une relation impliquant sa dérivée, et trois termes : le tassement vertical – que nous cherchons à estimer -, le profondeur de la cavité - qui est également une inconnue – et un terme lié à la rigidité du sol - qui peut être estimé grâce à des essais en laboratoire. Pour lever l'indétermination sur la profondeur, une relation linéaire a été établie entre la forme de la signature de la déformation (et donc du déplacement) et la profondeur. Afin de déterminer cette relation, N observations du tassement sont nécessaires. Les N signatures permettent d'estimer la relation entre la forme du tassement en fonction de la profondeur d'observation. Par extension, la profondeur de la cavité est déterminée et, finalement, le tassement vertical maximal est également déduit.

Cette méthodologie a été testée sur les mesures de déformations issues de l'expérience du CER de Rouen dans laquelle la fibre optique a été installée à deux profondeurs d'observation. Le modèle de tassement permet de décrire les deux signatures avec une meilleure corrélation que les précédents. Pour un câble donné, la profondeur de la cavité est estimée de manière très correcte, à quelques centimètres près. Cette expérience prouve que les capteurs à fibre optique sont très sensibles aux déplacements, puisqu'un déplacement de 0.1 mm a été détecté et localisé, avec un biais d'estimation de déplacements de 0.2 mm (pour une différence de profondeur entre le câble et la cavité de 1 m). Les estimations des déplacements restent dans les mêmes ordres de grandeur que les mesures de déplacement.

Les parties précédentes ont montré que l'interrogateur B-OTDA avait une influence sur la signature de la déformation. La méthodologie présentée dans le chapitre II-2 permet de réduire cet écart entre les types d'interrogateur. Afin de quantifier l'influence de l'interrogateur sur l'estimation du tassement, le procédé a été appliqué sur l'estimation de la déformation issue de l'algorithme de reconstruction. Globalement, l'estimation du déplacement reste dans les mêmes ordres de grandeur que les mesures de référence. Cependant, comme les signatures reconstruites sont bruitées, l'écart-type est plus important.

Ces premiers résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation des capteurs à fibre optique dans d'autres configurations. Dans un premier temps, la relation entre la forme de la signature et la profondeur de la cavité doit être validée avec au moins trois profondeurs d'observations. Cela

permettra d'affiner la recherche de la profondeur de la cavité et de valider la relation entre la forme et la profondeur de la cavité. Une extension du modèle à une configuration 3D permettrait d'expliquer les signatures asymétriques et d'envisager une industrialisation de la méthodologie. La problématique du positionnement des câbles dans la structure et des profondeurs à instrumenter peut être ainsi étudiée.

Conclusions et perspectives :

Acteur mondial dans le domaine de l'énergie, le groupe l'Electricité de France (EDF) possède un parc de moyens de production d'électricité composé d'un nombre important d'ouvrages hydrauliques et nucléaires. L'auscultation de ces ouvrages permet de s'assurer de leur bon comportement. Les indicateurs à surveiller sont les fissures pour le béton, les renards hydrauliques ou l'apparition de fontis pour les ouvrages hydrauliques en terre. En complément des capteurs classiques, l'utilisation des capteurs répartis par fibre optique présente l'avantage d'avoir un profil de déformation avec un pas de mesure régulier sur plusieurs kilomètres de longueur, un faible coût d'achat et une durée de vie importante.

Dans le but de développer des systèmes d'auscultation à grand rendement, ce travail de recherche a abordé les différentes problématiques liées à l'utilisation de ces capteurs. Les interrogateurs optiques permettent de mesurer les variations de déformation et de température dans la fibre s'appuyant sur le principe de la diffusion de la lumière. Néanmoins, des limites métrologiques se présentent à cause de la technique de mesure, ce qui impose des compromis entre longueurs d'auscultation et pas de mesure. Pour ausculter des kilomètres de digues, le pas de mesure est grand (de l'ordre du mètre avec l'utilisation de la technologie Brillouin) ; alors que pour une centaine de mètres, le pas de mesure peut être centimétrique (technologie Rayleigh). Cela nous a amené à comparer les performances des interrogateurs Brillouin sur le marché et à aborder les solutions existantes. Certaines arrivent à concilier ces deux contraintes, mais sont dans un stade d'industrialisation peu avancé et trop chère.

Nous nous sommes intéressés à l'exploitation de l'information contenue dans le spectre Brillouin. En effet, un spectre est mesuré sur une base de mesure de l'ordre du mètre selon les technologies (B-OTDR, B-OTDA, …). Si la distribution de la déformation n'est pas uniforme, le spectre est alors distordu et apparait asymétrique ou élargi. Cela s'explique par la présence de plusieurs composantes spectrales centrées en des fréquences Brillouin différentes. Nous avons mis en évidence les limites de l'algorithme implémenté dans les interrogateurs industriels pour mesurer cette fréquence. Nous en avons déduit des paramètres de forme permettant de détecter et localiser les spectres distordus.

Nous avons proposé plusieurs méthodologies pour extraire de l'information utile à partir de spectres Brillouin mesurés tous les mètres par des interrogateurs B-OTDA. En utilisant des techniques de traitement du signal, nous avons montré et prouvé qu'il était possible de reconstruire des profils de fréquences Brillouin avec un pas centimétrique sur plusieurs kilomètres. Les nouvelles méthodologies proposées ont été validées sur des données simulées et expérimentales et ont été confrontées et comparées à des données de référence. Il en résulte qu'elles permettent d'une part d'améliorer le pas de mesure de l'appareil du mètre au centimètre (valeur choisie par l'utilisateur) et d'autre part d'améliorer la résolution en déformation. Nous avons montré également que ces méthodologies peuvent être facilement couplées aux interrogateurs industriels existants et déployées à large échelle.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes consacrés au verrou technologique lié au couplage de la mesure de température et de déformation engendrant des erreurs d'interprétation des mesures de déformation. La dépendance de la fréquence Brillouin aux variations de déformation et de température au sein de la fibre optique est une des caractéristiques de ces capteurs. Cette relation a été complétée dans le cas des ouvrages hydrauliques en terre où des phénomènes de diffusion et de dilatation des matériaux apportent des variations thermiques périodiques aux mesures de déformation. La source principale de ces variations thermiques est la température de l'air. Si une acquisition de la température

environnementale est disponible sur site, ces variations thermiques peuvent être corrigées par filtrage adaptatif (filtrage de Wiener). Dans le cas où aucune mesure de température référence n'est disponible, une méthode de séparation aveugle de sources a été mise en œuvre : la décomposition modale empirique. Celle-ci consiste à séparer les modes fréquentiels contenus dans le signal. En identifiant les modes contenant les variations thermiques, il a été possible d'accéder qu'à la déformation irréversible.

Une comparaison qualitative de ces méthodes sur des données expérimentales et une discussion sur les mesures de température à choisir comme référence nous ont permis de conclure que ces méthodes permettent d'accéder efficacement à la déformation irréversible des structures. Néanmoins, pour une comparaison quantitative rigoureuse, il serait intéressant de valider ces méthodes sur une expérience contrôlée en laboratoire. En effet, en maîtrisant les variations thermiques, et donc la déformation subie par la structure, nous pouvons comparer rigoureusement les résultats de ces méthodes avec des mesures de déformation de référence acquises par des capteurs ponctuels.

Une fois la déformation estimée rendue indépendante de la température de la structure, nous nous sommes concentrés dans un troisième temps sur l'estimation du déplacement dans la structure. Le but était de quantifier les indicateurs d'intérêt : ouverture de fissure dans du béton et/ou tassement vertical. Cela nous a amené à considérer que la déformation dans la structure est transmise par l'intermédiaire du câble à fibre optique. La conséquence pour la quantification de fissures est de déconvoluer la fonction de transfert mécanique du câble.

Les renards hydrauliques et les fontis provoquent des tassements verticaux à quantifier. Ceux-ci ont une signature en déformation particulière mesurée par les capteurs à fibre optique. Cette signature peut être liée aux déplacements de la structure par un modèle empirique. Les paramètres principaux sont proportionnels à la rigidité du sol, la profondeur de la cavité et le tassement vertical maximal. Le premier peut être évalué selon la composition du sol ou par optimisation globale. Un procédé a été défini pour lever l'indétermination entre les deux paramètres d'intérêts. Celui-ci débouche sur des spécifications pour la quantification de tassements dans une structure industrielle : un même câble à fibre optique doit être installé à deux profondeurs ou plus. Il doit être orienté dans le même axe pour pouvoir mesurer deux signatures similaires, mais dont les caractéristiques de formes changent. Nous avons testé ce procédé et il a été confronté avec des mesures de référence lors d'un essai en conditions contrôlées. L'influence du type de câble et de l'interrogateur a été discutée et nous avons prouvé que ces facteurs n'ont que peu d'influence sur l'estimation de tassements verticaux.

Nous avons donc développé des éléments d'une chaîne de traitement des mesures de déformation issus d'un capteur à fibre optique de technologie Brillouin pour répondre à l'objectif initial : quantifier le déplacement dans une structure. Grâce à ces outils et aux résultats obtenus, cette étude ouvre la voie à l'industrialisation de ces méthodologies.

Des approfondissements sont cependant à prévoir sur les différentes étapes. La méthode de reconstruction doit être testée sur des données issues de la surveillance de structure en béton. Ensuite, les algorithmes de correction de l'effet thermique sur les mesures de déformation seront comparés de manière rigoureuse sur une expérience contrôlée. Enfin, le procédé de quantification doit être qualifié pour plusieurs configurations. L'hypothèse sous-jacente de cette méthode est une représentation 2D de la structure. Néanmoins, si les câbles à fibres optiques ne sont pas parfaitement alignés entre les deux profondeurs, ou par rapport à l'axe principal de la cavité, le modèle proposé ne permet plus de décrire

les signatures mesurées (qui peuvent être asymétrique). Il est alors nécessaire de passer à une modélisation empirique 3D pour pouvoir envisager des futures applications industrielles.

La comparaison des algorithmes de séparation de la température / déformation et des différentes configurations de surveillance d'un ouvrage en terre pourrait être effectuée sur une expérience en conditions contrôlées. Elle consiste à construire un cube de géomatériaux (sable, terre, à définir selon l'application) assez large (de l'ordre de 4-5 m, pour effectuer une mesure grâce à un B-OTDA) et haut pour pouvoir installer au moins deux nappes de câble. Parmi ces deux nappes, les angles entre les tronçons d'un même câble pourraient varier, leur distance également. Le câble est ensuite couplé aux interrogateurs Brillouin, Rayleigh et Raman. En complément, des capteurs ponctuels de température et de déplacement seront installés sur l'ensemble de la maquette, proche des tronçons du câble. La maquette devrait être placée dans un hangar pour subir les variations journalières / saisonnières sans que d'autres facteurs externes influencent les mesures (notamment la pluie). Ensuite, des tassements verticaux pourraient être générés par un vérin et dont les différentes signatures pourraient alimenter nos modèles et procédés pour une validation finale.

Dans un deuxième temps, un questionnement sur la gestion de données de ces capteurs est également légitime. Les capteurs à fibre optique génèrent beaucoup de données. La dimension des matrices Brillouin dépend de la longueur d'auscultation qui peut être kilométrique. Leur décomposition sur une base de spectres grâce aux techniques présentées ici (NMF, FastNNLS) pourrait être adéquate pour réduire la taille des données stockées. En effet, il suffit de connaitre le spectre élémentaire, et donc la base de décomposition. Ensuite, le résultat de la décomposition en matrice non négative (i.e. la matrice de coefficients) suffira pour décrire entièrement les spectres. Il serait intéressant d'intégrer cette solution dans le logiciel de l'appareil.

Pour sélectionner les zones en distance dans lesquelles des déformations importantes apparaissent, une solution possible est de mesurer l'écart en fréquence des composantes présentes dans chaque spectre et de suivre leur évolution dans le temps. Ensuite, le traitement des spectres pour la reconstruction du profil centimétrique de la fréquence Brillouin serait alors possible sur les portions sélectionnées. Cela permet de s'affranchir de l'enregistrement des spectres Brillouin et seuls les profils de fréquences Brillouin le seraient. Sur les profils de déformations alors obtenus, la détection et localisation de fissures ou fontis serait possible grâce à la décomposition du signal en ondelettes. En effet, nous avons vus que les profils de déformation lors de la formation de fontis étaient relatifs à la dérivée seconde d'une pseudo-Voigt, et donc d'une gaussienne. En choisissant une ondelette mère égale à la dérivée seconde d'une gaussienne, appelée également ondelette « sombrero », il est possible d'appliquer d'obtenir les coefficients correspondants à la localisation du fontis et sa forme. Les procédés de quantification développés durant la thèse permettront ensuite de quantifier les déplacements induits par ces phénomènes.

Annexe A : Présentation des autres sites étudiés

A. 1. Maquette ERINOH : étude de la propagation d'un renard hydraulique

A. 1. 1. Description de l'essai et de l'instrumentation

Un projet financé par l'Institut pour la Recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (IREX) et l'Association Nationale de le Recherche (ANR) a réuni plusieurs partenaires pour l'étude de l'ERosion INterne d'un Ouvrage Hydraulique (ERINOH) dont la CNR et l'EDF. L'enjeu principal est de trouver une solution de renforcement des digues actuelles pour éviter l'apparition de phénomènes d'érosion interne : renard hydraulique, fontis, etc…

Une maquette physique d'une digue (Figure 73. a.) a été réalisée : elle reproduit une digue dont le cœur est constitué de limon compacté avec une recharge en gravier. L'épaisseur est à déterminer pour empêcher la création d'un renard hydraulique (Figure 73. b.) (Béguin, 2012). L'écoulement de l'eau entre deux couches de matériaux dont la taille des granulats diffère entraîne le phénomène d'érosion de contact. Un transport de particules des matériaux s'effectue au sein de la structure et peut créer un renard hydraulique à l'interface des deux couches. Par la suite, le renard hydraulique peut engendrer la formation d'un fontis, ou l'affaissement du parement de la digue et potentiellement la rupture de l'ouvrage.

Pour étudier l'influence de la recharge sur l'apparition de tels phénomènes, des campagnes de mesures ont été effectuées dans le cadre du projet et de la thèse de R. Béguin (2012). Des recommandations sur l'épaisseur des recharges ont été proposées. Dans la suite de cette thèse, EDF et la CNR ont souhaité effectuer 3 essais supplémentaires sur une configuration de la maquette correspondant aux digues du Rhin.

Dans ce cadre, la maquette est composée d'un cœur limoneux et d'une recharge en gravier avec épaisseur variable. Un bac d'eau, dont la hauteur varie, est placé en amont. L'eau se diffuse et s'écoule à l'intérieur de la maquette et un bac récupérateur d'eau et de particules se trouve à l'aval (Figure 73. a. et c.). Un transport de particules s'opère lors de la mise en eau du modèle et un écoulement préférentiel s'effectue dans la structure. Ceci conduit à la formation d'un « renard », c.-à-d. une cavité permettant à l'eau de s'écouler. La hauteur d'eau dans le bac amont est contrôlée pour enclencher le processus d'érosion interne. Il est très difficile de prévoir la formation et la trajectoire du renard dans une telle structure.

En termes de moyens de surveillance de l'ouvrage, les grandeurs physiques d'intérêt ont été : la pression interne de la structure, la déformation interne et surfacique de la structure, la turbidité de l'eau en aval de la maquette et son débit. Le choix des capteurs est expliqué dans la thèse de R. Béguin (2012). Nous nous concentrons sur les capteurs de déformation : la technique de photogrammétrie a été utilisée pour le déplacement surfacique. Pour la déformation au sein de la maquette, les capteurs à fibre optique de technologie Rayleigh et Brillouin ont été utilisés. En parallèle, une mesure de température est effectuée par un appareil Raman pour corriger l'effet de la température sur les mesures de déformations. Afin d'avoir une mesure représentative de la déformation au sein de la structure, le câble à fibre optique a été posé en nappe (Figure 73.d.). L'objectif des mesures de déformations est d'observer la formation du renard hydraulique et sa propagation. Nous sommes intervenus dans la pose du câble à fibre optique, pour le raccordement avec les différents interrogateurs, ainsi que pour le traitement de données.

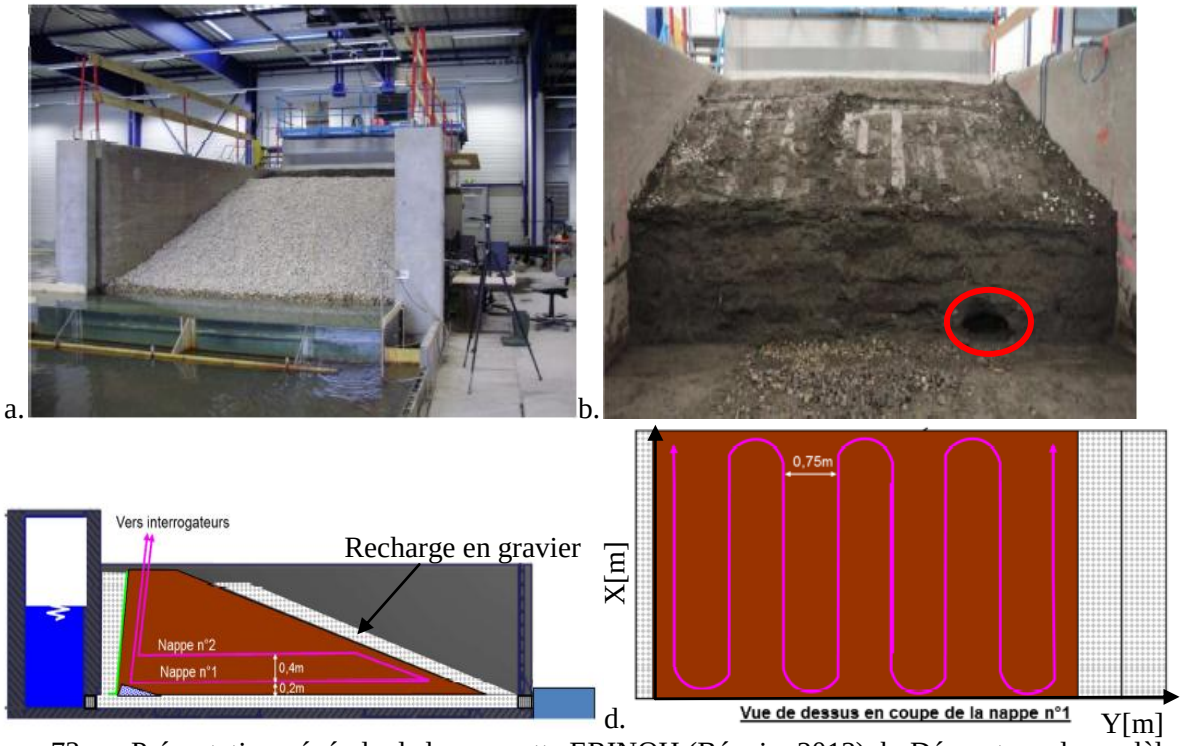


Figure 73 : a. Présentation générale de la maquette ERINOH (Béguin, 2012). b. Démontage du modèle après formation d'un renard (entouré en rouge) (Béguin, 2012). c. Coupe transversale du modèle avec instrumentation de la fibre optique (en violet) (Béguin, 2012). d. Vue de dessus de la première nappe de câble (Béguin, 2012).

A. 1. 2. Mesures de déformations issues des capteurs à fibre optique

Nous présentons dans cette annexe les mesures de déformation issues des capteurs de déformation Rayleigh et Brillouin, dont les pas de mesures respectifs sont 1 cm et 10cm (avec une base de mesure de 50 cm). Celles-ci ont été corrigées par les mesures de température issues du capteur à fibre optique Raman grâce à la méthode de soustraction décrite en III.1.3.2.1. Nous présentons les champs de déformation interpolés sur toute la nappe pendant une campagne d'essai (Figure 74).

L'intérêt est de comparer les performances des deux capteurs de déformation. Il y a une correspondance en distance entre les déformations négatives et positives des deux capteurs. Seul le profil mesuré par l'interrogateur Brillouin est moins résolu en déformation : le minimal est de -168 µm/m au lieu de -265 µm/m mesuré par le Rayleigh. La formation du renard a pu être prédite grâce à l'interprétation de ces mesures.

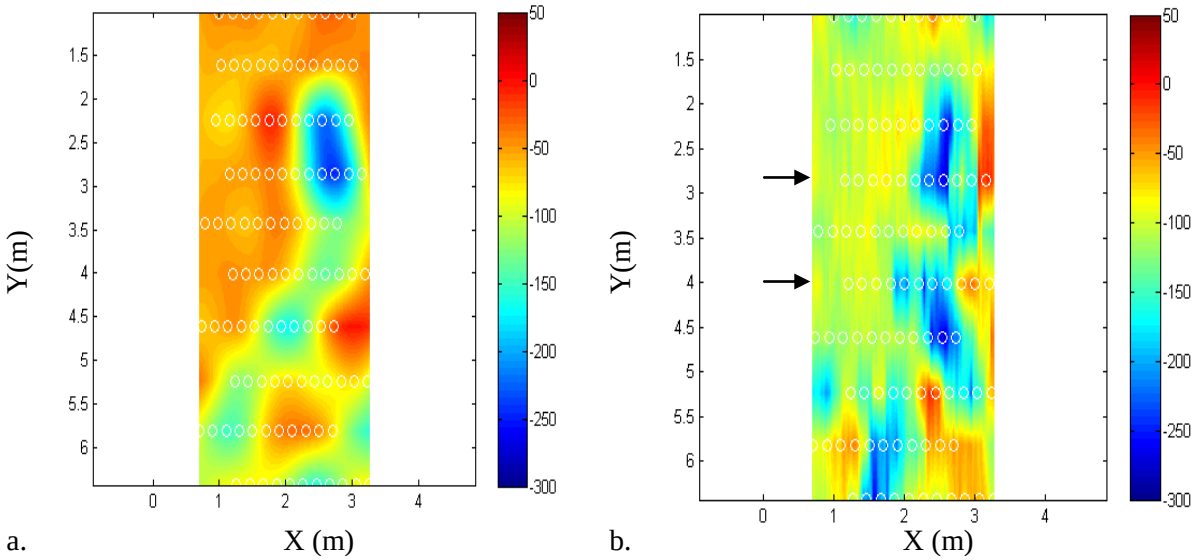


Figure 74 : Champ de déformation (en µm/m) après soustraction de la température interne de la structure mesurée par un interrogateur Raman au niveau de la nappe n°1 mesuré par un capteur Brillouin (a) et Rayleigh (b) avec respectivement les pas de mesure de 10 cm (avec une base de mesure de 50 cm) et 1 cm à t = 72 h après le début de l'essai.

Nous nous focalisons maintenant sur l'évolution de la déformation mesurée par l'interrogateur Rayleigh en fonction du temps (entre la 50ème heure (Etat 0) après le début de l'essai et la 70 ème heure) pour deux tronçons du câble : Y = 2.2 m et 4.2 m (Figure 75 a. – c.).

Pour Y = 4.2 m, une déformation apparait à 51 h puis, entre 62 h et 63 h, la déformation augmente de manière significative. C'est à ce moment-là qu'une déformation apparait à Y = 2.2 m. Afin de détecter ces variations de déformations en fonction du temps, il est intéressant de calculer la déformation entre deux états voisins entre t et $t+\Delta t$. Etant donné que Δt = 1h dans notre cas, nous l'appelons la déformation horaire. Le kurtosis de chaque ligne est un indicateur de la largeur de la distribution des valeurs de la déformation horaire. Lorsqu'une déformation importante apparait pendant Δt, la valeur du kurtosis sera importante. Pour détecter les heures durant lesquelles la déformation augmente ou diminue de manière significative, il suffit alors de calculer la dérivée du kurtosis. Sa dérivée sera nulle lorsque le kurtosis n'augmentera que très peu, i.e. que la déformation reste constante. Nous avons effectué ce calcul pour les deux matrices de déformation et les résultats sont présentés dans les Figure 75 b. – d. Le premier pic apparait à 51 h pour Y = 4.2 m,et à 63 h pour Y = 2.2 m. Pour l'instant, le seuil de détection de ces pics est empirique, mais une perspective intéressante serait de le généraliser pour avoir un seuil automatique.

Afin de vérifier la crédibilité de cette technique, nous avons voulu vérifier les signatures de la déformation mesurées aux horaires autour des pics de la dérivée de la valeur du kurtosis (Figure 76). Nous pouvons constater que dès que la déformation dépasse le niveau de bruit (de l'ordre de l'incertitude de l'interrogateur Rayleigh, i.e. +/- 10 µm/m), l'heure correspondante est détectée.

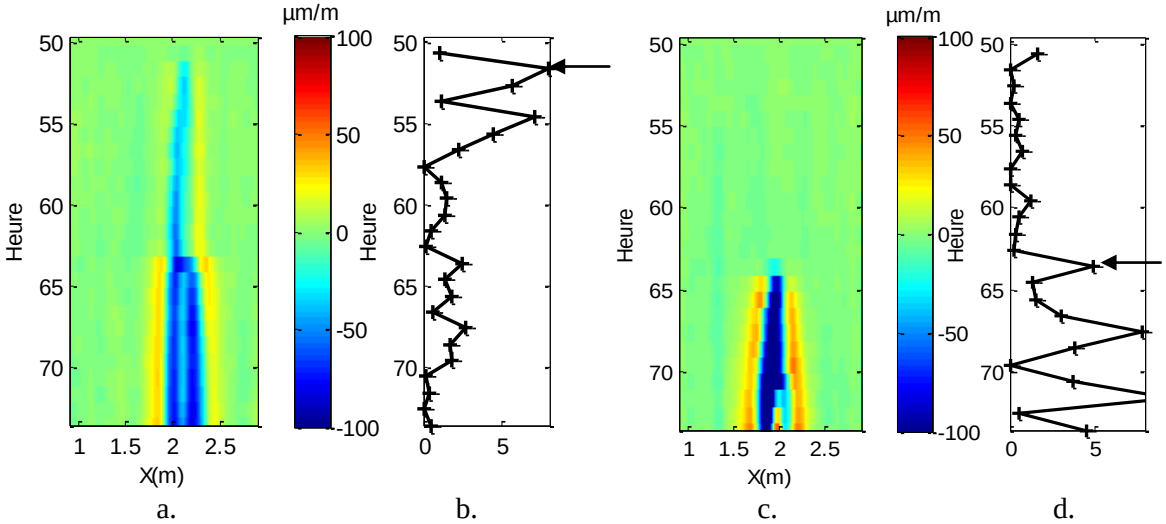


Figure 75 : Evolution de la déformation relative entre la 50ème h (Etat 0) et la 70ème h après le début de l'essai pour Y = 4.2 m (a) et 2.2 m (c). Evolution de la dérivée du kurtosis de la déformation horaire pour Y = 4.2 m (b) et 2.2 m (d).

Il est intéressant de noter que les signatures en déformation correspondent à celle de l'apparition d'une cavité dans un géomatériaux à X = 2.1 m et X = 1.95 m pour respectivement Y = 4.2 m (a) et 2.2 m (cf. expérience du CER de Rouen). Elle augmente en fonction du temps et s'étale en distance 'environ 40 cm aux instants de détection à presque 0.9 m à la 70ème heure. Nous pouvons supposer que cela est dû à l'augmentation de la taille du renard et donc du débit de la fuite qui engendre un déplacement important à cause du transport de particules fines.

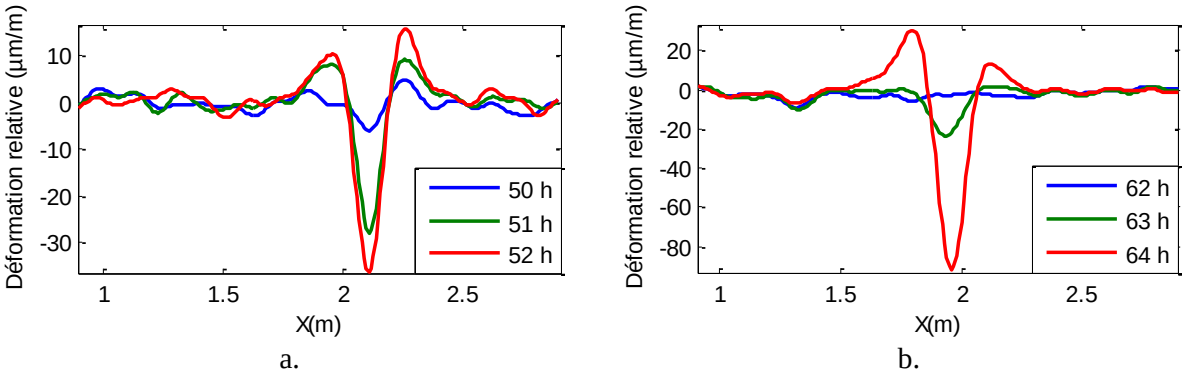


Figure 76 : Evolution de la déformation relative pour Y = 4.2 m (a) et 2.2 m (b) mesurée lors des heures autour des pics de détection.

Les autres algorithmes décrits dans la thèse n'ont pas été appliqués sur ce jeux de données par faute de temps. Comme la base de mesure est de 50 cm, il serait intéressant d'évaluer s'ils apportent des compléments d'informations sur la déformation réelle.

A. 2. Projet européen Ijkdijk :

Le projet européen Ijkdijk a pour but de comparer les méthodes d'auscultation d'une digue pour la détection de phénomènes d'érosion interne et externe. Une digue artificielle a été construite au Pays-Bas (Figure 77) pour des essais de macrostabilité. Les différents moyens de mesure étaient :

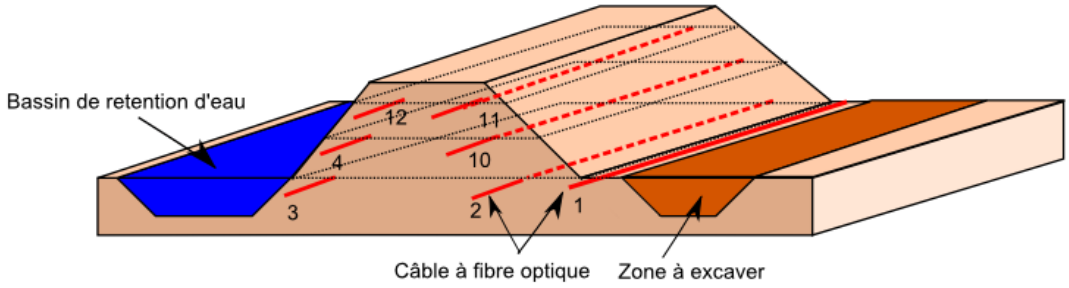
- 36 points de mesure de pression,
- 2 jauges de déformations,

- 2 inclinomètres,
- 3 appareils photographiques (2 pointant vers la pente Nord, 1 vers la pente Sud) prenant une photo HD toutes les 5min,
- un LiDAR terrestre scannant la face Nord de la digue,
- une chaîne d'acquisition de déformation par capteur à fibre optique.

Tencate, producteur de géotextile, a instrumenté la digue avec son produit Géodetect combinant un géotextile et des câbles à fibre optique. EDF a fourni un interrogateur Brillouin de résolution spatiale 50 cm.

La maquette est une reproduction d'une digue réelle à l'échelle 1:1 (50 m de longueur, 25 m de largeur et 4 m de hauteur). Un bassin artificiel de rétention d'eau est installé sur la pente sud de la digue. Afin de fragiliser la structure, une excavation du sol était réalisée tous les deux jours et des containers posés sur le sommet de la digue sont graduellement remplis d'eau.

Les essais ont duré une semaine du 03/09/12 au 08/09/12 avec une fréquence d'une mesure de déformation toutes les heures (Figure 78. a.). Sur le tronçon 4 (qui correspond au milieu de la digue), parmi les déformations réversibles dues aux variations de températures de l'air (cycle journalier), des déformations importantes commencent à apparaître le 04/09/12 autour du point de la digue à 46 m. Une augmentation nette de la déformation apparaît entre 13 h et 14 h (Figure 78. b.).



a.

b.

c.

Figure 77 : Digue instrumentée : projet européen Ijkdijk. a. Schéma de la position des câbles dans la digue instrumentée, orientation Nord. Photos de l'expérience de la face Nord : b. lors de la première excavation (Photo E. Buchoud). c. après la rupture de la digue (Ijkdijk).

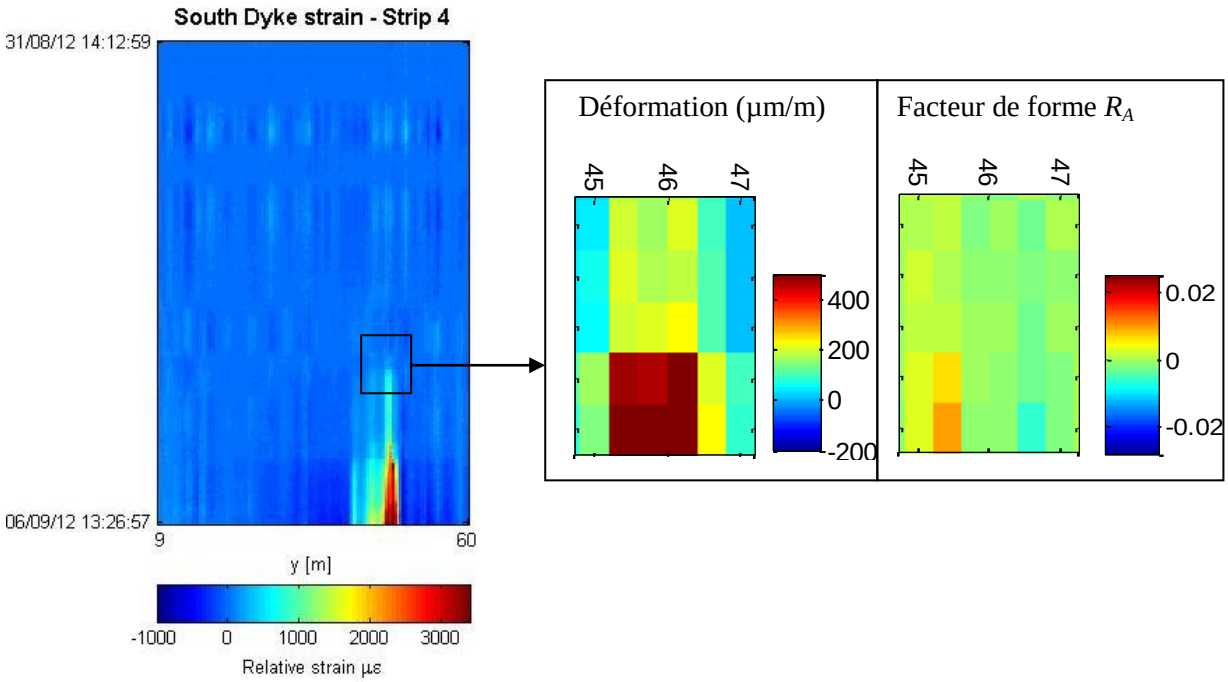
Malheureusement, aucun relevé de température n'a été fait sur place. De la même façon que pour le traitement de données acquises sur le site de Contrisson, des mesures de température d'un site météorologique pourraient être obtenues. Toutefois, au fur et mesure que la structure se déstabilisait, les containers étaient déséquilibrés et pendant plus de deux jours, de l'eau s'est déversé sur la digue

sur le côté nord de la digue. C'est pourquoi les mesures issues de ce côté de la digue ne sont pas exploitables sans mesures de température.

Un problème de poinçonnement du câble lors de l'installation a fragilisé la ligne optique. Le 07/09/12, les mesures de déformations se sont interrompues et après vérification, la ligne optique s'est avérée coupée. La rupture de la digue a eu lieu le 08/09/12 à 14h.

L'échange des données avec les autres capteurs n'a pas été rendue possible. Aucune précision sur la capacité de détection ou de quantification du déplacement de chaque technique de mesure n'a été fournie, seule une comparaison qualitative a été établie (Vries, 2013).

Les paramètres de forme pour détecter la distorsion des spectres ont été calculés. Les spectres étant assez bruités, seule la mesure de l'asymétrie donne des résultats intéressants (Figure 78. c.) : aux abords de la zone déformée, les spectres deviennent asymétriques à x = 45 m et 45.6 m.



a. b. c.

Figure 78 : a. Mesures de déformation (µm/m) sur le tronçon 4 de la digue en fonction de la distance et du temps. b. Zoom les mesures de déformation (µm/m) le 04/09/12 entre 45 m et 47 m. c. Facteur d'asymétrie R_A relatif calculé sur les spectres Brillouin mesurés entre 45 m et 47 m.

A. 3. Canal de Curbans :

L'ouvrage de Curbans est un canal de 5 km en aval de la retenue de Serre-Ponçon dans les Hautes-Alpes (Figure 79). Des travaux de réfection du canal ont été entrepris courant 2011. Ces travaux consistaient à vider le canal et à en garantir son étanchéité. Des câbles à fibre optique destinés à la mesure de température et de déformation ont été installés durant les travaux au niveau du radier. Géophyconsult a été mandaté pour la pose, les raccordements et les campagnes de mesure. Au total, 2,340 km de canal ont été instrumentés.

Le câble à fibre optique de déformation a été mis en place dans une tranchée remplie de sable à 20 cm sous le radier. L'ouvrage est surveillé régulièrement et plusieurs campagnes de mesure de températures et de déformations dans le même câble à fibre optique ont été effectuées depuis le début de l'exploitation de l'ouvrage. Nous n'allons pas utiliser les données de ce site qui sont confidentielles.

Figure 79 : Site industriel : canal de Curbans (E. Buchoud).

Annexe B : Validation du modèle de la chaîne de mesure

Problématique

La validation du modèle grâce à des données expérimentales repose sur deux points : l'estimation du profil de fréquence Brillouin $\boldsymbol{v_B(x)}$ centimétrique et du spectre élémentaire $\boldsymbol{s_e(v)}$ du câble utilisé.

Pour estimer le profil $\boldsymbol{v_B(x)}$, la solution est l'utilisation d'un interrogateur de type OFDR qui permet de fournir un profil de déformation $\boldsymbol{\varepsilon^R(x)}$ avec un pas de mesure centimétrique. Celui-ci est relatif entre deux états 0 initial et 1 déformé (en supposant que la température est constante) :

$$\boldsymbol{\varepsilon^{Rayleigh}(x)} = \frac{\boldsymbol{v_{R1}(x) - v_{R0}(x)}}{\boldsymbol{C_\varepsilon^R}} \qquad \text{(B-1)}$$

Pour pouvoir exprimer $\boldsymbol{v_B(x)}$ en fonction du profil centimétrique de la déformation, nous supposons qu'à l'état initial la fibre optique ne subit aucune déformation :

$$\boldsymbol{v_B(x)} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon^R(x)}}{\boldsymbol{C_\varepsilon^B}} \qquad \text{(B-2)}$$

Il existe toujours une contrainte résiduelle (due à la fabrication du câble à fibre optique) mais nous devons la négliger.

Mis en œuvre d'un banc d'expérimentation

Une expérience a été établie pour vérifier le modèle dans un laboratoire d'EDF. Il s'agit de mettre en traction une portion de 4 m d'un câble à fibre optique, tout en vérifiant que la température est constante dans le laboratoire. Deux interrogateurs sont branchés au câble : un DiTest STA-R, d'Omnisens dont les paramètres d'acquisition sont w = 1 m, Δz = 40 cm et Δv = 1 MHz ; l'OBR de Luna Technology, dont le pas de mesure est de 3 cm. Une première mesure est effectuée lorsque le câble n'est pas contraint. Ensuite, il est disposé entre deux points d'attache qui permettent de mettre en traction le câble sur 4 m. Une première mesure est acquise par chacun des deux interrogateurs (Figure 80 - Etat 1). Un point est fixe, l'autre est lié à un pied à coulisse millimétrique. Le câble est alors mis en tension sur plusieurs paliers successifs de déformation : à 500 µm/m (Figure 80 - Etat 2), à 1000 µm/m (Figure 80 - Etat 3), et à 1200 µm/m (Figure 80 - Etat 4). Pour chaque palier, les mesures de spectres Brillouin et de déformations Rayleigh sont acquises.

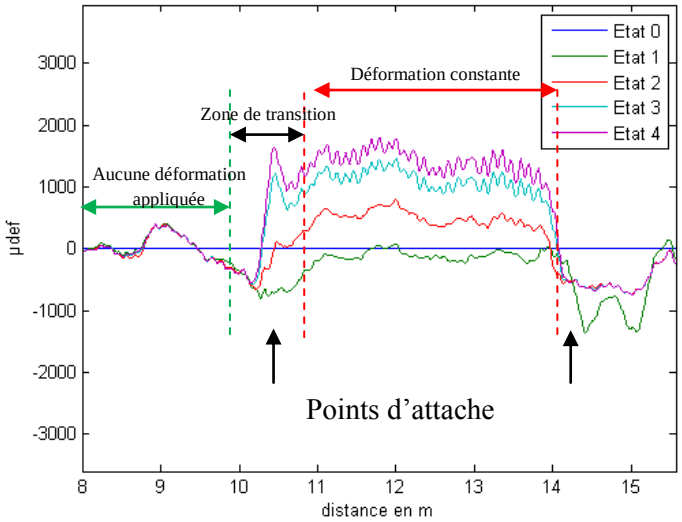


Figure 80 : Mesures de déformations relatives Rayleigh entre l'état de référence et les étapes de l'installation du câble A.

Estimation de la fonction de transfert

Si la déformation est uniforme sur la résolution spatiale de l'appareil, alors le spectre mesuré correspond au spectre naturel de la fibre optique $\boldsymbol{s_e(v)}$ convolué avec la fonction de transfert de l'appareil $\boldsymbol{d(v)}$.

Toutefois, il est possible d'estimer $\boldsymbol{s_e(v)}$ en considérant la déformation constante sur toute la longueur de la fibre optique. En prenant en compte les zones où elle est nulle ou constante, les spectres alors mesurés ont la même forme. En les moyennant, le bruit de mesure est atténué et cela permet d'estimer $\boldsymbol{s_e(v)}$.
En pratique, il est difficile d'avoir une déformation uniforme au sein de la fibre optique. Les fibres sont torsadées autour d'un axe central et donc précontraintes. La déformation apparait alors oscillante avec une période correspondante à la distance de l'enroulement des fibres autour de cet axe. Cela peut avoir un effet sur l'estimation du spectre élémentaire.

Estimation de la fréquence Brillouin dans la fibre optique

La Figure 81 montre la bonne correspondance entre le profil de fréquence Brillouin mesuré par l'appareil (en bleu avec un pas de mesure de 40 cm) pour un même état de contrainte et le profil de fréquence Brillouin estimé par l'éq. (B-2) (Figure 81, en rouge). Ce dernier est donc la donnée d'entrée du modèle.

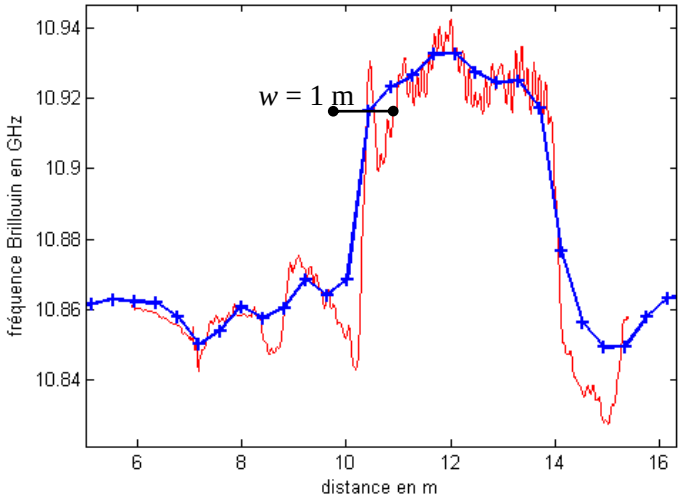
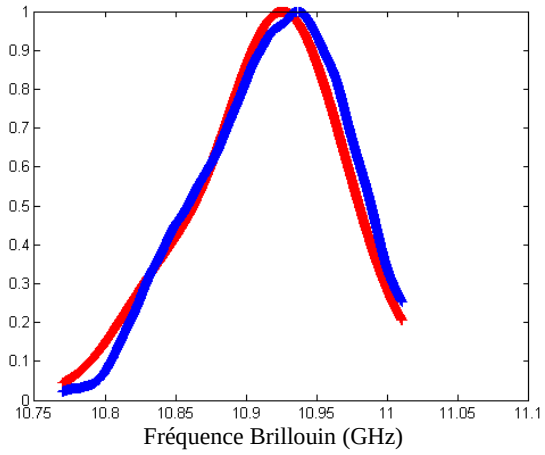


Figure 81 : Profil de fréquence Brillouin mesuré par l'interrogateur Brillouin (w = 1 m, Δz = 40 cm) pour l'état 3 (en bleu) et le profil de fréquence Brillouin centimétrique (pas de mesure de 3 cm) estimé en entrée du modèle direct (en rouge).

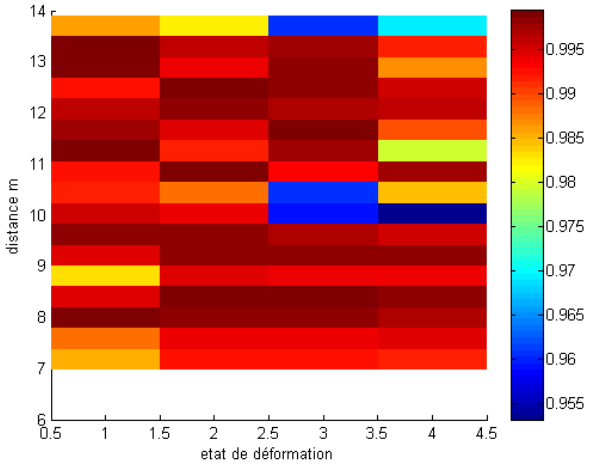
Performances du modèle

Le modèle permet de fournir des spectres Brillouin en fonction des paramètres de l'appareil. Pour les différents paliers de déformation, le modèle a été appliqué et la corrélation entre les spectres mesurés et simulés en fonction de la distance a été calculée.

Pour les états 1 et 2, la corrélation entre les spectres est supérieure à 0.99. Lorsque la déformation est supérieure à 500 µm/m (Etats 3 et 4), des zones de déformation très irrégulières apparaissent au sein de la base de mesure. Les spectres mesurés apparaissent distordus (Figure 82. a.). Le modèle va pouvoir rendre compte de la distorsion du spectre. Pourtant, l'erreur entre les deux spectres augmente dans ces zones (le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0.96).



a.



b.

Figure 82 : a. Spectres simulés (en rouge) et mesurés (en bleu) pour le palier 3 acquis à la distance de 10 m. b. Evolution du coefficient de corrélation en fonction des différents paliers de déformation et de la distance.

Cette expérimentation nous permet donc de valider le modèle direct de la chaine de mesure. Le modèle induit des erreurs dans les zones de déformation importantes (1500 µm/m sur quelques centimètres).

Annexe C : Application des méthodes de séparation de température / déformation sur les données du site de Contrisson

C. 1. Crête de digue

Les algorithmes de séparation de sources sont appliqués sur les déformations issues de la ligne optique enterrée au niveau de la crête de digue (Figure 83. a.). Celle-ci est à environ 20 cm sous la surface de la structure et est donc fortement influencée par la température extérieure. Une anomalie en déformation est repérable entre 0 et 5 m : celle-ci est due à l'influence de l'air au niveau des locaux de soudure. Sur le reste des distances, aucune augmentation notable de la déformation n'apparait selon le temps. Des variations périodiques sont présentes sur les données qui sont dues aux cycles saisonniers. Il en va de même de la mesure de température au sein de la fibre optique (Figure 83. b.).

Le soustracteur de bruit permet de séparer les variations thermiques réversibles (Figure 83. d.) de la déformation athermique (Figure 83. c.). Le coefficient β optimal est estimé à $\beta = 30.99\ \mu\varepsilon/°C$. Deux zones en distance apparaissent alors : entre 5 m et 47 m, la moyenne de la déformation est supérieure à la déformation entre 47 m et 100 m. Une déformation résiduelle peut subsister à cause de l'influence du local de soudure.

Cette distinction se retrouve également sur le résultat de la reconstruction de la déformation athermique après l'EMD (Figure 83. e. et f.). Pour comparer les deux méthodes, nous projetons les matrices sur l'axe temporel (Figure 83. g.). La déformation moyenne fournie par le soustracteur de bruit est constante autour d'une moyenne de 18.3 µm/m, alors que des variations subsistent dans la déformation moyenne fournie par l'EMD. Il est difficile de statuer sur les performances des algorithmes puisqu'aucune mesure de référence n'est disponible. Toutefois, comme nous avons une estimation du bruit thermique, il est préférable d'utiliser le soustracteur de bruit qui permet de retrouver une déformation quasiment constante.

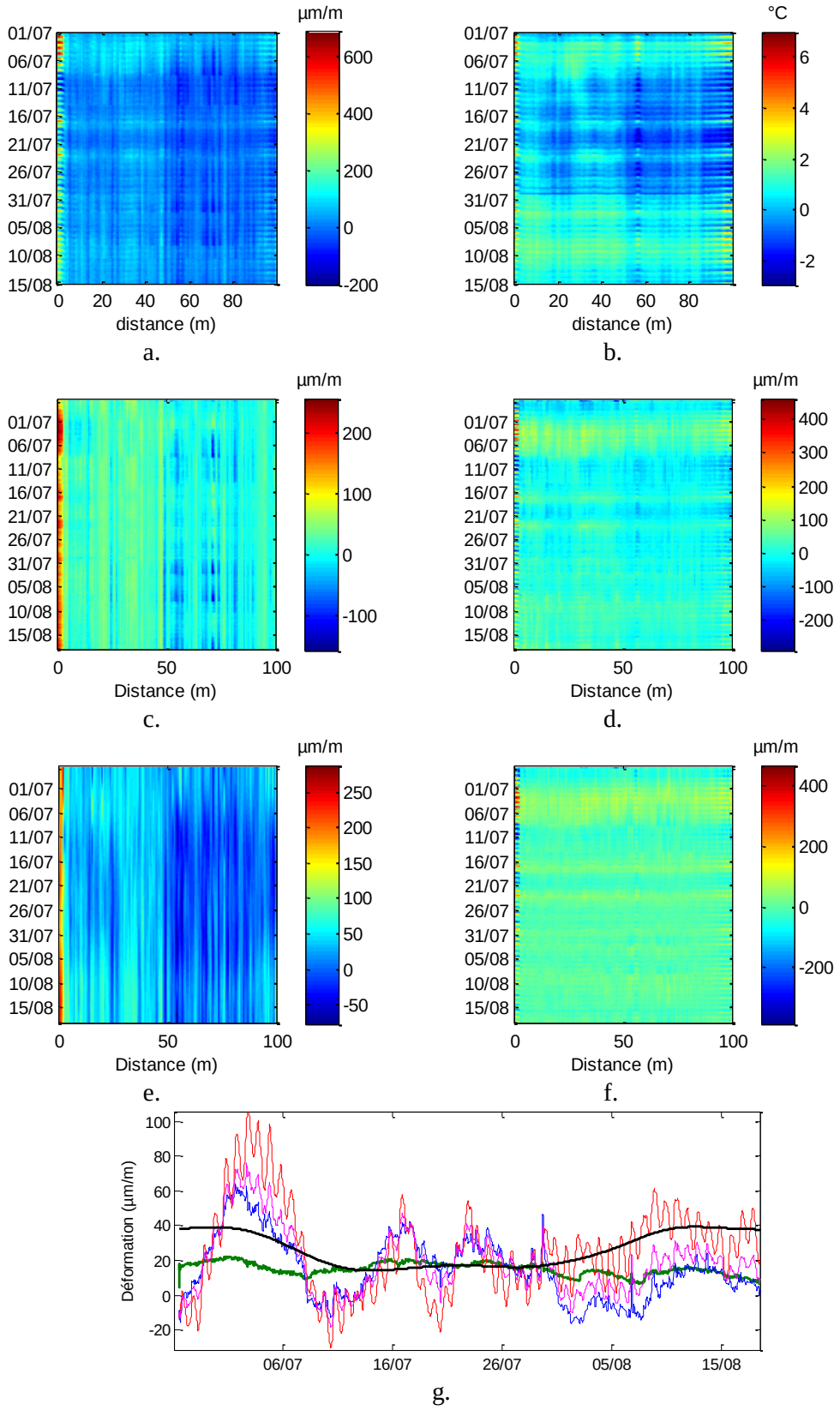


Figure 83 : (a). Mesures de déformation issues de la ligne optique de la crête de digue. (b). Mesures de températures issues de la ligne optique de la crête de digue. (c). Estimation de la déformation athermique et thermique totale (d) grâce au soustracteur de bruit avec comme référence la température de l'air extérieur mesuré par Météo France. (e). Estimation de la déformation athermique et thermique totale (f) grâce à l'EMD avec comme seuil de reconstruction P = {M-1, M}. (g) Projection des

estimations des déformations : $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}(x,t)}$ en rouge, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ en bleu pour β =30.99 $\mu\varepsilon/°C$ et β =20 $\mu\varepsilon/°C$ (valeur issue de la littérature) en magenta, $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ grâce au soustracteur de bruit (en vert) et l'EMD (en noir).

C. 2. Bas du talus

Pour la ligne optique en bas du talus, le câble est à une profondeur supérieure au mètre. Les variations dues à l'influence de l'extérieur de la structure sont bien moindres que pour les lignes optiques en pied et crête de digue. Dans cette configuration, les facteurs internes ont plus d'influence. Il est à noter qu'à x = 12 m la déformation augmente (Figure 84. a.) du 05/08 au 20/08 et atteint le maximum à 412 µm/m. Deux zones d'anomalies thermiques (Figure 84. b.) ont été repérées dans les mesures de température à x = 26 m et 38 m.

Nous appliquons les deux méthodes de séparation de sources avec et sans références de température proposées (cf. III.1.2.1 et III.1.2.2) (Figure 84. c-f.). Le coefficient β optimal est de 20.46 $\mu\varepsilon/°C$, ce qui est très proche de la valeur issue de la littérature. Il est intéressant de noter que la déformation athermique estimée par les deux méthodes est presque identique. Les trois différences sont :

- la déformation estimée par l'EMD présente moins de bruit en haute fréquence.
- la déformation maximale à x = 12 m est estimée à 324 µm/m pour le soustracteur de bruit et 367 µm/m pour l'EMD.
- En termes de moyenne (Figure 84. g.), l'estimation par l'EMD suit la moyenne de la déformation fournie par l'appareil, alors qu'un biais plus important apparait sur l'estimation du soustracteur de bruit. Cela est dû à l'étape de soustraction de la température de la fibre optique.

Dans les déformation thermiques totales (Figure 84. d et f.), les deux anomalies thermiques identifiées à x = 26 m et 38 m se retrouvent. Comme les variations périodiques de la température dues à la saison n'interviennent que très peu dans $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{th}}^{\mathrm{tot}}$, nous isolons en quelque sorte les manifestations en déformation et en température d'une fuite. Il serait intéressant d'appliquer les méthodes de détection de fuites (Khan, 2011) sur ces données.

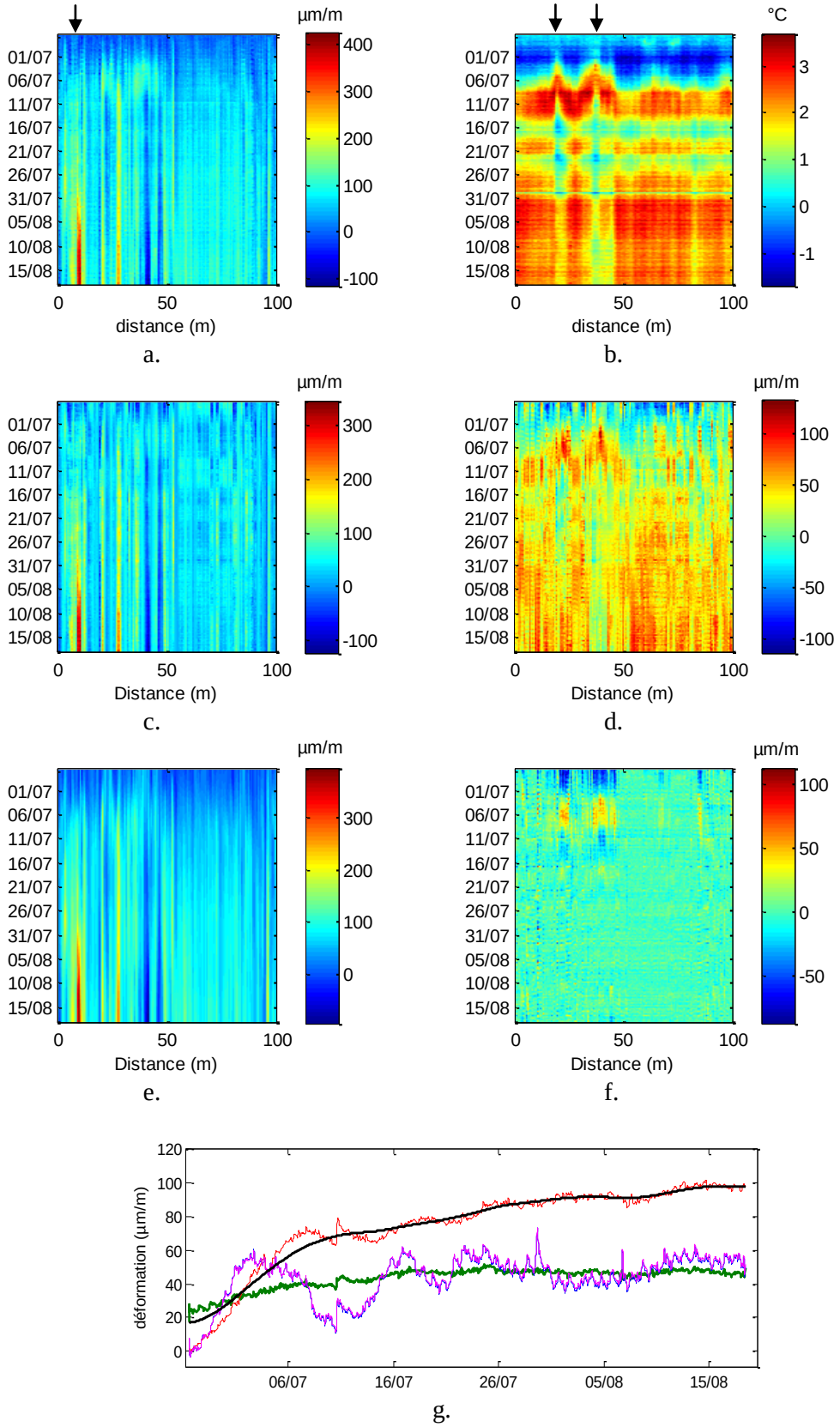


Figure 84 : Mesures de déformation (a) et de température (b) issues de la ligne optique du milieu du talus. (c). Estimation de la déformation athermique et thermique totale (d) grâce au soustracteur de bruit avec comme référence la température de l'air extérieur mesuré par Météo France. (e). Estimation de la déformation athermique et thermique totale (f) grâce à l'EMD avec comme seuil de reconstruction P = {M-1, M}. (g) Projection des estimations des déformations : $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}(x,t)}$ en

rouge, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ en bleu pour β =20.46 $\mu\varepsilon/°C$ et β =20 $\mu\varepsilon/°C$ (valeur issue de la littérature) en magenta, $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ grâce au soustracteur de bruit (en vert) et l'EMD (en noir).

C. 3. Milieu de talus

Pour la ligne optique au milieu du talus, le câble est à une profondeur supérieure au mètre. Il est à noter qu'à x = 46 m, la déformation augmente (Figure 85. a.) du 11/07 au 20/08 et atteint le maximum à 455 µm/m. Une anomalie thermique (Figure 85. b.) a été repérée dans les mesures de température à x = 30 m.

Nous appliquons les deux méthodes proposées (Figure 85. c-f.). Le coefficient β optimal est de 19.54 $\mu\varepsilon/°C$, ce qui est très proche de la valeur issue de la littérature. Nous arrivons aux mêmes constatations déduites des mesures issues du bas de digue.

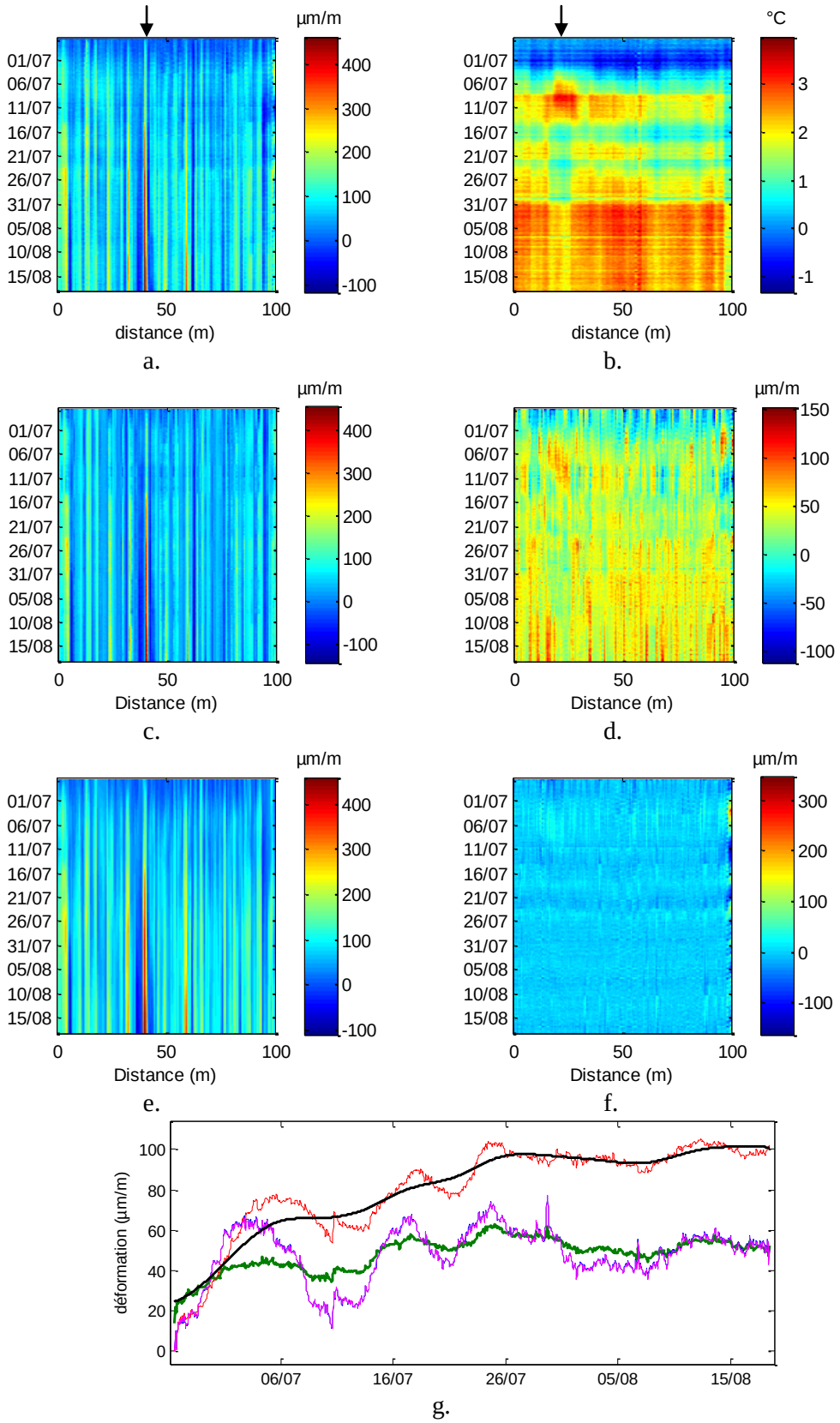


Figure 85 : Mesures de déformations (a) et de températures (b) issues de la ligne optique du milieu du talus. (c). Estimation de la déformation athermique et thermique totale (d) grâce au soustracteur de bruit avec comme référence la température de l'air extérieur mesuré par Météo France. (e). Estimation de la déformation athermique et thermique totale (f) grâce à l'EMD avec comme seuil de reconstruction P = {M-1, M}. (g) Projection des estimations des déformations : $\boldsymbol{\varepsilon_{FO}^{B-OTDA}(x,t)}$ en

rouge, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{FO}{}^{sous}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ en bleu pour β =19.54 $\mu\varepsilon/°C$ et β =20 $\mu\varepsilon/°C$ (valeur issue de la littérature) en magenta, $\widetilde{\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{t})$ grâce au soustracteur de bruit (en vert) et l'EMD (en noir).

Bibliographie :

Al-Saigh, N. H., Z. S. Mohammed, & M. S. Dahham, (1994). “Detection of water leakage from dams by self-potential method”. *Engineering Geology*, Vol. 2, No. 37, pp. 115-121.

Ansari, F., & Y. Libo, (1998). “Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors”. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 4, pp. 385-394.

Artieres, O., L. Briancon, & A. Robinet, (2012) « Auscultation d'ouvrages avec un capteur géotextile à fibres optiques »,[en ligne], *Revue SET*, No. 08, p. 30-37.

Bao, X., J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb, & D. A. Jackson, (1995) “Experimental and theorical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No.7, pp. 1340–1348.

Bao, X. & L. Chen, (2011), “Recent progress in Brillouin scattering based on fiber sensors.”, *Sensors*, Vol.11, pp. 4152-4187.

Bao, X., A. Brown, M. DeMerchant, & J. Smith, (1999), “Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (<10ns) pulses”, *Optics Letters*, Vol. 23, No. 8, April 15.

Bastianini, F., A. Rizzo, N. Galati, U. Deza, & A. Nanni (2005, May). “Discontinuous Brillouin strain monitoring of small concrete bridges: comparison between near-to-surface and smart FRP fiber installation techniques”. *In Proceeding of Smart Structures and Materials, International Society for Optics and Photonics*, Vol. 5765, pp. 612-623.

Barnoski, M. K., & S.M. Jansen, (1978). “Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber”. *Optics Letters*, Vol. 19, No. 2, pp. 2112-2115.

Barthelemy, F., X. Martin & J.-L. Nicolazo (2004). « La réglementation en matière de sécurité des barrages et des digues ». Rapport technique du Conseil général des mines.

Baudois, D., C. Serviere, & A. Silvent, (1989). « Soustraction de bruit ». Dans *Traitement du Signal*, Vol. 6, No. 5, pp. 389-497.

Beek V., H. Knoeff, & T. Schweckendiek (2011) - Piping: Over 100 years of experience – From empiricism towards reliability-based design, A feeling for soil and water – A tribute to prof. Frans Barends, *Deltares Select Series 07/2011*, Deltares, Delft, Hollande.

Béguin, R., (2012), “Etude multi-échelle de l’érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre’’, Thèse soutenue à l’Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

Bernini, R., A. Minardo, & L. Zeni, (2008). “Vectorial dislocation monitoring of pipelines by use of Brillouin-based fiber-optics sensors”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 1, pp. 150-156.

Blairon, S., J-M. Hénault, E. Buchoud, G. Vinceslas, & S. Delepine-Lesoille, (2011) “Truly distributed optical fiber extensometers for geotechnical structure monitoring (dikes and underground

repository): Influence of sensor external coating" *8th International Symposium of Field Measurements of Geomechanics*, Berlin, Germany, September.

Bonelli, S., N. Benahmed, P. Philippe, A. Bernard, Y. Grémeaux, & G. Nunes (2009). « Evaluer le temps de rupture d'une digue en remblai érodée par conduit traversant. » *Ingénieries numéro spécial*, pp. 85-94.

Bro, R. & S. De Jong, (1997). "A fast non-negativity-constrained least squares algorithm", in *Journal of Chemometrics*, Vol. 11, pp. 393–401

Brossier, R. (2009). « Imagerie sismique à deux dimensions des milieux visco-élastiques par inversion des formes d'ondes : développements méthodologiques et applications ». Thèse soutenue à l'Université Nice Sophia Antipolis, France.

Buchoud, E., S. Blairon, G. D'Urso, J-M. Henault, A. Girard, J. Mars, & V. Vrabie, (2012). "Detection of ground movement using the shape of Brillouin spectrum", *Near Surface Geoscience 2012*, September 5, Paris.

Buchoud, E., J-M. Henault, G. D'Urso, A. Girard, S. Blairon, J.I. Mars, & V. Vrabie (2012). "Development of an automatic algorithm to analyze the cracks evolution in a reinforced concrete structure from strain measurements performed by an Optical Backscatter Reflectometer". *Civil Structure Health Monitoring-4 Proceedings*, Berlin Germany 2012.

Buchoud, E., V. Vrabie, J.I. Mars, G. D'Urso, A. Girard, S. Blairon, & J-M. Henault, (2013. a.). "Enhancement of an Optical Fiber Sensor: Source Separation Based on Brillouin Spectrum". *IEEE Access*, Vol. 1, pp. 789 – 802.

Buchoud, E., V. Vrabie, J.I. Mars, G. D'Urso, A. Girard, S. Blairon, & J-M. Henault, (2013. b.). « Séparation de sources non négatives parcimonieuses appliquée aux spectres Brillouin acquis par capteur à fibre optique ». *24ème édition du colloque Gretsi*.

Buchoud, E., V. Vrabie, G. D'Urso, J-M. Henault, A. Girard, J.I. Mars, & S. Blairon (2014). "Parametric inversion of Brillouin spectra using L-curve criterion to enhance the accuracy of distributed strain measurement". *76th European Association of Geosciences Engineering Conference & Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, 16-19 June.

Buciu, I., & I. Pitas, (2004). "Application of non-negative and local non negative matrix factorization to facial expression recognition". *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 288-291.

Carnec, C., S. Le Mouelic, D. Raucoules, C. Delacourt, & C. King, (2002). « Le satellite : un outil de mesure des faibles déformations du sol ». Journées pour la Prévention des Risques Naturels (JPRN).

CEMENTYS, http://www.cementys.com/technologies/capteurs-corde-vibrante.

Chang J.-H. (1958). "Ground temperature", *Harvard University, Blue Hill Meteorological Observatory*, Vol. 1.

Che-Hsien L., K. Nishiguchi, M. Miyatake, A. Makita, M. Yokoyama, K. Kishita, T. Mozutani et N. Takeda. (2008). “PPP-BOTDA method to achieve 2 cm spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique”. *IEICE Technical Report OFT2008-13*.

Chevalier, B., G. Combe, & P. Villard, (2009). “Experimental and Numerical Study of the Response of Granular Layer in the Trap-door Problem”. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1145, pp. 649.

Chen, D., & R. J. Plemmons, (2009). “Nonnegativity constraints in numerical analysis”. *Symposium on the Birth of Numerical Analysis*, pp. 109-140.

Cichocki, A., & S. I. Amari (2002). “Adaptive blind signal and image processing: learning algorithms and applications”. Edition John Wiley & Sons.

Comon, P. (1994). “Independent component analysis, a new concept?”. *Signal processing*, Vol. 36, No. 3, pp. 287-314.

Comon, P., & C. Jutten, (2010). “Handbook of Blind Source Separation: Independent component analysis and applications”. Academic press.

Cumunel, G. (2008). « Extensomètres à fibre optique Longue Base pour l’évaluation dynamique des structures ». Thèse soutenue à l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

Cunat, P. (2012). « Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse des températures réparties, mesurées par fibre optique ». Thèse soutenue à l’Université de Grenoble, France.

Dakin, J.P., D.J. Pratt, G.W. Bibby, & J.N. Ross, (1985). “Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light-source and detector.” *Electronics Letters*, Vol. 21, No.13, pp. 569-570.

Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement**.**

Delacourt, C., P. Allemand, B. Casson, & H. Vadon, (2004). “Velocity field of the “La Clapière” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images”. *Geophysical Research Letters*, Vol.15, No. 31, pp. 1-5.

Demoment, G., J. Idier, J. F. Giovannelli, & A. Mohammad-Djafari, (2001). « Problèmes Inverses en Traitement du Signal et des images ». Ed. Techniques Ingénieur.

Dobigeon, N. (2007). « Modèles bayésiens hiérarchiques pour le traitement multi-capteur », Thèse soutenue à l’institut National Polytechnique de Toulouse, France.

Dobigeon, N., A. O. Hero, & J. Y. Tourneret, (2009). « Reconstruction bayésienne d'images MRFM parcimonieuses. » *XXIIe colloque GRETSI (traitement du signal et des images), Dijon (FRA), 8-11 septembre 2009*. GRETSI, Groupe d’Etudes du Traitement du Signal et des Images.

Durville, J. L., J. Kasperski, & J. P. Duranthon, (2009). “The Séchilienne landslide: monitoring and kinematics.” *Rainfall induced landslides, 1st Italian Workshop on Landslides*, Napoli, Vol. 1, pp. 174-180.

Fargier, Y. (2011). « Développement de l’imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. ». Thèse soutenue à l’Ecole Centrale de Nantes, France.

Ferdinand, P. (1999). « Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg ». dans *Techniques de l’Ingénieur, traité Mesures et Contrôle*, Vol. 6, pp. 735-736.

Févotte, C., N. Bertin, & J. L. Durrieu, (2009). “Nonnegative matrix factorization with the Itakura-Saito divergence: With application to music analysis”. *Neural computation*, Vol. 21, No. 3, pp.793-830.

FibrisTerre, http://www.fibristerre.de/files/fibrisTerre_flyer.pdf

Foster, M., R. Fell, & M. Spannagle, (2000). “The statistics of embankment dam failures and accidents”. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 37, pp. 1000-1024.

Frogatt, M. & J. Moore, (1995) “High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter”. *Applied Optics*, Vol. 37, No. 10, pp. 1735-1740.

Fowles, G. R. (1975). “Introduction to modern optics”. Dovez, NewYork, USA.

Galindez-Jamioy, C. A., & J. M. López-Higuera (2012). “Brillouin distributed fiber sensors: an overview and applications”. *Journal of Sensors*, Vol. 2012, pp. 1-17

Geman, S. & D. Geman, (1984). “Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images.” *IEEE Transaction on Pallern Analysis Machine Intelligence 6*, pp. 721-741.

Gobinet, C. , V. Vrabie, O. Piot & M. Manfait (2008). « Prétraitements et méthodes de séparation de sources pour l'analyse des spectres Raman issus d'échantillons biologiques ». IRBM, Vol. 29, No. 1, pp. 13-19.

Gomes Pereira, L. M., & R. J. Wicherson, (1999). “Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones”. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 2, No. 54, pp. 105-114.

Glombitza, U. & E. Brinkmeyer, (1993), “Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides”. *Journal of Lighwave Technology*, Vol. 11, No. 8, pp. 1377-1384.

Goubet, A. (1979). « Risques associés aux barrages ». *La Houille Blanche*, No. 8, pp.475-490.

Guidoux, C. (2008). «Développement et validation d’un système de détection et de localisation par fibres optiques de zones de fuites dans les digues en terre », Thèse soutenue à l’Université de Grenoble, France.

Hastings, W. K., (1970), “Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and their applications”, *Biometrika*, Vol. 57, No.1, pp. 97-109.

Hauswirth, D., (2009). “Development of a fibre optic strain sensor for soil displacement monitoring”. *Int. Symp. on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation,* Kyoto, Japan, pp. 451-456.

Hauswirth D., (2010). “Development of a fibre optic strain sensor for soil displacement monitoring”, *European Young Geotechnical Engineers Conference*.

HBM, OL optical strain gauges – Characteristic features, B2266-6.

Hénault, J.M., M. Quiertant, S. Delepine-Lesoille, J. Salin, G. Moreau, F. Taillade, & K. Benzarti, (2012) “Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system”. *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 916–923.

Hénault, J.M., (2013), « Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure répartie de déformation - Application à un câble à fibre optique noyé dans le béton », Thèse soutenue avec l’Université Paris-Est, France.

Higuchi, K., K. Fujisawa, K. Asai, A. Pasuto, & G. Marcato, (2007), “Application of new landslide monitoring technique using optical fiber sensor at Takisaka Landslide, Japan”. *AEG Special Publication. Proceedings of the first North American landslide conference.* Vail, Colorado, USA, pp. 1074-1083.

Hochard, G., & F. Ranvier, (2012). « Auscultation par satellite pour la surveillance des ouvrages : application de la méthode d’interférométrie radar satellitaire pour la modélisation, la surveillance et la détection d’anomalies. » Colloque CFBR : Auscultation des barrages et des digues, Novembre 2012, Chambéry, France.

Horiguchi T. , & M. Tateda, (1989). “BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory”, *Journal of Lightwave Technology,* Vol. 7, pp. 1170-1176.

Hotate, K., & T. Hasegawa, (1999). “Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber with a high spatial resolution using a novel correlation-based technique – Demonstration of 45cm spatial resolution”. *Conference Proceeding of 13th Internatinal Conference on optical fiber sensors (OFS), Kyungju, Korea,* pp. 337-340.

Hotate, K., & M. Tanaka, (2000). “Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1cm spatial resolution by correlation-based continuous wave technique”. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering,* Vol. 4185, pp. 647-650.

Hoyer, P. O. (2004). “Non-negative matrix factorization with sparseness constraints”. *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 5, pp. 1457-1469.

Huang, J., & R. Gutierrez-Osuna, (2013, May). “Active analysis of chemical mixtures with multi-modal sparse non-negative least squares”. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 8756-8760.

Huang, N.E., Z. Shen, S.R. Long, M.L. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung & H.H. Liu, (1998), "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 454, pp. 903–995.

Idier, J. (2010). "Bayesian approach to inverse problems" (Vol. 35). Ed. John Wiley & Sons.

Ijkdijk, http://www.ijkdijk.nl/en/home.

Inaudi, D., & B. Glisic, (2010) "Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing". *Journal of pressure vessel technology*, Vol. 132, pp. 0117011-0117019.

Iten, M., A. Schmid, D. Hauswirth, & A. M. Puzrin, (2009). "Defining and monitoring of landslide boundaries using fiber optic systems". *Int. Symp. on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation*, Kyoto, Japan, pp. 451-456.

Iten, M. (2011), "Novel applications of distributed fiber- optic sensing in geotechnical engineering", Thèse soutenue à Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Switzerland.

Janin J-P., (2012) « Tunnels en milieu urbains : prévisions de tassements avec prise en compte des effets des pré-soutènements (renforcement du front de taille et voûte-parapluie) », Thèse soutenue à l'INSA de Lyon, France.

Kerzalé, S., D. Maillet, & A. Girard, (2012). "Estimation of simultaneous leakage flow rates and initial thermal state inside soil dikes through temperature measurements". *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 5, No. 20, pp.707-720.

Khan, A.A. (2011), "Séparation de sources thermométrique", Thèse soutenue à l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

Kim, H., & H. Park, (2007). "Sparse non-negative matrix factorizations via alternating non-negativity-constrained least squares for microarray data analysis". *Bioinformatics*, Vol. 12, No. 23, pp. 1495-1502.

Klar, A., & R. Linker, (2010). "Feasibility study of automated detection of tunnel excavation by Brillouin optical time domain reflectometry". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. *25*, No. 5, pp. 575-586.

Klar, A., I. Dromy, & R. Linker, (2014). "Monitoring tunneling induced ground displacements using distributed fiber-optic sensing". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 40, pp. 141-150.

Küntz, M., Jolin, M., Bastien, J., Perez, F., & Hild, F. (2006). "Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 11, pp. 1418-1425.

Lanticq, V., (2009). « Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ». Thèse soutenue à Telecom ParisTech, Paris, France.

Lawson, C. L., & R. J. Hanson, (1974) “Linear least squares with linear inequality constraints” in *Solving Least Squares Problems*, Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliff NJ.

Li, C-H., K. Kinshida, K. Nishgushi, A. Guzik, A. Makita & Y. Yamauchi, (2011). European Patent Application n° 09828966.3.

Lopez-Higuera, J.M., L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, & A. Cobo, (2011) "Fiber optic sensors in structural health monitoring," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 4, pp.587–608.

Mair, R. J., R. N. Taylor, & A. Bracegirdle, (1993), “Subsurface settlement profiles above tunnels in clays”, in *Géotechnique*, Vol. 43, No. 2, pp. 315-320.

Maughan, S. M., H. H. Kee, & T. P. Newson, (2001). “Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter”. *Measurement Science & Technology*, Vol. 7, No. 12, pp. 834-842.

Mazet V. (2011). “Joint Bayesian decomposition of a spectroscopic signal sequence”. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 18, No 3, pp. 191-184.

Metasensing, http://www.metasensing.com/ms/sensors.html

Meguid, M. A., O. Saada, M. A. Nunes, & J. Mattar, (2008). “Physical modeling of tunnels in soft ground: A review”. *Tunnelling and underground space technology*, Vol.23, No. 2, pp. 185-198.

Mériaux, P., P. Royet & C. Folton, (2004) « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations », Cemagref Editions.

Mériaux, P., L. Auriau, J. Maurin, A. Boulay, S. Lacombe, & S. Marmu, (2013, May). « La télédétection LiDAR héliportée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection ». *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions*-2e colloque national-Digues 2013 (p. 335). Editions Lavoisier.

Mitzithra, M. E. (2013). “Detection of corrosion of reinforced concrete on cooling towers of energy production sites”. Thèse soutenue à l’Université de Toulouse III-Paul Sabatier, France.

Montcuquet (2011). « Imagerie spectral pour l’étude de structures profondes par tomographie optique diffusive de fluorescence ». Thèse soutenue à l’Université de Grenoble, France.

Moussaoui, S., (2005). « Séparation de sources non-négatives : Application au traitement des signaux de spectroscopie ». Thèse soutenue à l’Université Henri Poincaré, Nancy 1.

Murayama, H., K. Kageyama, A. Shimada, & A. Nishiyama, (2005, May). “Improvement of spatial resolution for strain measurements by analyzing Brillouin gain spectrum”. *International Society for Optics and Photonics*, in Bruges, Belgium-Deadline Past, pp. 551-554.

Neubrex, http://www.neubrex.com/htm/products/pro-nbx7020.htm

Nikles, M., (2009) , “Long-distance fiber optic sensing solutions for pipeline leakage, intrusion and ground movement detection”, *Fiber Optic Sensors and Applications VI*, Vol. 7316, pp. 731602–731613.

Nitta, N., M. Tateda, & T. Omatsu, (2002). “Spatial resolution enhancement in BOTDR by spectrum separation method”. *Optical review*, Vol. 2, No. 9, pp. 49-53.

Nöther, N. (2010). Distributed fiber sensors in river embankments: Advancing and implementing the Brillouin optical frequency domain analysis. Thèse soutenue à l’Université de Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung (BAM), Berlin, Allemagne.

Ohno, H., H. Naruse, M. Kihara, & A. Shimada, (2001). “Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor”. *Optical fiber technology*, Vol.7, No. 1, pp. 45-64.

Ollivier, J-P. & A. Vichot, (2008). « La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. » Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

Omnisens, www.omnisens.ch

Pu, Y., W. Wang, Y. Yang, L. Sordillo, Y. Budansky, R. R. Alfano, & G. Tang, (2012). “Stokes shift spectroscopy and imaging for highlighting the difference of breast cancerous and normal tissues”. *Biomedical Optics, OSA Technical Digest BW1B, 6*.

Punskaya, E., C. Andrieu, A. Doucet, & W. J. Fitzgerald, (2002). ”Bayesian curve fitting using MCMC with applications to signal segmentation”. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 3, No. 50, pp. 747-758.

Oberlin, T., (2013). « Analyses de signaux multicomposantes : contributions à la décomposition modale empirique, aux représentations temps-fréquences et au synchrosqueezing », Thèse soutenue à l’Université de Grenoble, France.

OZ Optics, http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0127.pdf

Quiviger, A. (2012). « Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton.: approche linéaire et non linéaire », Thèse soutenue à l’Université d’Aix-Marseille.

Ravet, F., X. Bao, T. Ozbakkaloglu, & M. Saatcioglu, (2006), “Signature of Structure Failure Using Asymmetric and Broadening Factors of Brillouin Spectrum”. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 2, pp. 394 - 396.

Ravet, F., X. Bao, Y. Li, Q. Yu, A. Yale, V.P. Kalosha, & L.Chen, (2007. a.), “Signal processing technique for distributed Brillouin sensing at centimeter spatial resolution”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, No. 11, pp. 3610 - 3618.

Ravet, F., (2007. b.). “Performance of distributed Brillouin sensors : benefits and penalties due to pump depletion”. Thèse soutenue à l’Université d’Ottawa, Canada.

Ravet F., E.G. Ortiz, B. Peterson, G. Hoglund, & M. Nikles, (2011) “Geohazard prevention with online continuous fiber optic monitoring”, at *Rio Pipeline Conference & Exposition*, Septembre, Rio, Brazil.

Regier, R., & N. A. Hoult, (2014, March). “Distributed strain monitoring for bridges: temperature effects”. *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics*, pp. 906131-906131.

Regier, R., & N. A. Hoult, (2014). “Distributed strain behavior of a reinforced concrete bridge: Case study”. *Journal of Bridge Engineering*, en ligne.

Roctest Group, http://www.roctestgroup.com/sites

Royet, P., M. Poupard, (2001) « Surveillance des barrages », *Colloque technique du comité français des grands barrages (CFGB)*, Septembre, Aix en Provence, France.

Sagaseta, C. (1988). “Analysis of undrained soil deformation due to ground loss”. *Geotechnique*, Vol. 38, No. 4., pp. 647-649.

Sang A., M. Froggatt, D. Gifford, S. Kreger, & B. Dickerson, (2010) “One-centimeter spatial resolution temperature measurements in a nuclear reactor using Rayleigh scatter in optical fiber”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 8, pp. 1375–1380.

Sensornet, www.sensornet.co.uk/news/case-studies, 2009.

Shen, B., A. King, & H. Guo, (2008). “Displacement, stress and seismicity in roadway roofs during mining-induced failure”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 5, No. 45, pp. 672-688.

Sikali Mamdem Y., (2012) « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : Séparation de la dépendance à la température et à la déformation ». Thèse soutenue à Telecom ParisTech.

Smith J., A. Brown, M. de Merchant, & X. Bao, (1999), “Pulse width dependence of the Brillouin loss spectrum”. *Optics Communication* Vol.168, No.5-6, pp. 393-398.

Smolders, K., M. Volckaerta & J. Swevers (2008). “Tracking control of nonlinear lumped mechanical continuous-time systems : A model-based iterativenext term learning approach”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 8, No. 22, pp. 1896–1916.

Snyman, J.A. (2005). “Practical mathematical optimization : an introduction to basic optimization theory and classical and new gradient-based algorithms”. Springer publishing..

SOFO,http://www.roctestgroup.com/sites/default/files/datasheets/products/10.1010ENDS_SOFO%20Standard%20Deformation%20Sensor.pdf

Song, K. Y., Z. He & K. Hotate, (2006). “Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis”. *Optics Letters*, Vol. 31, pp. 2526-2528.

Song, K. Y., & K. Hotate, (2007). “Simplified Brillouin optical correlation domain analysis system with optimized time-gating scheme”. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optical Society of America.

Stephan, P., & J. Salin, (2012). “Ageing management of concrete structures: assessement of EDF methodology in comparison with SHM and AIEA guides”. *Construction and building materials*, Vol. 37, pp. 924-933.

Su-Chin Lo, C. W. B. (1991), “Infrared Spectral Search for Mixtures in Large-Size Libraries,” *Applied Spectroscopy*, Vol. 45, No. 10, pp. 1628-1632.

Tarantola, A. (1984). “Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation”. *Geophysics*, Vol. 49, No. 8, pp. 1259-1266.

Tikhonov, A.N., & V.A. Arsenin (1997). “Solution of ill-posed problems*”*. Winston & Sons.

Udd E., (1991) “Fiber Optic Sensors, an Introduction for Engineers and Scientists”. Wiley, *Series in Pures and Applied Optics*. Wiley & Sons.

Vachat, J. C. (1982). « Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne. Etude théorique et pratique de l’évolution des fontis ». Mémoire présenté au conservatoire national des arts et métiers, chair de géologie appliquée aux bâtiments et aux travaux publics.

Vandelest, C., E. Versteeg, J. H. Veerkamp & T. H. Vankuppevelt, (1995). “Elimination of autofluorescence in immunofluorescence microscopy with digital image-processing”. In *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, Vol. 43, No. 7, pp. 727-730.

Vasile, G., A. Anghel, D. Boldo, R. Boudon, G. D'Urso, & R. Muja, (2012). “Potential of Multi-Pass High-Resolution SAR Interferometry for Dam Monitoring”. *MTA Review* (ISSN 1843-3391), *special issue of the COMM conference*, Romanian Military Technical Academy Publishing House, Vol. 22, No. 4, pp. 235-246.

Vautrin, D., M. Voorons, J. Idier, Y. Goussard, S. Kerzalé, & N. Paul, (2011, February). “Seismic imaging of transmission overhead line structure foundations”. *IS&T/SPIE Electronic Imaging*. International Society for Optics and Photonics, pp. 787304-787304.

Villalba, S., & J. R. Casas, (2012). “Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 39, No. 1, pp. 441-451.

Virieux, J., & Operto, S. (2009). “An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics”. *Geophysics*, Vol. 74,No. 6, pp. 1-26.

Vogel, B., C. Cassens, A. Graupner, & A. Trostel, (2001) “Leakage detection systems by using distributed fiber optical temperature measurements,” *Proc. SPIE Smart Structures and Materials*, CA, USA, vol. 4328, pp. 23–34.

de Vries, G., C.K.E. ter Brake, H. de Bruijn, A.R. Koelewijn, H. van Lottum, E.A.F. Langius, W.S. Zomer, (2013) “Dijkmonitoring : beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen, Eindrapport All-in-one Sensor Validatie Test”, rapport d’activité.

Vurpillot, S. (1999). « Analyse automatisée des systèmes de mesure de déformation pour l'auscultation des structures ». Thèse soutenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse.

Wei, M-H., W. R. Scott, & J. H. McClellan, (2009). "Robust estimation of the discrete spectrum of relaxations for electromagnetic induction responses", *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 8, pp. 1169–1179.

Wiener, N., 1949, "Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series". New York: Wiley.

Wuilpart, M., A. Grillet, K. Yuksel, D. Gianone, G. Ravet, & P. Mégret, (2007). "Dynamics enhancement of OTDR-based monitoring systems for passive optical networks". *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, Brussels, pp. 167-170.

Yamauchi Y., (2010) "A measurement method to determine strain and temperature coefficients in fiber optic sensors," *presented at Proc. of Asian Pacific Workshop on Structural Health Monitoring Conference*, Tokyo, Japan.

Yin, Y., H. Wang, Y. Gao, & X. Li, (2010) "Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China". *Landslides*, Vol. 7, pp. 339-349.

Yokogawa : http://www.yokogawa.com/

Zhang, D., B. Shi, H. L. Cui, & H. Z. Xu, (2004). "Improvement of spatial resolution of Brillouin optical time domain reflectometer using spectral decomposition". *Optica Applicata*, Vol. 2, No. 34, pp. 291-302.

Zhang, D., H. Xu, B. Shi, H. Sui, & G. Wei, (2009). "Brillouin power spectrum analysis for partially uniformly strained optical fiber". *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 9, No.47, pp. 976-981.

Zhang, W., J. Gao, B. Shi, H. Cui, & H. Zhu, (2006). "Health monitoring of rehabilitated concrete bridges using distributed optical fiber sensing". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.21, No. 6, pp. 411-424.

Zhu, P., Y. B. Leng, Y. Zhou, & G. L. Jiang, (2011). "Safety Inspection Strategy for Earth Embankment Dams using Fully Distributed Sensing". *Proceeding Engineering*, Vol. 8, pp. 520-526.

Listes de publications et communications :

Les résultats présentés dans ce manuscrit ont fait l'objet de publications et ont été présentés à plusieurs congrès nationaux et internationaux. Nous détaillons nos différentes contributions dans les paragraphes suivants :

Publications publiées à des revues internationales spécialisées avec comité de lecture.

[A1]BUCHOUD E. VRABIE V., MARS J.I., D'URSO G., GIRARD A., BLAIRON S and HENAULT J.M., 2013, Enhancement of an optical fiber sensor: Source separation on Brillion spectrum, **IEEE Access**, Vol. 1, pp 789-802.

Communications publiées à des congrès avec comité de lecture et actes.

1. BUCHOUD E., BLAIRON S., HENAULT J.M., D'URSO G., GIRARD A. MARS J.I., and VRABIE V., 2013, Parametric Inversion of Brillouin spectra using L-curve criterion to enhance the accuracy of distributed strain measurement, 76th Meeting of European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE 2014), Amsterdam, Netherlands, June 2014.

2. MARS J.I., BUCHOUD E., VRABIE V., KHAN A. A., BLAIRON S. and D'URSO G., 2013, Source separation and distributed sensing: The key of an efficient monitoring, 5th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (IEEE CAMSAP 2013), San Martin, French West Indies, 15-18 December 2013, pp 264-267

3. BUCHOUD E., VRABIE V., MARS J.I., GIRARD A., D'URSO G., BLAIRON S., and HENAULT J.M., 2013, Nonnegative unmixing methodology applied on Brillouin optical fiber sensor, 21th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013), Marrakech, Sept. 2013.

4. BUCHOUD E., MARS J.I., VRABIE V., D'URSO G., GIRARD A., BLAIRON S., et HENAULT J.M., 2013, Séparation de sources non négatives parcimonieuses appliquée aux spectres Brillouin acquis par capteur à fibre optique, XXIV Colloque GRETSI, Brest, 3-6 Septembre 2013, ID201.

5. BUCHOUD E., BLAIRON S, D'URSO G, HENAULT J-M., GIRARD A., MARS J.I., and VRABIE V, 2012, Detection of ground movement using the shape of Brillouin spectrum, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering & Environmental Problems (SAGEEP 2013), Denver, 17-21 March 2013. **Conférence invitée**

6. BUCHOUD E., HENAULT J-M., D'URSO G, GIRARD A., BLAIRON S, MARS J.I., and VRABIE V, 2012, Development of an Automatic Algorithm to Analyze the Cracks Evolution in a Reinforced Concrete Structure from Strain

Measurements Performed by an Optical Backscatter Reflectometer, 4th Workshop on Civil Structural Health Monitoring (CSHM 2012), Berlin, 6-12 November 2012.

7. BUCHOUD E., BLAIRON S, D'URSO G, HENAULT J-M., GIRARD A., MARS J.I., and VRABIE V, 2012, Detection of ground movement using the shape of Brillouin spectrum, 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geosciences (NSG 2012), Paris, 3-5 September 2012. **Best paper award**.

8. BLAIRON, S., HENAULT, J-M., BUCHOUD, E., VINCESLAS, G., and DELEPINE-LESOILLE, S., 2011, Truly distributed optical fiber extensometers for geotechnical structure monitoring (dikes and underground repository): Influence of sensor external coating, in 8th International Symposium of Field Measurements in geomechanics, Berlin, Germany, September, 2011.

Brevet

« Procédé d'estimation d'une cavité souterraine par capteurs à fibre optique ». E. Buchoud, S. Blairon, G. D'Urso, J. I. Mars. Brevet français FR 14 57690, en cours de dépôt.

Résumé

Pour l'auscultation d'ouvrages, les capteurs à fibre optique sont généralement utilisés puisqu'ils présentent l'avantage de fournir des mesures réparties. Plus particulièrement, le capteur basé sur la technologie Brillouin permet d'acquérir un profil de fréquence Brillouin, sensible à la température et la déformation dans une fibre optique sur une dizaine de kilomètres avec un pas de l'ordre de la dizaine de centimètres. La première problématique est d'obtenir un profil centimétrique sur la même longueur d'auscultation. Nous y répondons en s'appuyant sur des méthodes de séparation de sources, de déconvolution et de résolution de problèmes inverses. Ensuite, nous souhaitons estimer la déformation athermique dans l'ouvrage. Pour cela, plusieurs algorithmes de filtrage adaptatif sont comparés. Finalement, un procédé pour quantifier le déplacement de l'ouvrage à partir des mesures de déformation est proposé. Toutes ces méthodes sont testés sur des données simulées et réelles acquises dans des conditions contrôlées.

Mots clés

Suivi de l'état des structures, Capteur à fibre optique, Diffusion Brillouin, séparation de sources, factorisation en matrices non négatives, problème inverse, filtrage adaptatif.

Abstract

For structural health monitoring, optical fiber sensors are mostly used thanks their capacity to provide distributed measurements. Based on the principle of Brillouin scattering, optical fiber sensors measure Brillouin frequency profile, sensitive to strain and temperature into the optical fiber, with a meter spatial resolution over several kilometers. The first problem is to obtain a centimeter spatial resolution with the same sensing length. To solve it, source separation, deconvolution and resolution of inverse problem methodologies are used. Then, the athermal strain into the structure is searched. Several algorithms based on adaptative filter are tested to correct the thermal effect on strain measurements. Finally, several methods are developed to quantify structure displacements from the athermal strain measurements. They have been tested on simulated and controlled-conditions data.

Key words

Structural Health Monitoring, optical fiber sensor, Brillouin backscattering, Non negative matrix factorization, inverse problem, adaptative filter.