



HAL
open science

Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR

Damien Maraval

► **To cite this version:**

Damien Maraval. Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Télécom ParisTech, 2017. Français. NNT : 2017ENST0023 . tel-02055990

HAL Id: tel-02055990

<https://pastel.hal.science/tel-02055990>

Submitted on 4 Mar 2019

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.



EDITE ED 130

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

Télécom ParisTech

Spécialité « Communication et électronique »

présentée et soutenue publiquement par

Damien MARAVAL

Le 11 / 05 / 2017

Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR

Directeurs de thèse : **Renaud GABET** et **Yves JAOUEN**

Jury

Pr. Thierry CHARTIER, Laboratoire FOTON/ENSSAT, Université de Rennes 1

Dr. Thibaut SYLVESTRE, Laboratoire Femto, Besancon

Pr. Catherine LEPERS, Telecom SudParis

Dr. Pascal SZRIFTGISER, Laboratoire PhLAM, Université de Lille

Dr. Renaud GABET, Télécom ParisTech

Pr Yves JAOUEN, Télécom ParisTech

Dr. Vincent LAMOUR, PDG Cementys

Mme. Stéphanie ABRAND, Ingénieur d'Etudes, Société Saipem

M. Jean-Philippe ROQUES, Ingénieur d'Etudes, Société Total

Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Directeur de thèse

Directeur de thèse

Invité

Invité

Invité

T
H
È
S
E

Télécom ParisTech

Ecole de l'Institut Télécom – membre de ParisTech

46, rue Barrault – 75634 Paris Cedex 13 – Tél. + 33 (0)1 45 81 77 77 – www.telecom-paristech.fr

Remerciements

Je remercie tout d'abord Cementys, et en particulier Vincent Lamour, de m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse durant ces trois années au sein de son entreprise et de m'avoir fait confiance quant à la réussite de ce projet à la fois professionnel et personnel. Son enthousiasme et sa curiosité le poussent sans cesse vers de nouvelles aventures dans le but de développer Cementys. Les partenaires et les projets industriels de l'entreprise ont constitué un réel apport pour mon travail de recherche à Télécom Paristech. J'en profite pour remercier aussi toute l'équipe Cementys qui a toujours su faire preuve de motivation et de bonne humeur lors de tous les projets, même les plus complexes.

Je remercie mes deux directeurs de thèse, Renaud et Yves, pour le temps passé et l'implication sur ce projet, ainsi que pour la qualité des connaissances et compétences qu'ils m'ont transmises. Leur complémentarité quant à leur méthode de travail et leur domaine de compétence est un véritable avantage. Je leur souhaite une excellente continuation dans leurs projets.

De même, je remercie l'ensemble de l'équipe de recherche du département Comelec à Télécom ParisTech pour son soutien et son aide. Je remercie tous les doctorants pour leur aide et leur souhaite bon courage pour la suite de leurs recherches. J'ai beaucoup apprécié et n'oublierai pas les moments partagés ensemble au laboratoire ou en dehors.

Je tiens également à remercier Vincent Lanticq pour sa contribution à la définition et au lancement de ce projet et lui souhaite bon courage et réussite pour sa nouvelle entreprise.

Enfin, je remercie mes parents et toute ma famille, sans oublier mes amis, pour leur soutien tout au long de ces trois années (en particulier sur la dernière) et pour leurs innombrables encouragements et relectures de ce manuscrit. Leur fascination et fierté pour le travail que j'ai accompli me touche énormément.

Introduction

Contexte du travail de recherche

Cette thèse a été initiée par Cementys, jeune société innovante spécialisée en instrumentation d'infrastructure dans le domaine du génie civil et s'étant depuis peu ouverte à d'autres secteurs, notamment grâce à toutes les nouvelles technologies de systèmes de mesures utilisant la fibre optique comme moyen de mesure.

En 2013, Cementys a identifié un besoin particulier des industriels à propos des mesures dynamiques et réparties de déformation par réflectométrie Brillouin. Malgré les efforts réalisés dans les dernières années concernant les performances de mesure ou de portée, les systèmes commerciaux restent encore limités à la caractérisation d'événements statiques ou de très faibles fréquences (inférieures à 0.5 Hz).

Aujourd'hui, les systèmes les plus répandus sont fondés sur l'analyse des rétrodiffusions Brillouin stimulées. Outre les excellentes performances atteintes, leur nécessité d'avoir accès aux deux extrémités de la fibre pour réaliser une mesure devient un inconvénient majeur lorsque les conditions d'installation ou de maintenance de la ligne sont difficiles. Pour des projets dont l'instrumentation est à mettre en place lors de la construction, par exemple, les fibres ne seront plus accessibles et, en cas de rupture, la réparation sera impossible. Pour l'exploitant, un problème de sûreté et de surveillance se pose car la gestion de l'infrastructure, d'un point de vue de sa sûreté, de son état de santé et de ses capacités de production, utilise les informations fournies par ces capteurs. Cette problématique apparaît dans l'industrie de l'énergie, où la mise en œuvre de canalisations terrestres ou sous-marines devient très délicate en raison des normes d'installation toujours plus contraignantes. En effet, pour le transport de pétrole ou du gaz, l'instrumentation par fibre optique est devenue quasiment obligatoire sur certains projets à cause des risques importants tels qu'une fuite, une déformation, la plastification des tubes, etc. Une instrumentation robuste est donc indispensable.

De plus, selon le domaine d'application, ces derniers événements sont parfois dynamiques d'un point de vue mécanique ; l'analyse de la transition entre deux états peut s'avérer être une source d'informations importantes quant à la qualité de construction ou à l'intégrité de la structure en elle-même. Cependant, les systèmes industriels de mesure ne permettent pas leur analyse en temps réel du fait de leur temps d'acquisition, souvent largement supérieur à quelques secondes.

Télécom ParisTech et Cementys ont trouvé un intérêt commun à définir un sujet de thèse en instrumentation portant sur la conception d'un nouveau système de mesure répartie et dynamique de déformation par l'analyse en réflectométrie des rétrodiffusions Brillouin. D'une part, l'instrumentation par fibre optique est un domaine très complémentaire à celui des télécommunications de par les propriétés de propagation et d'interaction de la lumière dans les fibres optiques, et d'autre part, l'expertise et les partenaires industriels de Cementys offrent de nombreuses opportunités de projets de recherche et développement.

Objectifs de la thèse

Cette thèse porte de manière générale sur l'étude des méthodes de mesure répartie par fibre optique et de leurs applications dans le milieu industriel. Nous nous intéresserons particulièrement aux mesures réparties de déformation par effet Brillouin avec la conception d'un système de mesure complet au sein du laboratoire COMELEC de Télécom Paristech. Le point de départ de ce travail est issu des deux travaux de recherche suivants :

- La thèse, soutenue en 2009, de Vincent Lanticq, effectué en collaboration avec Télécom ParisTech et EDF, sur la mesure répartie de déformation par diffusion Brillouin spontanée.
- Les travaux de Yair Peled (université de *Tel-Aviv*) et Romeo Bernini (*Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment*) sur la mesure répartie et dynamique de déformation par diffusion Brillouin stimulée utilisant la technique du flanc de frange.

L'objectif est de concevoir un système de mesure Brillouin capable de mesurer de manière répartie et dynamique les déformations subies par une fibre optique. La méthode employée sera celle du flanc de frange ; elle a déjà été développée et expérimentée sur une architecture opto-électronique de type analyseur Brillouin (Brillouin-OTDA), nécessitant l'accès aux deux extrémités de la fibre optique. Dans notre cas, elle est implémentée sur une architecture fonctionnant en réflectométrie.

Les besoins industriels actuels se portent sur la mesure répartie de déformation pour des infrastructures avec de longs linéaires, comme les canalisations, pour l'état desquelles une cartographie est demandée. Les mesures expérimentales sont validées par la simulation des mesures de la déformation et du déplacement d'une canalisation supportée entre deux appuis simples ; un modèle mécanique, adapté à cette configuration et transposable sur des projets réels, est développé.

De nombreux projets concernant la mesure répartie par fibre optique sont aussi suivis à Cementys. Les principaux résultats de trois d'entre eux seront présentés dans ce document. Le premier concerne le suivi d'une fuite dans une digue par cartographie verticale de la température avec un système de mesure par fibre optique par effet Raman ; les deux suivants présentent les résultats obtenus par analyse de déformation par effet Brillouin sur deux types de canalisation dans le domaine de l'énergie.

Organisation du manuscrit

Chapitre 1

Le premier chapitre est consacré à l'étude des systèmes électro-optiques pour la mesure répartie par fibre optique, et plus particulièrement ceux fonctionnant sur l'étude des rétrodiffusions optiques Rayleigh, Raman et Brillouin. Les avantages et inconvénients de ces trois technologies distinctes et complémentaires sont détaillés. La méthode d'analyse de chacun de ces systèmes de mesure est expliquée et leurs limites en termes de performance de mesure seront présentées. Faisant partie des recherches pour le développement de notre système de mesure, une attention particulière est donnée aux systèmes Brillouin, dont nous détaillons les différents principes de fonctionnement et les avantages ou inconvénients. Cette étude permet de justifier notre axe de recherche concernant les systèmes de mesure dynamique par effet Brillouin fonctionnant en réflectométrie.

Chapitre 2

Dans ce chapitre, notre attention se porte sur la méthode d'interprétation des données de mesures issues de trois projets indépendants, en fonction de l'implémentation des fibres optiques. Le premier consiste en un démonstrateur, réalisé dans les laboratoires de Cementys, afin d'étudier le comportement de tubes en flexion 4 points, selon deux configurations de pose des fibres optiques qui définissent la méthode de traitement et d'interprétation des données. En parallèle, un modèle mécanique est adapté aux suivis des déplacements expérimentaux de ces tubes lorsqu'ils sont en flexion. Les résultats de simulation sont comparés avec les résultats expérimentaux. Les deux autres projets concernent l'emploi de systèmes de mesure commerciaux (Brillouin-OTDA et Brillouin-OTDR) avec les partenaires industriels de Cementys, lors de projets de recherche et développement de solutions de surveillance adaptées à des canalisations. Le premier consiste en une canalisation enterrée subissant des déformations importantes en raison des conditions environnementales. Le second est un prototype de canalisation de type *Pipe-In-Pipe* chauffant, destiné au transport de pétrole en milieu sous-marin.

Chapitre 3

Enfin, le dernier chapitre est entièrement consacré à l'étude et à la conception d'un système de mesure répartie et dynamique par effet Brillouin en réflectométrie à Télécom ParisTech. Nous expliquons notre démarche, quant au choix de la méthode d'acquisition par flanc de frange dans le but d'accélérer la vitesse d'acquisition des mesures tout en gardant leur spécificité d'être réparti. L'architecture opto-électronique permet à la fois de mesurer un spectre réparti de gain Brillouin et d'analyser en mode flanc de frange les déformations locales tout au long d'une fibre optique. Un banc d'essai est monté afin de valider notre système et tester ces performances expérimentales.

Sommaire

Remerciements.....	5
Introduction	7
Contexte du travail de recherche	7
Objectifs de la thèse	8
Sommaire.....	11
L'instrumentation par fibre optique	15
I.A Métrologie et instrumentation.....	15
I.A.1 Importance de la surveillance des ouvrages d'art et des infrastructures	15
I.A.2 La métrologie et les capteurs.....	16
I.B Les fibres optiques, support de communication et instrument de mesure	18
I.B.1 La fibre optique.....	19
I.B.2 Pertes en ligne	21
I.B.3 Les câbles à fibres optiques adaptés à l'instrumentation	22
I.B.4 L'instrumentation par fibre optique et ses avantages.....	23
I.C Les capteurs à fibres optiques par mesures interférométriques	24
I.D La technologie des capteurs répartis à fibre optique.....	25
I.D.1 Principe de la réflectométrie optique dans le domaine temporel	25
I.D.2 Définition des paramètres d'acquisition.....	26
I.D.3 Les effets linéaires et non linéaires : le spectre de rétrodiffusion	29
I.E Caractérisation des composantes de rétrodiffusion pour la réalisation de capteurs répartis.....	31
I.E.1 La rétrodiffusion Rayleigh	31
I.E.2 La rétrodiffusion Raman	39
I.E.3 La rétrodiffusion Brillouin	44
I.F Systèmes opto-électroniques pour la mesure du spectre de gain Brillouin.....	53
I.F.1 Introduction aux systèmes de mesure Brillouin dans le domaine temporel.....	53
I.F.2 Analyseur optique Brillouin dans le domaine temporel.....	54
I.F.3 Réflectomètre optique temporel par effet Brillouin	56
I.F.4 Autres systèmes de mesure Brillouin	58
I.F.5 Applications et performances des technologies Brillouin	61
I.G Conclusion du chapitre I	66
II. Mesures de déformation et suivi en temps réel des structures linéaires.....	69

II.A	Introduction	69
II.B	Mesure statique de déplacement par Brillouin-OTDA	70
II.B.1	Méthodologies expérimentale et théorique utilisées dans cette section	70
II.B.2	Instrumentation d'une structure linéaire : détermination de la déformation	71
II.B.3	Détermination de la courbe de déplacement $y(z)$	88
II.B.4	Conclusion sur la mesure de déplacement	94
II.C	Mesures réparties de déformation par effet Brillouin – Applications industrielles	95
II.C.1	Mesure statique de déplacement d'une canalisation enterrée	96
II.C.2	Mesure statique de déplacement d'une canalisation sous-marine	102
II.D	Conclusion du chapitre 2	107
III.	Mesure de déformation dynamique par réflectométrie Brillouin	109
III.A	Applications industrielles pour les mesures dynamiques de déformation	109
III.A.1	Problématique	109
III.A.2	Mesures dynamiques par OTDR	110
III.B	Principe de mesure du spectre de gain Brillouin par OTDR.....	114
III.B.1	Mesure répartie classique par détection cohérente	114
III.B.2	Analyse par balayage électrique du spectre de gain Brillouin	117
III.B.3	Génération des impulsions optiques	119
III.C	Méthode d'analyse avec oscillateur local adaptatif	121
III.C.1	Avantage de la réduction de la bande passante.....	121
III.C.2	Fibre optique de référence	122
III.C.3	Oscillateur local adaptatif	125
III.C.4	Schéma de détection adapté	128
III.C.5	Synthèse des signaux de détection.....	129
III.D	Mesure expérimentale sur un démonstrateur	130
III.D.1	Présentation du démonstrateur	130
III.D.2	Caractéristiques de gain Brillouin	131
III.E	Nouvelle approche : mesure Brillouin par analyse en flanc de frange.....	134
III.F	Système de mesure dynamique de déformation par flanc de frange	138
III.F.1	Paramètres SA-BOTDR expérimentaux de flanc de frange.....	138
III.F.2	Mesures de déformation en mode flanc de frange.....	140
III.F.3	Mesure de déplacement dynamique d'une canalisation	143
III.G	Comparaison des performances de mesure	147
III.H	Sensibilité aux pertes en ligne	149
III.I	Conclusion du chapitre 3	150
	Conclusion générale.....	153
IV.	Annexes	157

A.	Définition des courbes des moments de flexion $M(z)$	157
B.	Modèle théorique de la courbe de déplacement $y(z)$	160
C.	Détermination de la courbe de déplacement théorique.....	164
V.	Références	167

Chapitre 1

L'instrumentation par fibre optique

I.A Métrologie et instrumentation

I.A.1 Importance de la surveillance des ouvrages d'art et des infrastructures

Les infrastructures civiles et industrielles sont de plus en plus présentes dans notre société. Elles sont toujours plus grandes et complexes et sont mises à rude épreuve lors de leur utilisation. Tout au long de leur durée de vie, qui est définie en fonction de la qualité de construction, elles seront exploitées au maximum de leurs capacités. Malgré les avancées technologiques en termes de modélisation mécanique, de topographie et de moyens de construction, elles ne sont pas à l'abri de défauts ou d'événements extérieurs pouvant les endommager.

Les dommages portés aux structures peuvent avoir des conséquences importantes sur leur efficacité d'utilisation et sur la sécurité des personnes les exploitant ; il est donc nécessaire de prendre certaines précautions et de les gérer dès leur construction et pendant toute leur durée de vie. Cette gestion passe alors par ce que l'on appelle la surveillance de la santé des installations (*Structure Health Monitoring* ou *SHM*, en anglais). Il s'agit d'un processus complet visant à apporter des informations précises et actualisées concernant leur condition de santé et de vieillissement ainsi que leur performance. L'analyse des informations extraites de l'ensemble du système de surveillance doit confirmer ou infirmer les modèles mécaniques et les prédictions faites lors de leurs constructions concernant leurs réactions selon leur utilisation, et ainsi servir à améliorer leur gestion. Elle peut se faire de manière continue ou périodique et durant toute les phases de leur vie (construction, production ou réhabilitation). De plus, les résultats obtenus peuvent servir à améliorer ou affiner les modèles de construction.

L'instrumentation dédiée à une structure doit répondre à ces objectifs. La périodicité, la précision et les zones de mesures sont étudiées afin de définir ces outils de surveillance. S'agit-il du suivi de l'évolution ou de la détection de défauts, de l'optimisation de production, du suivi de l'état d'une partie de la

structure ? Dans quelles conditions la mesure se fera-t-elle ? Y a-t-il un enjeu environnemental ou sécuritaire ?

Cette étude peut se faire à court, moyen ou long terme, selon les besoins et les phénomènes ou événements suivis. Les caractéristiques généralement surveillées sont de différentes natures [1] :

- **Mécanique** : déformations, déplacements, fissures (apparition ou évolution), contraintes, charges, vibrations, etc.
- **Physique** : température, humidité, pression, etc.
- **Chimique** : pénétration ou concentration d'agents chimiques dans un matériau, pH, oxydation, etc.

L'objectif principal de cette surveillance est donc la détection du bon ou du mauvais fonctionnement de la structure, en fonction de paramètres extérieurs pouvant être d'origine naturelle (conditions météorologiques par exemple) ou provenant d'une mauvaise utilisation (la surproduction ou sur-utilisation par exemple). Pour l'atteindre, il est nécessaire d'identifier les paramètres à surveiller, de choisir les systèmes de mesure adaptés et de concevoir le réseau de capteurs (nombre, types, performances, etc.). Le taux d'utilisation de ce système est lié au projet et à la durée de la surveillance. De même, la périodicité des mesures est à définir en fonction des événements recherchés et de leurs caractéristiques (les événements peuvent être statiques, dynamiques, ponctuels, saisonniers, etc.).

Ce processus de mesure a un certain coût financier mais doit être vu sur le long terme : au lancement du projet, la mise en place du système de surveillance est un investissement financier mais l'identification d'une faiblesse suffisamment tôt peut réduire les coûts de réparation et les conséquences sur la productivité. Il est parfois impossible (ou trop coûteux) de mettre en place une instrumentation une fois que la structure est installée.

Les domaines d'application sont très variés : barrages, ponts, installations marines et sous-marines, infrastructures civiles, installations nucléaires, tunnels, etc. [2]. Chacun possède ses propres problématiques et conditions de mise en œuvre.

Dans cette section, nous nous focaliserons sur l'aspect métrologique des instruments afin de mesurer tel ou tel événement. La mise en place de capteurs performants adaptés à ce que l'on cherche, ainsi que leur taux d'utilisation, doivent être discutés entre le maître d'ouvrage et les personnes impliquées dans la pose des moyens de mesure, dans l'interprétation et l'utilisation des données.

I.A.2 La métrologie et les capteurs

La métrologie est la science de la mesure et de ses applications. Elle comprend des méthodes et des processus permettant de définir de manière exacte une grandeur physique, appelée mesurande [3].

Une maîtrise de toute la chaîne de mesure, depuis le capteur jusqu'à l'élément de sortie pertinent pour la surveillance de la structure, est nécessaire pour réaliser une mesure absolue avec l'erreur la plus faible possible. Cet ensemble d'équipements - que ce soit le capteur ou l'instrument en lui-même - est soumis à des sollicitations extérieures et est source de bruit (bruit thermique, adaptation de la chaîne de mesure, environnement électromagnétique, etc.). L'influence de ce bruit doit être déterminée. Cette grandeur est souvent associée à la qualité de la chaîne de mesure.

L'**exactitude** d'une mesure correspond à l'écart entre la i -ème mesure et la valeur vraie. Une mesure est d'autant plus exacte que sa valeur se rapproche de la valeur vraie du mesurande. L'erreur totale d'une mesure est définie par la somme des erreurs systématiques et aléatoires. Dans la pratique, elle est généralement modélisée par une loi gaussienne (Figure I.1) :

- **La fidélité définit l'erreur aléatoire** : un ensemble de mesures est dit fidèle lorsque ces mesures ont une incertitude faible mais que leur moyenne reste éloignée de la valeur exacte.
- **La justesse définit l'erreur systématique** : un ensemble de mesures est qualifié de juste lorsque sa valeur moyenne est égale à la valeur exacte, quelle que soit sa fidélité.

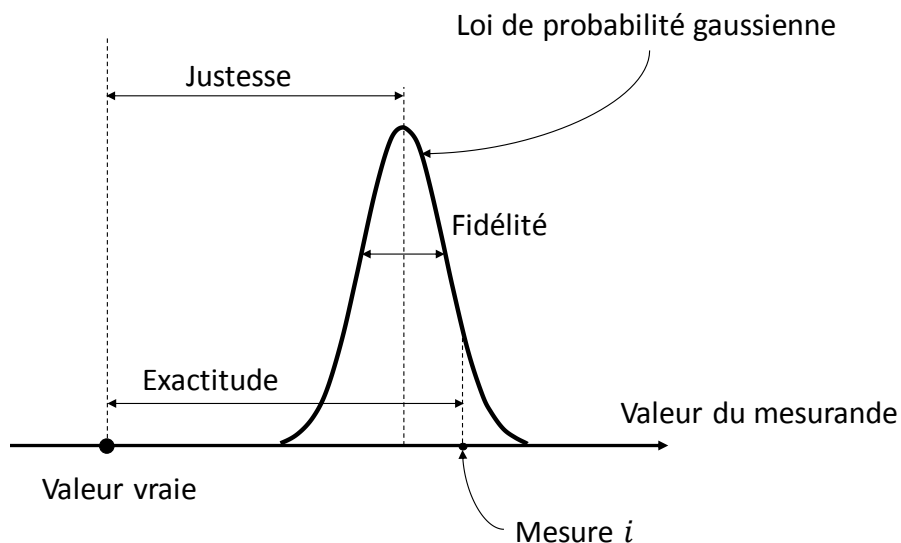


Figure I.1 Définitions de la justesse, de la fidélité et de l'exactitude d'une mesure

L'incertitude de mesure est caractérisée par l'écart type sur toutes les mesures effectuées sur un mesurande. Son évaluation, faite par une estimation de la **répétabilité** et de la **reproductibilité** de mesure, est nécessaire. La répétabilité définit la fidélité de la mesure réalisée dans des conditions similaires (opérateur, instruments et environnements). La reproductibilité évalue la répétabilité, mais dans des conditions de mesure variables.

Un capteur est défini comme étant un dispositif expérimental capable de quantifier et qualifier une grandeur physique et de détecter ces variations au cours du temps. Il est au minimum composé d'un transducteur permettant de convertir cette grandeur physique en une grandeur manipulable par son utilisateur (une tension électrique ou intensité lumineuse, par exemple). Un moyen de transporter cette information est souvent couplé à ce transducteur (comme un câble électrique, une fibre optique ou par télécommunications radiofréquences). Les informations issues de ce capteur seront ensuite analysées par l'interrogateur et utilisées par les outils informatiques du gestionnaire de l'infrastructure.

Aujourd'hui, les capteurs, qui sont les plus souvent utilisés dans le milieu de l'instrumentation d'infrastructures, sont les capteurs de température de types PT100 ou thermocouple et les capteurs de déformation piézoélectrique ou à corde vibrante [4]. Ces derniers sont connus depuis les années 1940 et sont encore largement utilisés dans les infrastructures en béton pour la surveillance de leur état de santé [5]. Ils sont notamment réputés pour leur durée de vie estimée à plus d'une trentaine d'années (au minimum). La Figure I.2 montre un exemple de chacun de ces capteurs.

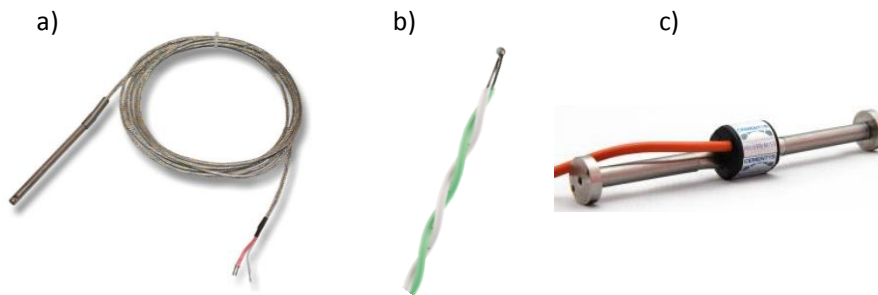


Figure I.2 Exemples de capteurs traditionnels électriques. Capteurs de température (a : PT100 ; b : thermocouple) et de déformation (c : à corde vibrante)

Le domaine de l'instrumentation utilise ces dispositifs et méthodes métrologiques afin de concevoir et développer un ensemble de capteurs visant à mesurer une activité, un événement ou à estimer la santé d'une infrastructure. Lorsque la mesure est répétée dans le temps, le terme de « surveillance » dans le temps (ou *monitoring* en anglais) est aujourd'hui couramment employé. Toute la chaîne d'acquisition ainsi que le traitement de l'information sont conçus dans cet objectif ; leur dimensionnement et leur mise en place dans un environnement industriel ou en génie civil demandent des compétences pluridisciplinaires en mécanique, physique, métrologie et en traitement du signal.

I.B Les fibres optiques, support de communication et instrument de mesure

Les technologies traditionnelles de surveillance fonctionnent par l'utilisation d'un courant électrique. Par conséquent, une proximité entre le centre de contrôle et l'infrastructure instrumentée est

nécessaire. Grâce aux avancées technologiques importantes réalisées dans le domaine des télécommunications en matière de fibre optique, de nouvelles architectures d'instrumentation offrent désormais de nouvelles possibilités dans la surveillance de structures et d'ouvrages de plus en plus éloignés et étendus. En effet, il est possible de mesurer et quantifier l'influence de l'environnement de la fibre optique sur ses propriétés de propagation de la lumière.

Deux grandes familles de capteurs à fibre optique se distinguent :

- **Les capteurs ponctuels** : le résultat R_p de mesure correspond à une valeur unique et moyennée sur l'étendue de mesure (généralement allant de quelques millimètres à quelques mètres) à un instant donné t , soit $R_p(t)$.
- **Les capteurs répartis** : leur mesure s'étend alors à toute la longueur de la fibre optique, elle n'est plus unique ; le résultat R_r est donné en fonction de la position d (sur la fibre optique) et à un instant donné t , soit $R_r(t, d)$. L'étendue de mesure dépend alors de la technique d'acquisition.

Dans cette section, nous détaillons la manière dont les fibres optiques sont utilisées en tant que capteurs et quels sont les avantages ou inconvénients de ces technologies, dont l'utilisation se fait de manière exponentielle depuis quelques années.

I.B.1 La fibre optique

Une fibre optique est un fil de verre ou de plastique (et plus généralement un diélectrique), dont les propriétés mécaniques et physiques permettent la propagation ou le guidage de la lumière. Elle est aujourd'hui très utilisée pour les télécommunications car elle permet de parcourir de très longues distances et offre des débits donnés allant jusqu'à plusieurs centaines de Giga-octets par seconde.

Les fibres optiques se composent d'un cœur d'un diamètre allant, pour des fibres optiques courantes, de $9 \mu m$ à $60 \mu m$ et d'une gaine dont le diamètre extérieur est généralement de $125 \mu m$ comme illustré à la Figure I.3. L'indice de réfraction du cœur étant plus fort que celui de la gaine, la lumière y est guidée par réflexions successives au niveau de l'interface cœur-gaine ; on parle de guidage par Réflexion Totale Interne (RTI). Ces deux couches sont toutes deux fabriquées à partir de silice ; la différence d'indice de réfraction se fait par l'ajout de dopant (germanium, aluminium, etc.) lors de leur fabrication.

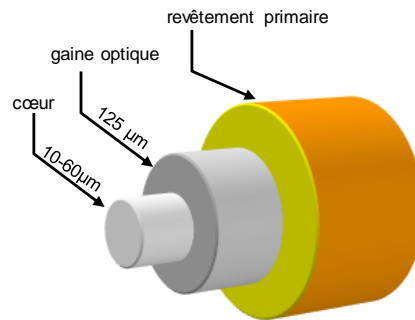


Figure I.3 Schéma d'une fibre optique montrant les trois couches principales d'une fibre optique : le cœur, la gaine et la première couche de protection mécanique

La fabrication de ces fibres optiques nécessite deux étapes. La première est la fabrication d'une préforme homothétique, dont les propriétés optiques sont identiques à la futur fibre optique (profil d'indice par exemple) mais avec des dimensions cent fois supérieures. La seconde étape est appelée le fibrage. La préforme est chauffée à une température comprise entre 1900 °C et 2200 °C et un filament est tiré afin d'obtenir un fil de verre. Elle est ensuite recouverte d'une couche de protection mécanique (composée de polymère acrylique ou de polyamide par exemples). Ces propriétés de propagation de la lumière seront contrôlées (pertes en ligne, effets de dispersion, etc.).

Une ou plusieurs couches de protection extérieures sont généralement ajoutées afin d'assurer la résistance mécanique ou chimique du câble selon son environnement d'utilisation.

Plusieurs types de fibres optiques se distinguent et ont des propriétés de propagation de la lumière différentes. Elles sont donc utilisées pour différentes applications comme le transfert à haut débit d'information numérique, la réalisation de filtres ou amplificateurs optiques, de lasers, ou la réalisation de capteurs.

La principale caractéristique permettant la propagation de la lumière est la variation de l'indice de réfraction entre le cœur et la gaine, que l'on appelle **profil d'indice**. En fonction de ce dernier, deux catégories se distinguent : les fibres optiques **monomodes** et les fibres optiques **multimodes**. Ces deux catégories sont aujourd'hui largement utilisées dans les télécommunications et leurs propriétés sont bien connues. La propagation de modes optiques au sein de la fibre est régie par les équations de Maxwell définissant les variations spatiales et temporelles d'une onde électromagnétique dans un milieu de propagation donné [6].

La propagation de la lumière dans les fibres optiques a déjà été étudiée dans de nombreux ouvrages ; celle-ci ne sera donc pas rappelée dans ce rapport. Nous proposons aux lecteurs de se reporter aux références suivantes pour plus d'informations :

- *Principles of Optics – Max Born and Emil Wolf [7]*
- *Fundamentals of photonics – Bahaa EA Saleh and Malvin Carl Teich [8]*

Dans ce document, nous verrons que nos systèmes de mesure par fibre optique fonctionnent généralement sur des fibres optiques monomodes et à des longueurs d’ondes où les pertes sont minimales - soit aux alentours de 1550 nm (bande C). Il est donc possible - et cela se fait très régulièrement - d’utiliser le réseau fibre optique existant afin de réaliser la surveillance d’une zone ou d’une infrastructure. Lorsque celles-ci sont étendues (c’est-à-dire quand elles ont un grand linéaire comme des fourreaux de câbles électriques de puissance ou canalisation par exemple), de nombreux câbles à fibres optiques sont installés en prévision des demandes des télécommunications. Parfois, toutes les fibres optiques ne sont pas utilisées et peuvent donc être employées à des fins d’instrumentation ; la pose de la fibre optique utilisée comme un capteur n’est donc pas à faire, ce qui réduit le coût financier du projet. Les gestionnaires d’infrastructures (réseaux de transports d’énergie, ferroviaires, etc.) installent régulièrement, en parallèle de leur installation première, des câbles de télécommunication à fibres optiques [9] ; ces fibres peuvent alors servir à la surveillance de la température tout au long de la ligne.

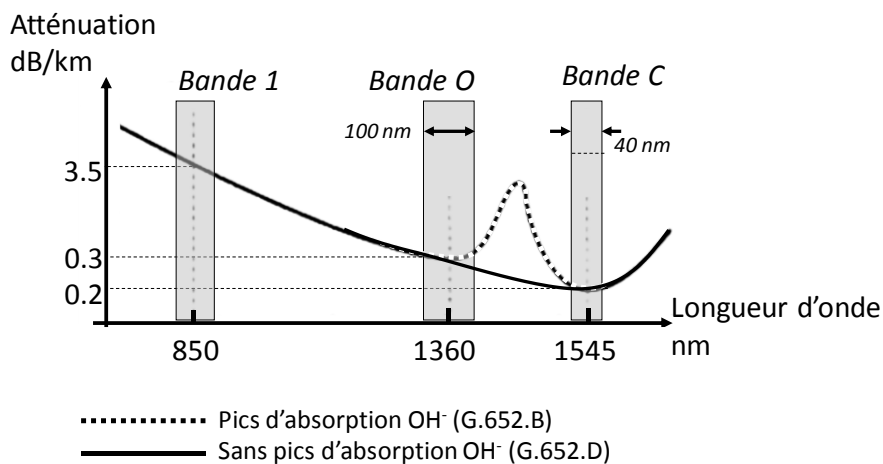


Figure I.4 Courbe d’atténuation de la lumière dans une fibre optique standard en fonction de sa longueur d’onde pour deux types de fibres optiques monomodes : la G.652.B avec présence du pic d’absorption par les ions OH⁻ et la G.652.D où ce pic a été supprimé.

I.B.2 Pertes en ligne

La propagation de la lumière dans les fibres optiques ne se fait pas sans atténuation. La Figure I.4 décrit à l’atténuation de la lumière en fonction de la longueur d’onde. On y distingue trois bandes principales de travail organisées selon la longueur d’onde. Les plus utilisées aujourd’hui sont la bande O, qui s’étale de 1260 nm à 1360 nm, et la bande C, allant de 1525 nm à 1565 nm. Elles présentent, ou ont présenté, toutes deux, un minimum d’atténuation avec les lasers contemporains. Les plages d’utilisation

du spectre de lumière dans les domaines des télécommunications sont définies en fonction des avancées technologiques dans la conception et le développement des amplificateurs optiques (et notamment les EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier* en anglais), des lasers, des fibres et des composants optiques.

I.B.3 Les câbles à fibres optiques adaptés à l'instrumentation

De nombreux câbles à fibres sont aujourd'hui disponibles dans le commerce et ont tous des applications dédiées. Les propriétés d'un câble sont choisies en fonction de l'environnement dans lequel il sera utilisé (océans et mers, terre, air) et des contraintes mécaniques ou chimiques qu'il subira lors de son utilisation (traction, compression, humidité, ensoleillement, corrosion ou radioactivité, etc.).

La conception du câble est définie en fonction de son application et notamment lors d'applications dans le domaine de l'instrumentation [10]. Ici, la fibre optique est l'élément sensible du capteur ; il est donc primordial de la laisser « sentir » son environnement. Pour les mesures de déformation, par exemple, la fibre optique et son câble doivent pouvoir se déformer selon les mouvements de la structure sur laquelle ils ont été préalablement fixés. Ce type de câble est dit à structure serrée : il ne permet pas de coulissement de la fibre dans sa gaine de protection et, théoriquement, toutes les déformations mécaniques extérieures sont transmises intégralement à la fibre ou aux fibres optiques présentes. De plus, la géométrie et la composition du câble doivent être prises en compte ; elles doivent assurer une bonne adhérence au milieu en cas de traction [11]. Des câbles spéciaux, avec un revêtement dont la géométrie a été définie de manière à optimiser le transfert thermique et mécanique à la fibre optique, sont développés dans le cadre de la mesure répartie ou interférométrique. La Figure I.5 montre un exemple de câble à fibre optique adapté à la mesure de déformation dont la surface externe possède une géométrie ondulée et rugueuse [12].

Toutefois, de nombreuses applications sont envisagées, a posteriori, sur le réseau de fibre optique installé pour les télécommunications. Cela concerne souvent des mesures de température en raison de la structure des câbles de protection dans lesquels les fibres optiques sont libres de toutes contraintes mécaniques.



Figure I.5 Photographie d'un câble pour la mesure de déformation en traction ou en compression avec un relief extérieur ayant une forme sinusoïdale

I.B.4 L'instrumentation par fibre optique et ses avantages

Grâce à l'invention du laser dans les années 1960, la fibre optique connaît un essor important dans le domaine des télécommunications. Dans les années 1980, les équipements opto-électroniques (lasers, modulateurs, détecteurs, cartes d'acquisition, etc.) permettent d'analyser très précisément les propriétés de propagation de la lumière ; les premières applications en instrumentation voient alors le jour [13]. Des avantages non négligeables leur permettent d'égaliser, et même de surpasser, les technologies traditionnelles comme les PT100, les jauges de contraintes ou les cordes vibrantes. Parmi ces avantages, il est possible de citer :

- **L'encombrement et le poids faible**, diamètre extérieur de 250µm comprenant la première couche de protection.
- **Le déport de la mesure**, grâce aux faibles pertes en ligne en comparaison avec les liaisons électriques, la salle de contrôle avec les différents systèmes de mesure peut donc être éloignée de la zone de mesure.
- **L'insensibilité aux champs électromagnétiques** en raison de sa composition (matériau diélectrique, donc isolant) et son principe de fonctionnement (propagation d'une impulsion lumineuse confinée entre deux interfaces). Elles peuvent être placées dans des zones où les champs électromagnétiques sont intenses comme à proximité de câbles haute tension, de machines tournantes ou de transformateurs électriques.
- **La qualification en milieu ATEX (*ATmospheres EXplosibles*)** : en raison de sa conception et de sa structure, elle peut être installée dans des milieux à risques.
- **La longue durée de vie** : les techniques de fabrication permettent une grande résistance dans le temps. Les propriétés de propagation de la lumière dans une fibre optique restent les mêmes tout au long de son utilisation. Seuls certains cas particuliers sont critiques ; la radioactivité, par exemple, a pour effet d'empêcher la bonne propagation de la lumière (augmentation des pertes, modification du profil d'indice, etc.) de manière temporaire ou définitive [14].
- **La possibilité de multiplexage (spatiale, temporelle ou fréquentielle)** : une seule fibre optique peut supporter plusieurs technologies ou capteurs. De plus, sa grande bande passante (plusieurs dizaines, voire centaines de nanomètres) lui permet d'obtenir des résolutions de mesure bien supérieures aux technologies traditionnelles en raison de la faible longueur d'onde de la lumière.
- **Mesure passive**, le capteur étant inscrit dans le cœur de la fibre optique ou étant la fibre optique en elle-même, il ne nécessite pas de source d'alimentation.

Il existe deux grandes catégories de capteurs à fibres optiques : ponctuelle et répartie. Elles sont illustrées à la Figure I.6. La première, sûrement la plus connue, ressemble beaucoup aux technologies

traditionnelles mais transposées dans le domaine de l'optique. L'analogie entre les capteurs à cordes vibrantes et les réseaux de Bragg est facile à faire : dans les deux cas, l'instrument mesure une variation de fréquence selon la déformation subie par l'élément sensible, respectivement électrique (résonance d'une corde métallique) et optique (miroir optique sélectif). La seconde permet de nouvelles performances et possibilités jusqu'à présent encore inégalées dans le domaine électrique. Les capteurs répartis permettent une mesure étendue à toute la fibre optique. En théorie, ce type de capteur serait capable de remplacer une infinité de capteurs ponctuels.

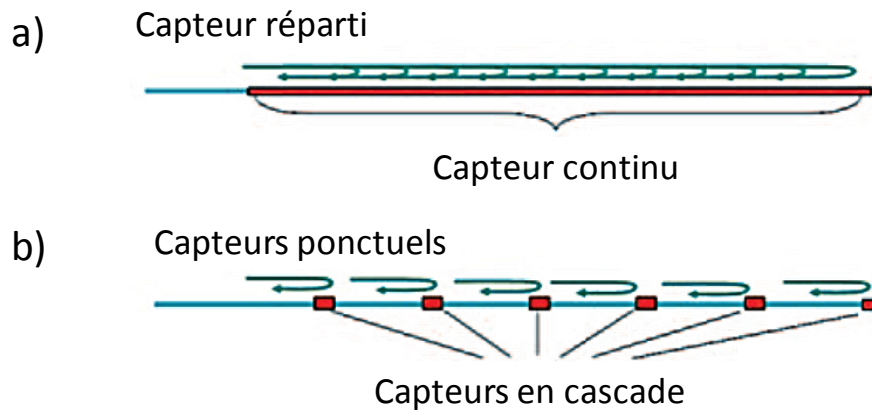


Figure I.6 Illustration des capteurs répartis à fibre optique. a) capteur à fibre optique réparti (pas de zone morte). b) mise en série de capteurs ponctuels à fibre optique.

I.C Les capteurs à fibres optiques par mesures interférométriques

Les capteurs interférométriques à fibre optique analysent les interférences constructives ou destructives entre une ou plusieurs ondes optiques de même fréquence [13, 15, 16]. Un faisceau laser incident est divisé en deux ou plusieurs faisceaux et leur recombinaison permet de générer un schéma d'interférences particulier. Il existe plusieurs types d'interféromètres à fibres optiques dont les montages électro-optiques permettent de réaliser des mesures ponctuelles ou réparties. La première catégorie, comprend les capteurs à réseaux de Bragg [17, 18] ou les interféromètres Fabry-Pérot [19] ; la seconde, les interféromètres Mach-Zender ou Michelson [20], de Sagnac [17, 21]. Ces derniers sont capables de localiser l'événement sur la fibre optique avec des résolutions spatiales généralement de l'ordre de quelques dizaines de mètres et parfois limités à un seul et unique événement sur la ligne [22].

Dans ce document, ce type de capteurs n'est pas développé, étant donné ses performances limitées en termes de mesures réparties. Ayant toujours à l'esprit la surveillance de l'état de santé des infrastructures, nous cherchons à suivre l'évolution des déformations ou de la température en tous points de la structure. La Figure I.6 illustre ce point : malgré la possibilité de multiplexage, une chaîne de capteurs

ponctuels à fibre optique reste limitée à quelques zones de mesures définies lors de son installation. L'apparition et la détection de nouveaux défauts sont des critères essentiels dans le domaine de la surveillance de l'état de santé d'une infrastructure ; notre choix se porte alors uniquement sur les systèmes de mesures réparties. Nous laissons alors le lecteur se reporter aux références précédemment citées pour l'étude des systèmes de mesures localisées.

Dans la prochaine section, les technologies de capteur réparti à fibre optique se basant sur l'analyse des rétrodiffusions optiques telles que les effets Rayleigh, Raman et Brillouin sont analysées.

I.D La technologie des capteurs répartis à fibre optique

Il existe plusieurs principes de mesure qui ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Les technologies actuelles, développées tout d'abord pour le domaine des télécommunications, offrent de nombreuses possibilités de modulation ou de détection de la lumière, que ce soit en amplitude, en fréquence, en phase ou en polarisation. La base de cette technologie est l'analyse locale des rétrodiffusions en fonction des paramètres d'injection de la lumière. La variation d'une ou plusieurs caractéristiques de la lumière reçue représente une variation de l'état physique de la fibre optique.

I.D.1 Principe de la réflectométrie optique dans le domaine temporel

Dans ce paragraphe, nous détaillons la méthode d'analyse la plus connue et la plus répandue, à savoir la réflectométrie optique dans le domaine temporel (*Optical Time Domain Reflectometry OTDR*, en anglais). Pour les systèmes de mesure basés sur cette technique, l'information spatiale est obtenue, comme son nom l'indique, grâce à une mesure dans le domaine temporel.

Le principe général de l'OTDR est d'envoyer une impulsion de lumière brève et intense dans la fibre optique qui va interagir avec le milieu de propagation ; généralement, la durée varie entre 10 ns et 100 ns, sa puissance est supérieure à plusieurs dizaines de mW et certaines propriétés telles que la longueur d'onde, la phase et/ou la polarisation sont connues et maîtrisées [23]. Une petite portion de cette lumière est rétrodiffusée en raison des effets optiques Rayleigh, Raman et Brillouin. L'impulsion parcourant l'intégralité de la fibre optique, ce signal optique rétrodiffusé est enregistré de manière continue (à une période d'échantillonnage plus rapide que la résolution spatiale du système) et l'analyse locale de son spectre donne alors toutes les informations sur l'état de la ligne.

La localisation du point de mesure d est donnée par l'équation suivante :

$$d = \frac{c\Delta t}{2n_g} \quad \text{I.1}$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide, n_g l'indice de groupe de la fibre optique et Δt le temps aller-retour de lumière dans la fibre (i.e. entre l'instant d'injection de l'impulsion et le retour des rétrodiffusions).

La résolution spatiale Δz de ces instruments de mesure est définie par la moitié de la durée δt de l'impulsion optique injectée et s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta z = \frac{c\delta t}{2n_g} \quad \text{I.2}$$

L'une des limites fondamentales de ce principe de mesure est la vitesse de propagation de la lumière dans la fibre optique. En cas d'injection de plusieurs impulsions de lumière dans la ligne optique, la superposition des composantes Rayleigh, Raman ou Brillouin fausserait les résultats de mesure. Il est donc nécessaire de tenir compte de la longueur physique totale de ligne, quelle que soit la longueur utile à la mesure. Une fibre de 20 km, par exemple, est parcourue en 100 μs ; le temps entre deux impulsions est alors au minimum de 200 μs (soit une fréquence de répétition de 5 KHz).

I.D.2 Définition des paramètres d'acquisition

Nous définissons dans cette section certains paramètres permettant de qualifier les systèmes de mesure répartie par fibre optique. Ils seront utilisés tout au long du manuscrit pour comparer leurs performances et ainsi orienter le choix vers tel ou tel système selon le cahier des charges du projet. Ces paramètres ne se limitent pas aux capteurs à fibre optique mais peuvent s'étendre à toutes les technologies utilisées en instrumentation.

- **La résolution spatiale**

La résolution spatiale est définie par le plus petit événement indépendant détectable par le système de mesure et mesurable avec une incertitude faible. Pour les capteurs à fibre optique utilisant le principe de l'OTDR, cette résolution est généralement définie en fonction de la durée de l'impulsion injectée, correspondant donc à la portion de la zone éclairée à un instant donné. Pour les systèmes de mesure répartie, les résolutions couramment utilisées sont de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres, correspondant à des durées d'impulsion comprises entre 10 et 100 ns.

L'enjeu d'obtenir une meilleure résolution spatiale est grand pour tout instrument de mesure répartie car leurs champs d'applications seraient alors étendus. Cependant, la réduction de la durée des impulsions implique une adaptation des équipements de détection (détecteurs, amplificateurs, filtres, etc.) :

- Une bande passante plus grande sera alors demandée, incluant, d'une part, un surcoût financier et, d'autre part, une sensibilité au bruit accrue. Exemple : une résolution spatiale de 10 cm demande une bande passante de détection d'au moins 1 GHz.
- La réduction de la résolution spatiale en OTDR implique un signal de rétrodiffusion faible, réduisant aussi le rapport signal à bruit des mesures. La durée d'acquisition, la portée de mesure ou la rapidité du système doivent alors être réduites, pour garder une même valeur d'incertitude de mesure.

- **L'incertitude de mesure**

Il s'agit d'une valeur définissant la dispersion ou l'écart type de mesure autour de la valeur vraie. Aucun instrument de mesure n'étant parfait, les résultats sont souvent entachés d'erreurs. Pour des mesures de déformation et de température, elles sont généralement de l'ordre de 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ ou de 1 °C. Aujourd'hui, les points les plus limitants sont les bruits thermiques et électroniques lors des traitements analogiques des signaux après détection (conversion du signal optique en signal électrique). Les systèmes de mesure actuels utilisent souvent des fonctions de moyennage de signaux (filtres passe-bas) afin de réduire leur incertitude de mesure, au prix d'un temps d'acquisition plus long.

- **La résolution de la mesure**

Elle correspond à la plus petite variation perceptible sur le résultat de la mesure, appelée aussi le seuil de mobilité. Il peut toutefois s'agir du bruit provenant de la chaîne de mesure ou de son environnement. Elle est généralement au moins dix fois inférieure à l'incertitude de mesure.

- **La portée de mesure**

L'avantage principal de l'utilisation des capteurs à fibre optique est la possibilité de déporter la mesure à plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres de l'interrogeur grâce aux faibles pertes optiques (seulement 0.2 dB/km à une longueur d'onde de 1550 nm). Augmenter la portée de mesure implique généralement une baisse des performances en termes de rapidité d'acquisition et de résolution de mesure sur la zone la plus éloignée de l'interrogeur. Un compromis doit être fait par l'utilisateur afin de garder un rapport signal à bruit au moins supérieur à 3 dB [24]. La notion de budget optique détermine le taux maximal de perte de la ligne optique admissible pour lequel l'incertitude de mesure est encore acceptable.

- **Rapidité d'acquisition**

Il s'agit du temps nécessaire à la réalisation d'une mesure complète, soit, pour les capteurs répartis à fibre optique, l'obtention de la grandeur recherchée (température, déformation ou pression par exemple) en tous points de celle-ci. Ce paramètre n'est pas absolu ; il dépend des performances que l'on souhaite atteindre en termes de résolutions de mesure et de portée. En effet, un compromis doit souvent être fait : l'amélioration d'un paramètre est possible mais au détriment d'un autre. La portée de mesure, par exemple, peut être étendue mais le rapport signal à bruit de la mesure, à l'extrémité éloignée, sera plus faible. De même, l'augmentation du temps de mesure permet, par moyennage, d'améliorer la résolution de celle-ci (et inversement). Les systèmes actuels de mesures de déformation utilisant le principe de l'OTDR se limitent généralement à des événements statiques (de l'ordre ou inférieur au Hertz).

Nous verrons en fin de chapitre que les recherches et études actuelles se penchent désormais sur l'amélioration de ce paramètre, notamment pour les mesures par effet Brillouin.

- **La sensibilité de l'instrument**

La sensibilité d'une mesure correspond au taux de variation de la mesure par rapport à celui de la grandeur mesurée. Elle doit être beaucoup plus grande que la valeur de la résolution de la mesure. Pour les systèmes Brillouin, leurs sensibilités sont d'environ $0.05 \text{ MHz}/(\mu\text{m}/\text{m})$ ou de $1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ [25]. Les valeurs de ces coefficients dépendent de la conception des fibres optiques ainsi que de leur proportion de dopants [26, 27].

- **La dynamique de l'instrument ou du capteur**

Elle correspond à leur capacité à détecter des événements de même nature mais d'amplitude différente. La qualité actuelle de certains équipements opto-électroniques de laboratoire (analyseur de spectre optique ou électrique par exemple) leur donne une dynamique de mesure importante pouvant atteindre plus de 90 dB (soit un rapport 10^9 entre le plus petit et le plus grand événement). Les performances des instruments de mesure répartie par fibre optique leur permettent de prendre des mesures avec une grande dynamique, comme plusieurs centaines de degrés pour les capteurs de température ou plusieurs pourcents pour la déformation.

Remarque : La dynamique de mesure dépend fortement de la manière d'effectuer la mesure et du schéma de détection. A propos du capteur à fibre optique, la fibre optique en elle-même possède ses limites physiques (elle ne peut pas supporter une élongation supérieure à 1% soit $10^4 \mu\text{m}/\text{m}$, par exemple, et la température de fusion de la silice est de l'ordre de $1900 \text{ }^\circ\text{C}$).

I.D.3 Les effets linéaires et non linéaires : le spectre de rétrodiffusion

L'analyse du spectre de rétrodiffusion d'une fibre optique met en avant plusieurs composantes spectrales ayant pour origine différents phénomènes d'interaction lumière-matière ; ils peuvent se classer en trois grandes catégories :

- **Les effets linéaires**

Ils sont responsables de l'atténuation de la lumière lors de sa propagation dans le guide, en raison de l'effet Rayleigh, de l'absorption par les impuretés (principalement par les molécules d'eau) ou des imperfections macroscopiques (des courbures, par exemple). L'intensité de ces effets est proportionnelle à la puissance optique incidente. Par ailleurs, la fréquence de l'onde optique diffusée est la même que celle de l'onde incidente ; la diffusion est dite élastique.

- **Les effets de dispersion :**

Dans les fibres optiques multimodes, des effets d'élargissement temporel d'une impulsion sont visibles et néfastes pour le transfert d'information sur de longues distances (supérieures à quelques kilomètres) en raison de la différence de temps de propagation entre les différents modes optiques ; on parle de *dispersion modale*. Cet effet peut avoir des conséquences sur la résolution spatiale des mesures lorsqu'une fibre optique multimode de grande longueur supérieure à quelques dizaines de kilomètres est utilisée.

Dans les fibres optiques monomodes, la dispersion modale est inexistante. Cependant, en raison de la dépendance de l'indice de réfraction à la fréquence $n(\omega)$, un élargissement temporel de l'impulsion est observé ; nous parlons alors de *dispersion chromatique*. La qualité de fabrication des fibres optiques limite cet effet et ne devient notable qu'à partir d'une centaine de kilomètres et pour des impulsions d'une durée inférieure à la nanoseconde. Les capteurs répartis à fibre optique n'atteignent que rarement ces distances et, si tel est le cas, les résolutions spatiales sont alors de plusieurs mètres ; cet effet n'est donc pas pris en compte.

- **Les effets non linéaires**

Deux types d'effets sont notables et intéressants pour la réalisation de capteurs répartis à fibre optique : ceux ayant un effet dans le sens de propagation de l'impulsion et ceux où une portion de la lumière est réfléchi. Dans la première catégorie (qui n'est pas détaillée) se trouvent trois phénomènes initiés par *l'effet Kerr* lorsque la puissance optique incidente est importante [28, 29] : la modulation de

phase croisée, le mélange à quatre ondes et l'effet d'auto-modulation de phase. Dans la seconde catégorie se trouvent *les effets Brillouin et Raman*, dont la dépendance vis-à-vis de l'environnement proche de la fibre optique et des contraintes appliquées sur celle-ci est intéressante pour la réalisation de capteurs répartis. Les réponses optiques seront proportionnelles à la puissance optique incidente jusqu'à un certain niveau que l'on nommera *puissance seuil* ; au-delà, la puissance rétrodiffusée ou transmise ne l'est plus. Ce seuil définit la limite entre les régimes de rétrodiffusion spontanée et stimulée ; il sera étudié par la suite.

Ces effets non linéaires sont aussi également qualifiés de « non-élastiques » car un changement de longueur d'onde ou de fréquence optique de la lumière rétrodiffusée intervient. De plus, l'environnement de la fibre optique (température, déformation, etc.) joue un rôle non négligeable sur les propriétés de propagation et de rétrodiffusion : par leur analyse, la réalisation de capteurs répartis est donc possible.

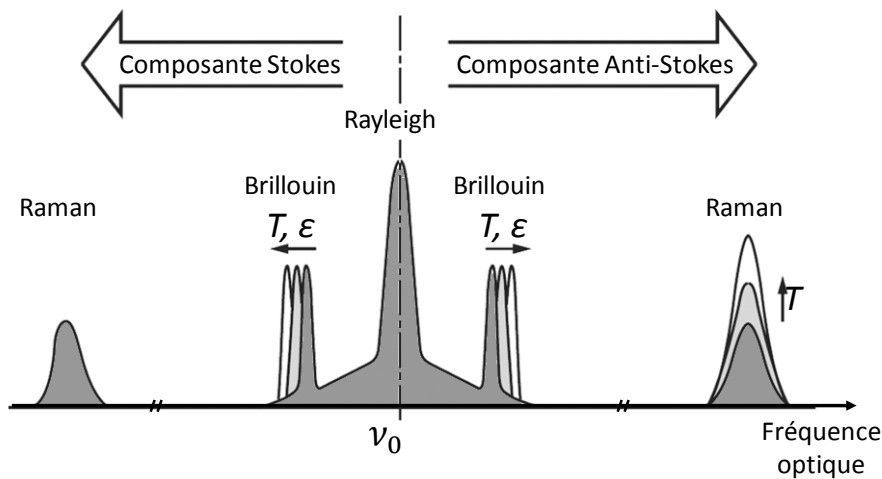


Figure 1.7 Spectre de rétrodiffusion typique pour une fibre optique montrant les composantes Rayleigh, Raman et Brillouin.

La Figure 1.7 donne la forme typique du spectre de rétrodiffusion. Cinq composantes particulières sont facilement identifiables :

- **La composante Rayleigh** : (effet élastique) à la même longueur d'onde ν_0 que celle du laser utilisé pour générer l'impulsion lumineuse.
- **Les deux composantes Brillouin** : Stokes (fréquence inférieure à ν_0) et Anti-Stokes (fréquence supérieure à ν_0). L'écart de fréquence avec ν_0 est de l'ordre de 11 GHz (pour $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$) ; on parle de la *fréquence de décalage Brillouin* $\Delta\nu_B$.
- **Les deux composantes Raman** : Stokes (fréquence inférieure à ν_0) et Anti-Stokes (fréquence supérieure à ν_0). L'écart de fréquence $\Delta\nu_R$ avec ν_0 est de l'ordre de 13 THz.

Dans le cadre de la réalisation de capteurs répartis à fibre optique, ce sont les diverses dépendances des propriétés de ce spectre de rétrodiffusion aux événements extérieurs qui sont étudiées. Les systèmes électro-optiques sont alors adaptés à la détection et à l'analyse de l'une des composantes citées ci-dessus. Nous verrons, comme déjà illustré à la Figure I.7, que leur amplitude ou leur fréquence dépendent de la condition locale de température T et de déformation ε de la fibre optique.

I.E Caractérisation des composantes de rétrodiffusion pour la réalisation de capteurs répartis

I.E.1 La rétrodiffusion Rayleigh

I.E.1.1 Effet physique

La rétrodiffusion Rayleigh est la réflexion d'une onde optique incidente sur les inhomogénéités d'indice optique dans la fibre [30], d'une part du fait que la silice soit un milieu amorphe et, d'autre part, du fait de la présence d'éléments chimiques – dont ceux introduits afin de générer un profil d'indice particulier. De nombreux défauts sont alors présents et gênent la propagation de l'onde électromagnétique incidente. Ces défauts sont vus comme des zones où la densité du matériau est différente, induisant une variation de l'indice de réfraction et un accroissement du phénomène de diffusion du signal incident (pertes, dispersion, etc.) [31].

La diffusion Rayleigh est la principale cause des pertes dans une fibre optique. Ce phénomène n'ayant pas d'orientation préférée ; il diffuse l'onde dans toutes les directions mais seules les diffusions couplées dans la fibre optique ayant un sens opposé à celui de l'onde incidente sont utilisées dans la réalisation de systèmes de mesure par OTDR.

I.E.1.2 Réflectomètre optique temporel par effet Rayleigh

La propagation de la lumière dans une fibre optique est soumise à une atténuation en fonction de la longueur d'onde (voir Figure I.4). Un instrument d'analyse optique, nommé simplement *OTDR*, mesure l'intensité du signal rétrodiffusé Rayleigh. Il a été pour la première fois développé en 1976 [32], il est aujourd'hui couramment utilisé par le domaine des télécommunications et de l'instrumentation ; il permet d'appréhender la qualité d'une ligne en localisant et quantifiant les pertes ou défauts ayant une influence sur la quantité de signal transmis. L'atténuation linéaire est donnée par la pente de la courbe lorsque aucun défaut dû à la manipulation de la fibre optique n'est présent (tels que des épissures ou connecteurs optiques et des courbures).

Une illustration des événements typiques obtenus par un OTDR est donnée à la Figure I.8. Un connecteur est une interface verre-air-verre et représente donc un miroir semi-réfléchissant ; l'OTDR

mesure alors un pic de réflexion (la perte moyenne d'un connecteur est de 0,1 dB). Une épissure optique (l'équivalent d'une soudure en électricité) ou une courbure est une perte locale et s'identifie donc par un offset négatif (la perte moyenne pour une épissure est de 0,01 dB). Enfin, la fin de la ligne s'identifie par la chute du signal jusqu'au niveau de bruit de l'instrument. Les OTDR ont une dynamique de mesure pouvant aller à plus de 50 dB. Ces performances maximales sont de 250 km pour la portée de mesure, 0,1dB pour la résolution de mesure et 0,5 m pour la résolution spatiale ; la durée de mesure est généralement supérieure à quelques dizaines de secondes.

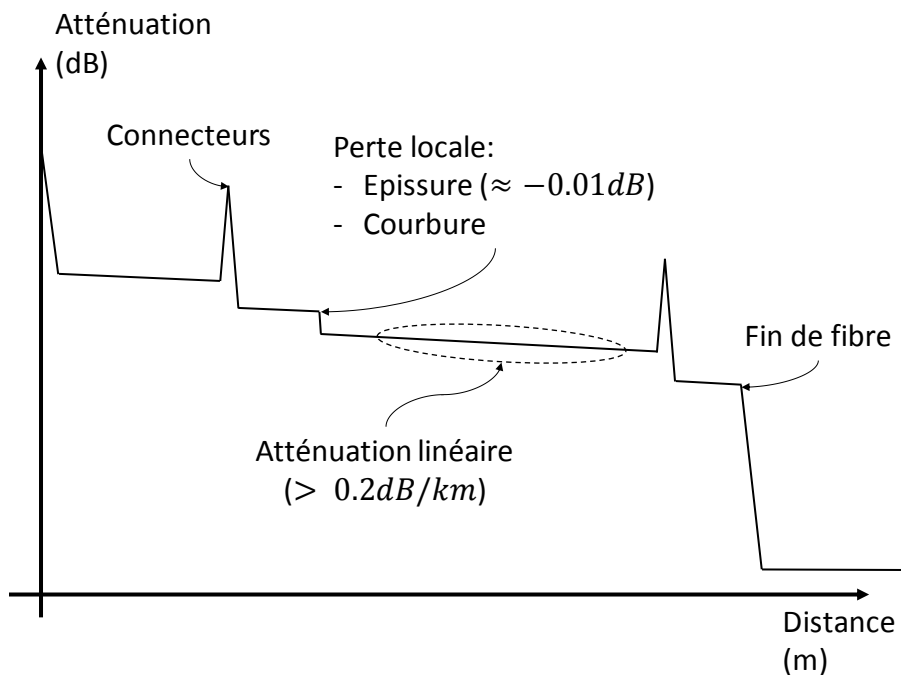


Figure I.8 Principe de l'OTDR pour la mesure de la qualité d'une ligne optique et l'identification d'événements typiques. La valeur de l'atténuation linéaire est valable une longueur d'onde de 1550 nm.

I.E.1.3 Réflectomètre optique cohérent dans le domaine fréquentiel par effet Rayleigh

Le *Coherent-OFDR*, *Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry* [33, 34] mesure les franges d'interférence entre la rétrodiffusion Rayleigh d'une fibre optique capteur et le signal optique d'un bras de référence, tous deux issus de la même source laser balayant linéairement une plage de fréquence donnée. Ce balayage, équivalent à une rampe en fréquence, se fait de manière à ce qu'à un instant donné toute la fibre optique soit éclairée par une lumière ayant une fréquence optique différente. Il apparaît alors que la localisation et la résolution spatiale sont résolues en termes de fréquence (et non en termes de temps comme pour l'OTDR) ; un calcul de transformée de Fourier permettra alors de revenir dans le domaine spatial. La résolution spatiale Δz est définie en fonction de la pente γ de la rampe de la modulation en fréquence ; elle se traduit par l'équation suivante :

$$\Delta z = \frac{c}{2n\gamma T_m}$$

I.3

avec c la vitesse de la lumière dans le vide, n l'indice de réfraction et T_m le temps de balayage en fréquence du laser.

La portée de mesure de cet instrument est, quant à elle, reliée à la linéarité du balayage en fréquence et à la longueur de cohérence du laser sur toute la plage de fréquence ΔF [35].

Le schéma expérimental d'un OFDR est donné à la Figure I.9. Il comprend un laser continu dont la fréquence optique de sortie est modulée par une rampe temporelle et un interféromètre permettant la mesure des interférences entre les rétrodiffusions Rayleigh et le signal optique de référence. Dans le but d'avoir une mesure indépendante de la polarisation [23], le signal est divisé en deux signaux orthogonaux avant leur détection par deux photodiodes.

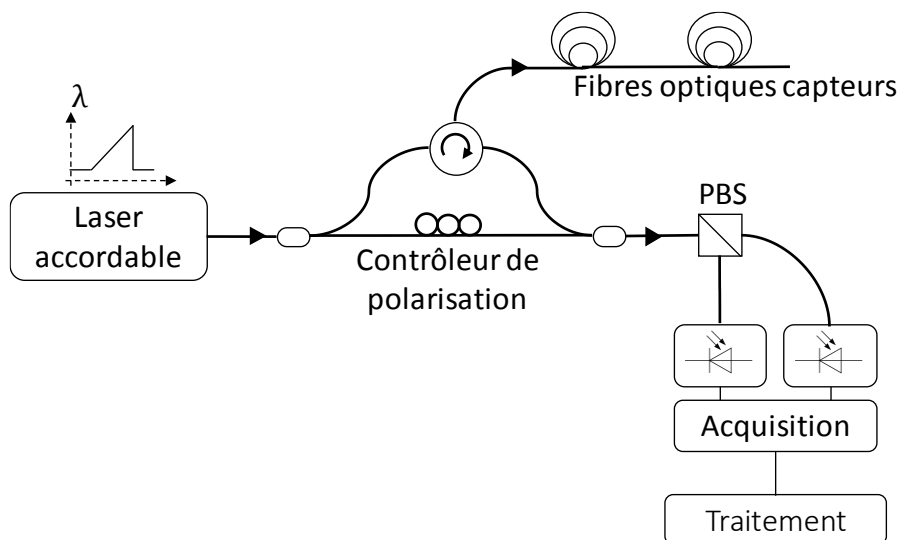


Figure I.9 Schéma de principe d'un réflectomètre optique cohérent dans le domaine fréquentiel. Le composant PBS (Polarization Beam Splitter) permet de rendre ce montage insensible à la polarisation de l'onde rétrodiffusée.

L'analyse OFDR part du principe que le temps d'aller-retour T de la lumière est constant pour un point à une distance donnée sur la fibre optique capteur. Si la fréquence de la lumière incidente varie de manière linéaire, la différence de fréquence $\Delta\nu$ est constante entre les rétrodiffusions Rayleigh à un endroit donné et la fréquence de l'oscillateur local optique. Cette analyse est schématisée à la Figure I.10. Ainsi, une fréquence de battement donnée correspond à un point sur la fibre optique. En cas de déformation d'une zone de la fibre, les interférences au niveau du détecteur changent et modifient ainsi l'amplitude du signal à la fréquence de battement correspondante.

En raison du battement optique réalisé lui conférant une grande sensibilité, ce système de mesure sera capable de détecter tout événement susceptible de modifier l'indice de réfraction optique local de

la fibre. Ainsi, dans le domaine de l'instrumentation, il est utilisé pour réaliser des mesures réparties de déformation, vibration ou de température sur de courtes distances ($< 1\text{km}$) [36, 37]. Il est aussi utilisé dans la caractérisation de composants optiques [38], de réseau de Bragg [39-41] et même dans l'imagerie biomédicale [42].

Les performances temporelles de ces systèmes sont de l'ordre de 100 Hz avec des résolutions spatiales de 50 mm et des longueurs de fibres optiques allant jusqu'à 1 km. Ces performances sont possibles en raison de l'intensité du signal Rayleigh dont le rapport entre intensité incidente et intensité rétrodiffusée est de 30 dB. La différence de performance avec l'OTDR classique (voir section précédente) est la détection par battement des rétrodiffusions donnant alors à l'OFDR une plus grande sensibilité aux variations d'indice.

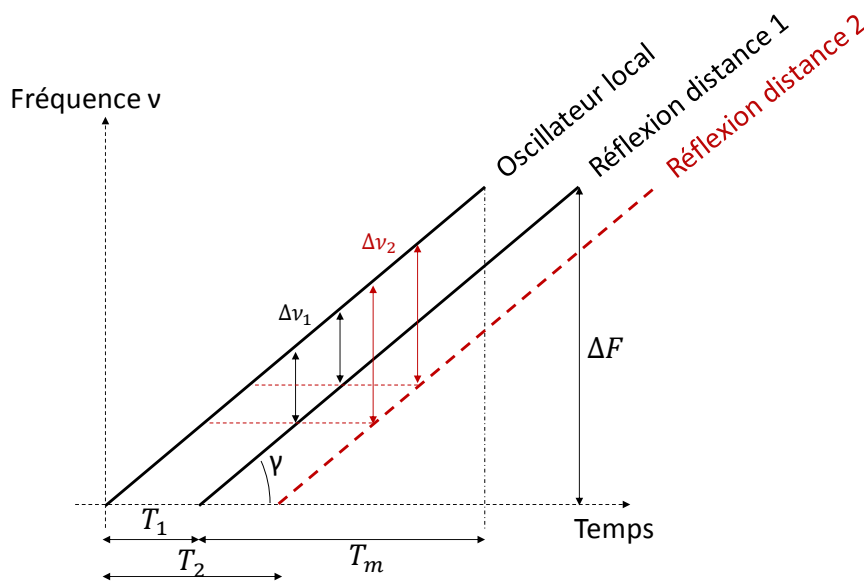


Figure I.10 Illustration du principe de l'analyse par OFDR de deux points de la fibre optique. Quel que soit l'instant d'analyse, la fréquence de battement résultante $\Delta\nu_i$ de chacun des points est constante.

I.E.1.4 Capteurs répartis acoustiques par fibre optique

Depuis quelques années, une nouvelle application a vu le jour avec l'analyse de la phase de l'onde Rayleigh rétrodiffusée. En effet, la relation de phase entre les multiples signaux issus de l'interaction entre le laser et la fibre optique est caractéristique de l'état de pression, de température et de déformation de la fibre optique [43, 44]. D'après leur principe de fonctionnement, les capteurs répartis acoustiques par fibre optique sont appelés réflectomètre cohérent dans le domaine temporel par effet Rayleigh (*Coherent-OTDR* en anglais).

Ces instruments, appelés couramment *Distributed Acoustic Sensor (DAS)*, dont le principe de mesure est basé sur la caractérisation de l'onde Rayleigh, permettent aujourd'hui de réaliser ce type de mesures dans la fibre optique. Ils permettent une analyse des événements vibratoires et acoustiques dans la

bande passante de fréquence de vibration comprise entre 20 Hz et 100 kHz. Ils sont au nombre de deux et se distinguent seulement par leur architecture opto-électronique lors de la détection et de l'acquisition des signaux optiques - l'aspect réparti de leur mesure restant basé sur le principe de l'OTDR pour la localisation des événements ; ils sont nommés : **DAS Intensité** et **DAS Phase**.

Les résultats de ces deux systèmes de mesure sont similaires : ils donnent une information sur les variations de pression acoustique en tout point de la fibre optique ; ce qui est équivalent à déployer un microphone à chacun des points de la ligne optique. Pour une acquisition continue, l'information résultante sera contenue dans une matrice à trois dimensions : temps, espace et fréquence acoustique.

- **Instrument DAS Intensité**

Lors du parcours de la fibre optique par une impulsion laser, en tout point de la portion éclairée au même instant, de multiples ondes de rétrodiffusion Rayleigh sont réfléchies. L'interférence résultante entre toutes ces ondes donne ce que l'on appelle le bruit cohérent Rayleigh (*Coherent Rayleigh Noise*, *CNR* en anglais). Il est caractéristique de l'état de la fibre optique à cet endroit et à l'instant de passage de l'impulsion. Tout changement d'état à l'échelle microscopique fera varier les rétrodiffusions Rayleigh et, par conséquent, le CNR.

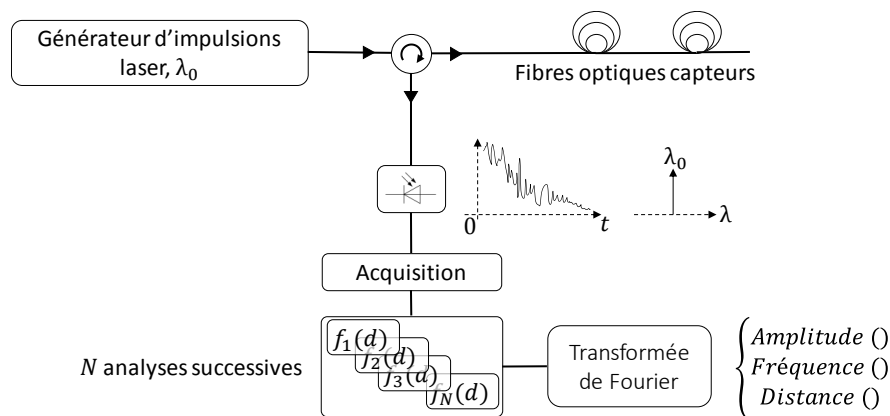


Figure I.11 Schéma de principe pour un DAS intensité permettant l'analyse temporelle du bruit Rayleigh cohérent en tout point d'une fibre optique.

Suite à l'injection d'une impulsion laser cohérente dans la ligne optique et par détection directe, l'instrument numérise le signal de rétrodiffusion à une période inférieure à la résolution spatiale (i.e. inférieure à la durée de l'impulsion). La répétition de cette mesure permet de suivre l'évolution temporelle de l'amplitude du CNR à chacune des positions de la fibre optique ; une analyse de Fourier est ensuite faite afin d'extraire sa ou ses fréquence(s) de vibration. Cet instrument vient donc échantillonner l'état en pression de la fibre optique à une fréquence déterminée par la fréquence de répétition des impulsions optiques qui définira la bande passante acoustique (avec l'application de la relation de Shannon). Dans le

cas d'une fibre optique de 20 km de long par exemple, la bande passante acoustique est limitée à 2,5 KHz en raison d'une fréquence de répétition des impulsions optiques à 5 KHz.

L'enregistrement qualitatif d'interférences ne peut se faire que si les signaux optiques sont de même fréquence ; il est donc nécessaire que le laser employé pour la réalisation de ce système de mesure soit de très haute pureté spectrale [45]. Dans le cas contraire, les signaux obtenus ressembleront à ceux obtenus par l'OTDR utilisant, quant à lui, une source lumineuse dont la largeur spectrale est très large (supérieure à quelques nanomètres) pour minimiser le CNR.

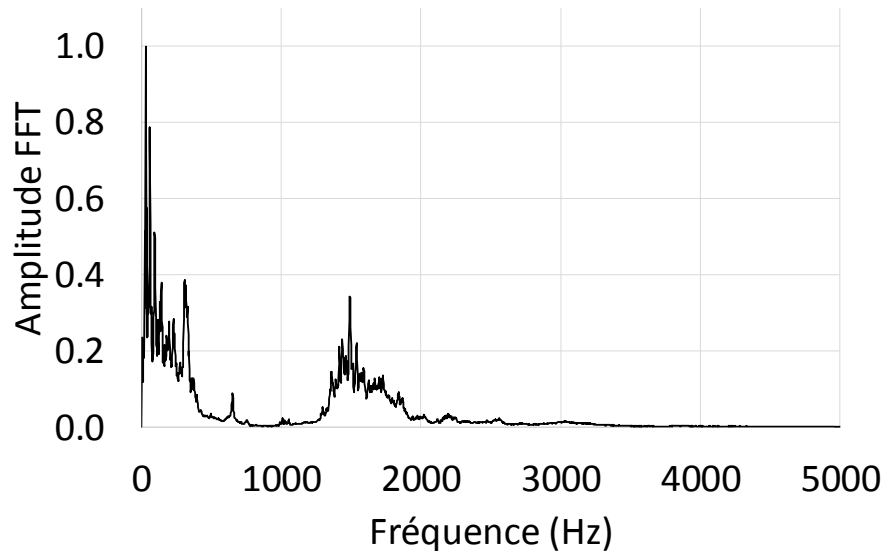


Figure I.12 Exemple de résultats de mesure acoustique sur un flexible à structure ondulée de 20 m de long (essais Cementys).

Des essais expérimentaux permettant d'estimer la réponse acoustique d'un tube pour le transport de pétrole et de gaz peuvent être réalisés. Une étude de l'acoustique des tubes à structure ondulée a été effectuée au CESAME Exadébit avec Cementys ; des résultats préliminaires sont présentés à la Figure I.12. Il s'agit d'un spectre en fréquence entre 40 Hz et 5000 Hz correspondant à la vibration du tube lors du passage d'un flux d'air à fort débit et à grande vitesse. Des composantes fréquentielles jusqu'à 400 Hz et un ensemble de signaux centrés sur 1500 Hz sont facilement identifiables. L'étude de ce spectre donnera des informations précises quant à la rigidité et à la réponse du tube lors de son utilisation. pour plus d'informations sur la théorie des tubes ondulés, nous invitons le lecteur à se reporter à la référence [46].

- **Instrument DAS Phase**

Cet instrument nécessite l'injection de deux impulsions cohérentes entre elles afin de pouvoir mesurer le déphasage entre leurs deux ondes Rayleigh respectives. En fonction des perturbations mécaniques subies par la fibre optique (traction ou compression), les deux rétrodiffusions Rayleigh auront une relation de phase particulière. La variation du déphasage entre des deux rétrodiffusions est alors représentative de la variation dynamique de l'élongation locale subie par la fibre optique.

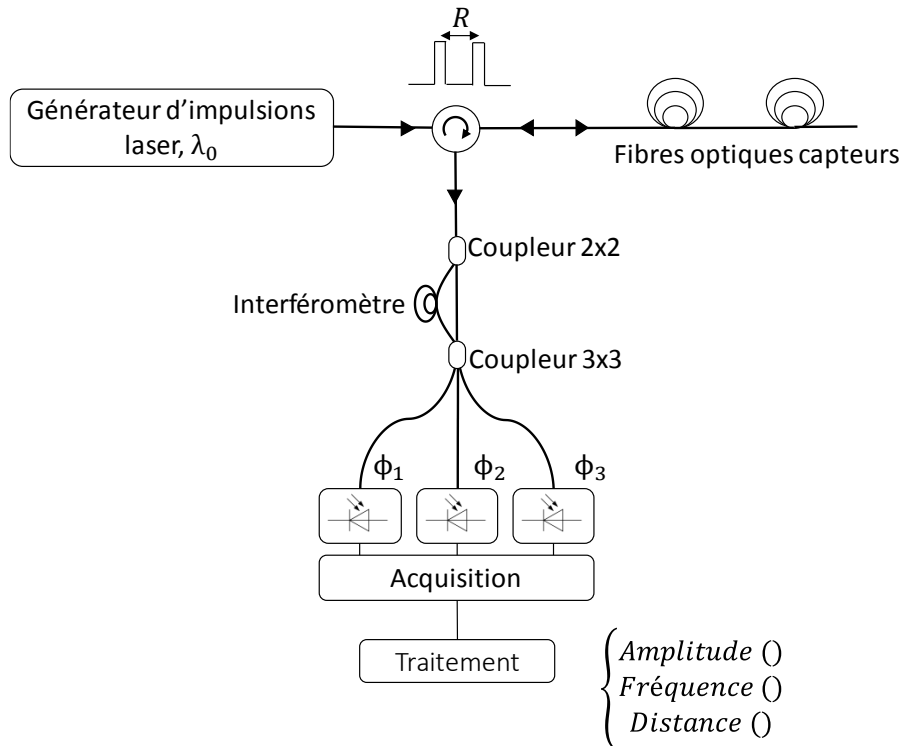


Figure I.13 Schéma de principe pour un DAS phase permettant le suivi de la phase relative des ondes Rayleigh grâce à un interféromètre.

L'information est contenue dans la différence de phase entre les deux signaux optiques. Le schéma de détection de l'instrument DAS Phase est donc similaire à une mesure interférométrique entre deux ondes optiques ; il comprend un interféromètre réalisé entre deux coupleurs (2x2 voies et 2x3 voies). Ensuite, trois détecteurs électro-optiques et trois cartes d'acquisitions échantillonnent les signaux optiques dont les phases relatives et les amplitudes seront étudiées. Ce traitement permet de détecter les variations de phases optiques entre les rétrodiffusions issues des deux impulsions optiques incidentes dans la fibre optique capteur. Cela correspond alors à une variation de longueur de fibre entre les deux impulsions optiques [47]. L'intérêt de la triple détection est la quantification de l'amplitude de la perturbation grâce aux déphasages des sorties du coupleur 3x3 [48].

- **Performances et applications**

Les applications sont nombreuses pour ces instruments car ils sont sensibles aux moindres changements de densité de la fibre optique, ce qui inclut donc les changements de déformation, température ou pression. Néanmoins, leur architecture opto-électronique ne leur permet pas de détecter les variations d'indice de réfraction lentes (inférieures à quelques *Hz*) ; c'est pourquoi ils sont principalement utilisés pour la détection ou le suivi d'événements rapides (acoustiques et vibratoires).

Les performances de ces deux instruments sont similaires ; leur différence se fait sur la résolution spatiale et la linéarité en fonction de l'amplitude de l'événement. Tout d'abord, la résolution spatiale, de l'instrument DAS-Phase est de 8 m en raison du minimum de déphasage détectable par le système (entre les deux rétrodiffusions Rayleigh issues des deux impulsions), alors que pour le DAS-intensité, elle peut descendre jusqu'à 1 m – correspondant alors à la durée de l'impulsion optique injectée. Ensuite, le principe de détection du DAS-phase lui permet de qualifier, de manière optique, les amplitudes de variations d'indice contrairement au DAS-intensité, où un post-traitement statistique est nécessaire et des harmoniques peuvent apparaître lorsque l'amplitude de la perturbation est trop importante.

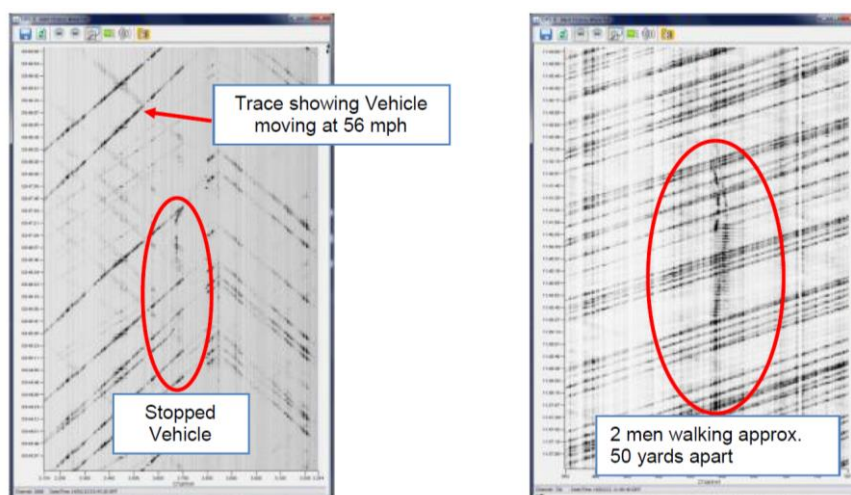


Figure I.14 Extrait d'une étude concernant la gestion du trafic routier [49]. La position et la vitesse de chaque véhicule ou piéton peuvent être calculées.

Etant donné le principe de la mesure utilisant la phase de l'onde Rayleigh, la mesure est limitée par le temps aller-retour de propagation de l'impulsion dans la fibre, soit 250 μ s pour 25 km par exemple. La relation de Shannon définit ensuite la limite de la bande passante acoustique (soit 2 kHz pour 25 km). Et enfin, la résolution fréquentielle du spectre acoustique sera déterminée par la durée de l'analyse.

L'une des principales applications est la détection d'intrusion. Étant donné que la fibre devient l'équivalent de microphones, elle est donc capable « d'entendre » ce qu'il se passe autour d'elle. Les ondes de pression, générées par les pas d'un marcheur ou d'un moteur de véhicules, sont alors détectées.

Celles-ci étant caractéristiques de ces événements, il est possible, par traitement numérique du signal, de les localiser et de les suivre. Grâce au grand nombre de points de mesure sur toute la longueur de la fibre optique, le calcul de la vitesse et du sens de déplacement est possible par analyse morphologique ; il est alors utilisé pour la surveillance de frontières ou de périmètres [50].

La seconde application concerne principalement l'industrie de l'énergie, dans le cadre de sa production et son transport. Le DAS est par exemple capable de localiser et qualifier les différents écoulements à l'intérieur d'une canalisation (caractérisation des écoulements), de même que de suivre les opérations de forage ou d'extraction de pétrole et de gaz. Cela est bien évidemment un avantage considérable, puisque cette mesure est entièrement non intrusive – la fibre optique étant simplement disposée à la proximité de la surface externe des tubes [51-53].

D'autres applications concernant le transport routier et ferroviaire (Figure I.14) ou les études sismologiques [54, 55] peuvent utiliser les avantages de détection et de sensibilité de cet instrument.

I.E.2 La rétrodiffusion Raman

I.E.2.1 Effet Physique

La rétrodiffusion Raman, pour la première fois découverte en 1928 [56], consiste en un échange d'énergie entre les photons incidents et les molécules du milieu de propagation, comme illustré à la Figure I.15. La présence de deux composantes Stokes et Anti-Stokes est due au gain ou à la perte d'énergie par la molécule, selon ses états d'excitation et de relaxation. Les fréquences de décalage sont constantes pour chacune des deux composantes et vaut environ 13 THz.

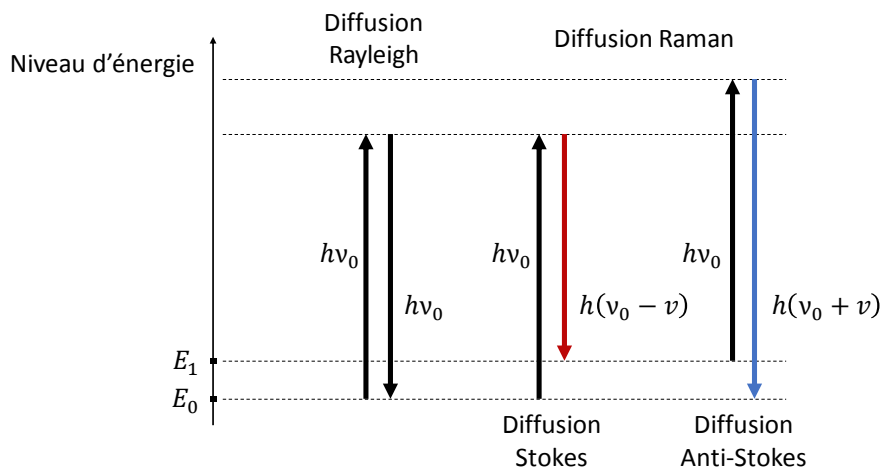


Figure I.15 Rétrodiffusion inélastique Raman et explication de la présence des deux composantes Stokes et Anti Stokes dans le spectre de rétrodiffusion par rapport à la diffusion Rayleigh.

La Figure I.16 représente l'architecture optoélectronique d'un système d'analyse des rétrodiffusions Raman dans une fibre optique. Une source laser impulsionnelle génère des impulsions optiques d'une durée généralement supérieure ou égale à 5 ns qui seront injectées via un circulateur optique dans la fibre optique capteur (celle-ci étant couramment à cœur multimode afin d'augmenter la puissance de la rétrodiffusion Raman). Le spectre de rétrodiffusion est ensuite récupéré à la sortie de la troisième branche du circulateur et est filtré selon les caractéristiques du spectre Raman attendu. Deux photo-détecteurs mesurent ensuite la puissance de chacune des composantes Stokes et Anti-Stokes.

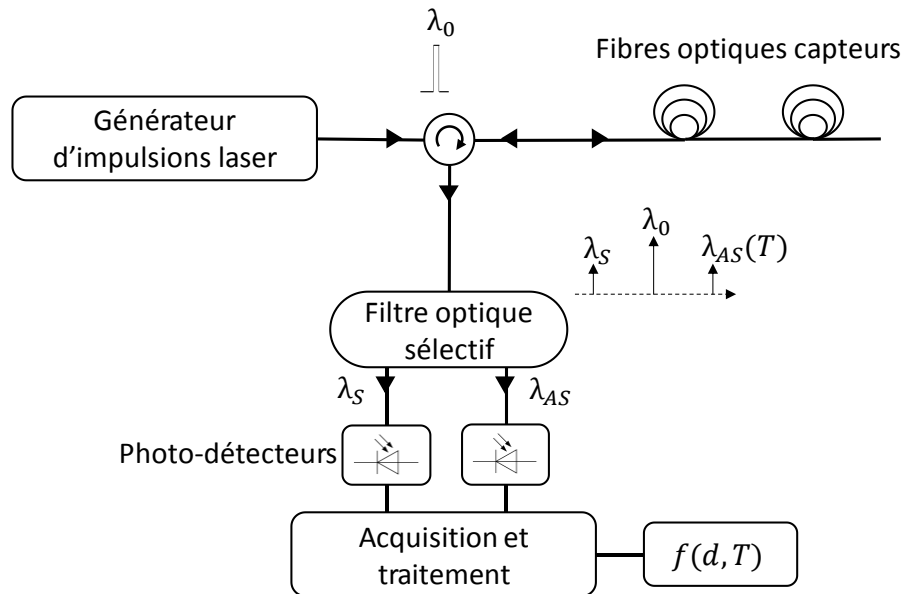


Figure I.16 Schéma de principe pour un Raman-OTDR pour la mesure de température répartie tout au long d'une fibre optique.

L'effet Raman étant sensible à la température, de nombreuses applications en instrumentation ont vu le jour. La composante Anti-Stokes possède une plus forte dépendance à la température que la composante Stokes comme le montrent les résultats expérimentaux de la Figure I.17. Ces derniers sont extraits d'une étude que j'ai réalisée chez Cementys concernant l'étalonnage d'un système de mesure de température par effet Raman. La fibre optique était placée dans une étuve, le point d'entrée dans celle-ci est à la distance $d = 10 \text{ m}$. Les températures indiquées sur les graphiques sont mesurées grâce à des capteurs de température de type PT100. Pour une même variation de température, le gain sur la composante Stokes est six fois supérieur à celui sur la composante Anti-Stokes.

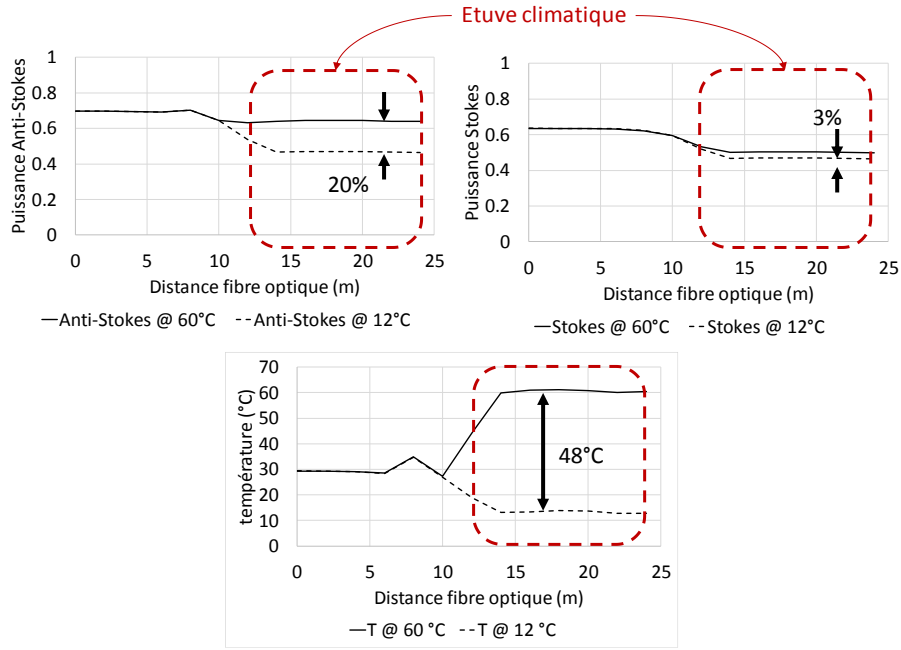


Figure I.17 Evolution de la puissance des signaux Stokes et Anti-Stokes lors d’un changement de la température de la fibre placée dans une étuve climatique.

D’après [57], le lien entre les intensités de rétrodiffusion est donné par leur ratio :

$$R(T) = \left(\frac{I_{stokes}}{I_{anti-stokes}} \right)^4 \exp\left(-\frac{hc\tilde{\nu}}{kT}\right) \quad \text{I.4}$$

avec I_{stokes} et $I_{anti-stokes}$ les amplitudes des signaux correspondants aux composantes Raman Stokes et Anti-Stokes, k la constante de Boltzmann, $\tilde{\nu}$ la fréquence de décalage Raman, T la température de la fibre optique, c la vitesse de la lumière et h la constante de Planck.

I.E.2.1 Systèmes de mesure

Les systèmes de mesure répartie de température par fibre optique sont utilisés depuis les années 1980. Autrefois limités par les pertes importantes dans les fibres optiques et le décalage en longueur d’onde ($> 100 \text{ nm}$) des composantes Stokes et Anti-Stokes par rapport à la source laser, subissant des atténuations différentes [23], ces systèmes de mesure permettent aujourd’hui des portées de plusieurs dizaines de kilomètres avec des résolutions en température inférieures à quelques degrés Celsius [58, 59]. Les performances temporelles restent cependant faibles ; pour obtenir une incertitude de mesure faible (inférieure à 1°C) sur de moyennes et longues distances (supérieures à 5 km), le temps de mesure est généralement de l’ordre de plusieurs minutes ou dizaines de minutes. L’amélioration de la résolution spatiale est, quant à elle, plus compliquée en raison du faible gain Raman s’opérant dans les fibres optiques.

Les instruments commerciaux se limitent actuellement à 50 cm mais des études en laboratoires cherchent à réduire cet paramètre de mesure ; par exemple, une résolution spatiale de 1,2 cm a été obtenue en utilisant des détecteurs supraconducteurs [60].

Le temps de mesure pour les systèmes Raman est long en raison de la faible intensité du signal rétrodiffusé. Il est généralement de plusieurs secondes ou minutes compte tenu du grand nombre d'acquisition nécessaire pour un moyennage efficace. Cependant, cela n'est pas souvent un point bloquant pour les applications utilisant cette technologie car les vitesses de variations de température sont souvent faibles.

De nombreuses applications tirent profit de cet instrument car l'un des premiers signes d'une mauvaise santé d'un ouvrage est la variation de la température, conséquence de l'apparition d'un défaut tel que, par exemple, une infiltration d'eau. Il est utilisé dans les domaines de la sécurité incendie et détection de fuite [61-64], dans les centrales nucléaires [65], dans l'industrie de l'énergie [66-68], etc.

1.E.2.2 Mesure de fuite sur une digue

Nous présentons un projet R&D réalisé en collaboration avec Cementys, la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) et l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) dont l'objectif est le suivi d'une fuite d'eau dans une digue lors de travaux en génie civil [69]. J'ai été impliqué dans l'installation sur site des équipements de surveillance (fibres optiques, capteurs de niveau d'eau, centrales météorologiques), dans la configuration et le traitement des données du système d'interrogation Raman.

Le projet consiste en la mesure et le suivi d'une fuite dans une digue entre un fleuve (le Rhône) et son contre-canal - servant à récupérer les éventuelles infiltrations d'eau non critiques pour l'état de la digue – via des mesures réparties de température à fibre optique par effet Raman. La présence d'eau dans le sol induisant un changement local de la capacité et de la conductivité thermique du sol, la mesure de température est donc bien indiquée pour ce type de projet.

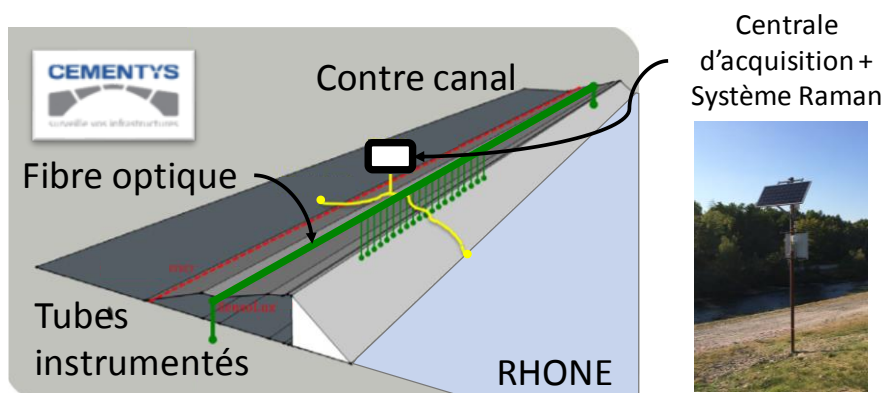


Figure I.18 Schéma de l'instrumentation mise en place par la société Cementys pour la détection et le suivi d'une fuite dans une digue, comprenant notamment un système de mesure Raman par fibre optique.

Le suivi du débit d'eau est particulièrement intéressant pour le gestionnaire d'une digue car il permet de contrôler les risques d'érosion interne causés par d'éventuels gradients hydrauliques importants occasionnant un transport de matière et fragilisant le corps de la digue.

Le système de suivi de l'évolution de la fuite se fait par mesure de température grâce à un système Raman-OTDR. La Figure I.18 montre l'instrumentation mise en place pour ce projet. Elle comprend une centrale d'acquisition pour la mesure des conditions météorologiques (vent, pluie, humidité, ensoleillement, pression), du niveau d'eau du fleuve et du contre-canal et un système Raman mesurant la température absolue de la digue selon une disposition particulière : la fibre optique crée un maillage de la digue selon un plan vertical et parallèle à la digue. Il y a, au total, dix-huit puits d'une profondeur de 11 m chacun et espacés d'environ 10 m. La zone de mesure a été choisie en fonction des relevés ultérieurs de niveau d'eau par l'IRSTEA.

L'étude a duré un an à partir Février 2015 ; la Figure I.19 montre les résultats des mesures. La zone de fuite est clairement identifiable (en bleu foncé) et tend à diminuer en quelques mois puis s'efface définitivement après l'opération de confortement par paroi étanche en ciment.

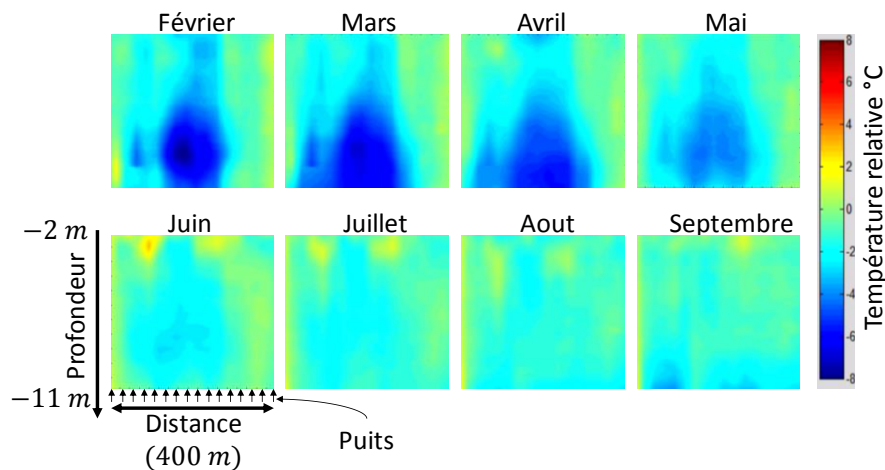


Figure I.19 Suivi et évolution d'une fuite par mesure de température répartie par effet Raman. La zone en bleu foncé correspond à la zone de fuite et disparaît totalement à partir de Juin. La température est interpolée entre chaque puit, dont les positions sont notées par des flèches.

Les résultats ci-dessus sont obtenus par une analyse particulière [70]. Etant donné la longue période de mesure (quasiment une année), les conditions météorologiques comme les effets saisonniers influencent les résultats de mesures de température et pourraient masquer la fuite (i.e. mesures de température identique en tous points). La digue est supposée avoir la même température en tous points sur toute ligne longitudinale à la digue ; par conséquent, deux des dix-huit puits ont été installés en zone dite hors fuite afin de permettre sa détection quelles que soient les conditions de température de la fuite elle-même et de l'environnement. Ils serviront donc de référence pour les seize puits placés en zone de fuite - ces deux puits étant considérés comme sains. Les écarts de température entre ces deux derniers puits et

les puits en zone de fuite montrent donc les variations inhabituelles et anormales de température en raison de la présence d'eau, comme illustré à la Figure I.20 ; ils sont exprimés par l'équation suivante :

$$\Delta T(p) = T_{référence}(p) - T_i(p) \quad I.5$$

avec ΔT la température de la fuite à la profondeur p , $T_{référence}$ la température absolue de la digue en zone hors fuite et T_i la température en zone de fuite.

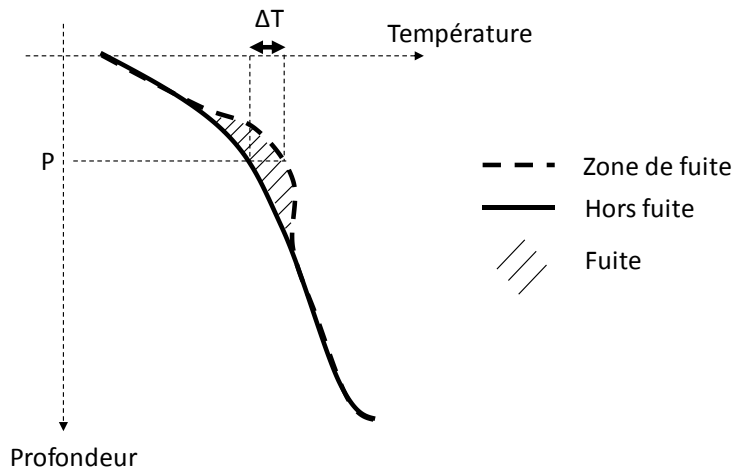


Figure I.20 Représentation graphique du calcul de la température d'une fuite en fonction d'une mesure de référence (hors fuite).

I.E.3 La rétrodiffusion Brillouin

I.E.3.1 Effet physique

L'effet Brillouin est le 3^{ème} et dernier effet induisant une rétrodiffusion de l'onde optique incidente. Etant donné le sujet de cette thèse, le principe et les phénomènes physiques mis en jeu sont plus amplement détaillés.

La diffusion Brillouin est un effet non linéaire et non élastique dans les fibres optiques généré par la présence simultanée d'une onde électromagnétique et d'une onde acoustique dont la vitesse dépend de son milieu de propagation – la fibre optique. L'interaction Brillouin est régie par différents régimes de fonctionnement qu'il est indispensable de prendre en compte dans le développement d'un système de mesure.

- **Régime de rétrodiffusion spontanée**

Sous l'effet de l'agitation thermique, les molécules et particules composant le milieu de propagation se déplacent autour de leur position d'équilibre, générant alors des ondes acoustiques. Equivalente à une variation de pression, ces dernières modifient alors localement l'indice de réfraction de la fibre et créent, dans le cœur de la fibre optique, l'équivalent d'un réseau de Bragg. Par couplage acousto-optique, il réfléchit une portion de l'onde optique incidente, appelée couramment **pompe**. De plus, ce réseau étant mobile, la fréquence de l'onde optique réfléchie est décalée par effet Doppler. Ses propriétés optiques, telles que sa largeur spectrale ou son amplitude par exemple, dépendront alors des caractéristiques de l'onde acoustique. L'onde acoustique, n'ayant pas de sens de propagation privilégié, elle peut être à la fois contra- ou co-propagatrice avec l'onde optique incidente, le décalage Brillouin se fait alors, respectivement, vers des fréquences plus hautes et vers des fréquences plus basses. Pour le premier cas, la composante de l'onde réfléchie sera alors appelée onde **Stokes** et, dans le second cas, elle sera appelée onde **Anti-Stokes**. Ce phénomène d'interaction optique avec son milieu de propagation, via des ondes acoustiques, est appelé la **diffusion Brillouin**.

En fonction des particularités de conception de la fibre optique (dopants, géométrie, etc.), plusieurs ondes acoustiques peuvent exister et ont chacune des vitesses de propagation différentes. Dans ce cas, l'étude de la diffusion Brillouin dans une fibre optique monomode tient compte de plusieurs couplages acousto-optiques, se traduisant par un spectre Brillouin composé de plusieurs pics [71].

Ce couplage acousto-optique, schématisé à la Figure I.21, traduit la réflexion de l'onde incidente sur l'onde acoustique et s'exprime par les équations suivantes :

$$\vec{k}_S = \vec{k}_P \pm \vec{q} \quad 1.6$$

$$v_S = v_P \pm v_a \quad 1.7$$

avec k et q les vecteurs d'onde et v les fréquences des ondes Stokes, Pompes et Acoustiques.

Le signe de la partie droite des équations 1.6 et 1.7 permet de définir les diffusions Brillouin Stokes (signe « - ») et Anti-Stokes (signe « + »).

Les vecteurs d'ondes optiques et acoustiques sont définis de la manière suivante :

$$|q| = \frac{\Omega_a}{v_a} = \frac{2\pi}{\lambda_a} \quad 1.8$$

$$|k_P| = \frac{\omega_P n}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda_P} \quad 1.9$$

$$|k_S| = \frac{\omega_S n}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda_S} \quad 1.10$$

avec λ_a , λ_p et λ_s les longueurs d'ondes des ondes acoustiques, pompes et Stokes, $\Omega_a/2\pi$ la fréquence des ondes acoustiques et v_a leurs vitesses de propagation, c la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice de réfraction de la fibre optique.

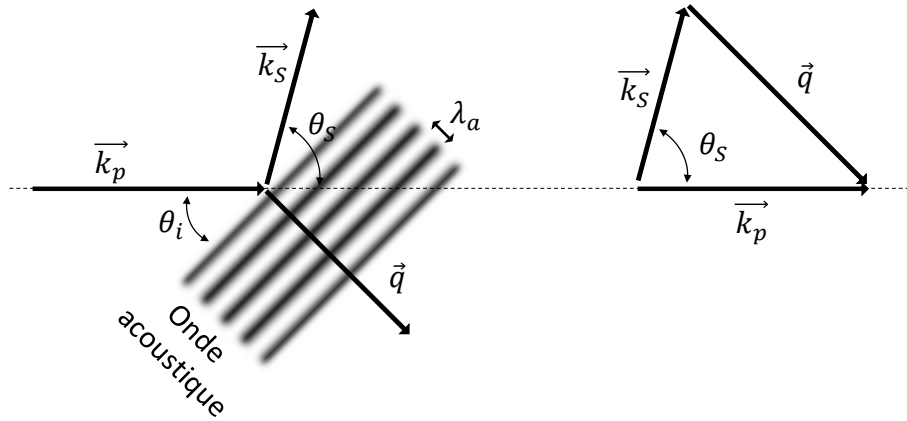


Figure I.21 Couplage d'une onde optique incidente sur une onde acoustique permettant la rétrodiffusion d'une onde Brillouin Stokes.

A la manière d'un réseau de Bragg, les longueurs d'onde λ_s des champs Stokes et λ_a des champs acoustiques sont liées avec la relation de Bragg [31]:

$$m\lambda_s = 2\lambda_a \sin(\theta_i) \text{ avec } m \in \mathbb{N} \quad \text{I.11}$$

Au premier ordre ($m = 1$), la fréquence des ondes acoustiques est très inférieure à celle de l'onde optique incidente ($v_a \ll v_p$). D'après l'équation I.6, les modules des vecteurs d'onde Stokes et pompe sont similaires $|k_s| \approx |k_p|$. L'angle de diffusion de l'onde Stokes vaut alors deux fois l'angle d'incidence $\theta_s = 2\theta_i$. L'équation I.11 s'écrit :

$$|q| = 2|k_p|. \sin(\theta_s/2) \quad \text{I.12}$$

Etant donnée la conception des fibres optiques, seuls les modes se propageant longitudinalement sont pris en compte et restreignent les valeurs de θ_i à 0 et π . Cependant, d'après l'équation I.12, une seule direction de propagation est admissible pour l'onde Stokes (et Anti-Stokes) lorsque $\theta_s = \pi$. La diffusion Brillouin est un phénomène uniquement contra-propagatif ; elle est alors nommée **rétrodiffusion Brillouin**.

A partir des équations précédentes, le **décalage de la fréquence Brillouin** ν_B est défini par l'équation suivante, en fonction de la longueur d'onde du laser incident λ_0 et de la vitesse des ondes acoustiques v_A dans le milieu :

$$v_B = \frac{\Omega_a}{2\pi} = \frac{2n_{eff} v_A}{\lambda_0} \quad \text{I.13}$$

Avec n_{eff} l'indice effectif du milieu de propagation à la longueur d'onde λ_0 .

Les équations précédentes décrivent la **rétrodiffusion Brillouin spontanée**, issue de l'interaction entre une onde électromagnétique injectée dans la fibre optique et une onde acoustique initiée par le bruit thermique. Il est possible de forcer et d'amplifier cette interaction en injectant, par exemple, manuellement deux ondes optiques contra-propagatrices : l'**onde pompe** et l'**onde Stokes**. Dans ce cas, le régime de rétrodiffusion devient **stimulé**.

- **Régime de rétrodiffusion Stimulé (ou spontanée amplifié)**

Le régime stimulé apparaît lorsque deux ondes optiques et le matériau (par le biais des ondes acoustiques) interagissent entre eux. Il intervient dans la rétrodiffusion Brillouin à partir du moment où une onde Stokes (λ_s, k_s) et une onde pompe (λ_p, k_p) sont présentes simultanément dans la fibre et de manière contra-propagatrice. Avec cette condition, le battement optique dont la longueur d'onde est $\lambda_a = \lambda_s - \lambda_p$, génère une onde acoustique (λ_a, k_a).

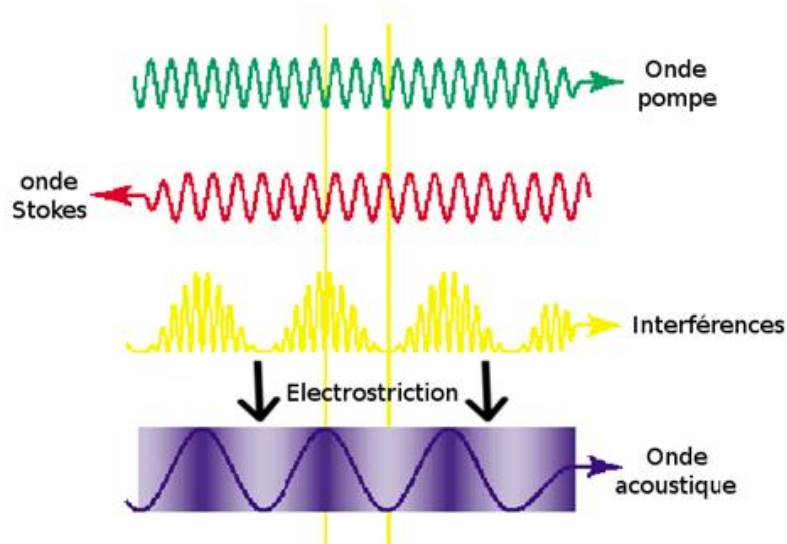


Figure I.22 Principe du régime Brillouin stimulé par électrostriction [72]. Deux ondes optiques contra-propagatrice génère par électrostriction une onde acoustique dont la fréquence est égale à la différence de fréquence des deux ondes optiques incidentes.

Ce phénomène, appelé « **électrostriction** » et schématisé à la Figure I.22, est la tendance d'un matériau diélectrique à se déformer sous l'effet d'un champ électrique E . Dans notre cas, E correspond à

la somme des deux ondes optiques pompes et sondes se propageant dans la fibre optique. Le résultat de cette interaction est la modification de l'état en pression locale du matériau [31] :

$$P_{st} = -\frac{1}{2}\epsilon_0\gamma_e E^2 \quad \text{I.14}$$

avec ϵ_0 la constante diélectrique et $\gamma_e = \rho(\partial\epsilon/\partial\rho)$ la constante électrostrictive du matériau (caractérisant le changement de diélectricité).

La variation de pression $\Delta\rho$ est définie par :

$$\Delta\rho = -\rho C P_{st} \quad \text{I.15}$$

Avec ρ la densité du matériau, C sa compressibilité définie par $C = \rho^{-1}(\partial\rho/\partial p)$.

En combinant les équations I.14 et I.15, l'équation, qui définit le changement de densité du matériau en fonction du champ électrique appliqué E, est obtenue :

$$\Delta\rho = -\frac{1}{2}\epsilon_0\gamma_e\rho C E^2 \quad \text{I.16}$$

Les molécules et particules du matériau (la silice) réagissent aux champs électriques et il se crée une modulation de pression - et donc de densité - au sein du cœur de la fibre optique. Cette variation de densité influence la permittivité électrique du milieu, modifiant par conséquent l'indice de réfraction optique :

$$\Delta\epsilon = \frac{\gamma_e}{\rho_0} \Delta\rho \quad \text{I.17}$$

A partir du moment où le phénomène d'électrostriction est enclenché, une onde acoustique est ainsi générée (illustré à la Figure I.22) et amplifie le phénomène de rétrodiffusion spontanée et les ondes Stokes ainsi engendrées s'additionnent. De cette manière, ondes acoustiques et Stokes se renforcent mutuellement comme illustré à la Figure I.23.

Ce régime de rétrodiffusion Brillouin est enclenché lorsque ces trois ondes se propagent simultanément dans la fibre optique. Deux cas sont possibles afin d'arriver à ce stade :

- **Régime stimulé** : Deux ondes optiques sont manuellement injectées à chaque extrémité de la fibre optique. Lorsqu'elles se rencontrent, le phénomène d'électrostriction est enclenché afin de générer l'onde acoustique nécessaire à la rétrodiffusion Brillouin.
- **Régime spontané amplifié** : lorsque la puissance de l'onde pompe incidente est suffisamment intense pour générer, par la rétrodiffusion spontanée, une onde Stokes également forte, le

phénomène d'électrostriction est enclenché. Cette limite de puissance est appelée la puissance seuil Brillouin ; dans le domaine des télécommunications, elle limite la puissance des ondes optiques injectées et, en cas de dépassement, la qualité de transmission diminue.

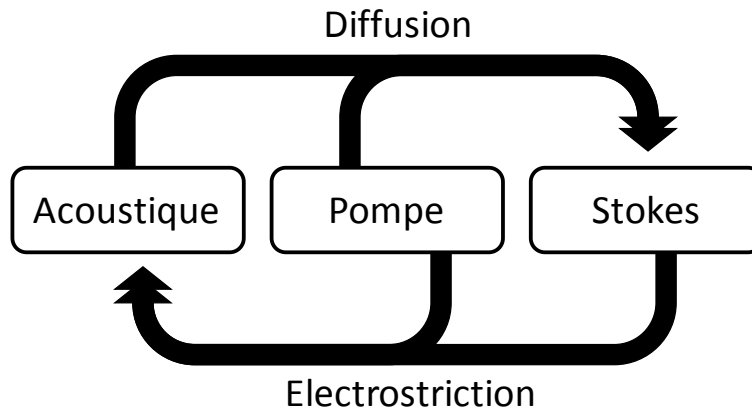


Figure I.23 Boucle d'amplification expliquant le régime Brillouin stimulé par le phénomène d'électrostriction.

Ce processus est cependant soumis à une condition : les ondes pompes et Stokes doivent vérifier la relation de Bragg (I.11) et les équations de couplage des ondes (I.6 et I.7) expliquées plus haut. En effet, lorsque cette condition est respectée, la rétrodiffusion Brillouin atteint son amplitude maximale. Le gain maximum g_0 est défini en fonction des caractéristiques locales mécanique et optique de la fibre :

$$g_0 = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2}{c \lambda_0^2 \rho v_A \Gamma_B} \quad \text{I.18}$$

avec p_{12} est le coefficient du tenseur photo-élastique, n est l'indice optique effectif, ρ est la densité volumique du matériau, c la vitesse de la lumière dans le vide, v_A la vitesse des ondes acoustiques et Γ_B le taux d'amortissement des phonons acoustiques.

Le tenseur photo-élastique traduit l'intensité du couplage entre onde acoustique et onde optique. Il est défini en fonction de la sensibilité de l'indice de réfraction du milieu à la déformation [73].

Lorsque ce régime de rétrodiffusion est stimulé, l'amplification des ondes de rétrodiffusion augmente. Cela se traduit alors par un transfert d'énergie des ondes optiques de haute fréquence vers celles de basse fréquence. Le gain de cette amplification est dit saturé si ce transfert d'énergie est trop important et amène au phénomène de déplétion de l'onde pompe. L'erreur sur l'estimation de la fréquence de décalage Brillouin est alors augmentée [74]. La puissance seuil Brillouin P_{th} est définie lorsque la déplétion atteint 3 dB. Le niveau de ce seuil dépend de la longueur efficace de l'interaction Brillouin, le gain g_0 et l'aire effective du couplage acousto-optique A_{ao_eff} [75] :

$$P_{th} \cdot g_0 \cdot \frac{L_{eff}}{A_{ao_eff}} = G \quad \text{I.19}$$

Pour une longueur effective de 100 m de fibre optique, G vaut environ 21 [71]. La longueur effective dépend de l'atténuation de la lumière dans la fibre optique et de sa longueur physique totale ; l'aire effective dépend de la distribution transverse des champs électromagnétiques se propageant dans la fibre optique [72].

Le temps de vie des phonons acoustiques $T_B \approx 10 \text{ ns}$ représente la durée d'interaction entre les ondes optiques et acoustiques. L'amortissement de ces ondes acoustiques respecte une loi de décroissance exponentielle en $\exp(-\Gamma_B t)$ où $\Gamma_B = \frac{1}{T_B}$ est le coefficient d'amortissement des phonons acoustiques ; par conséquent, le couplage acousto-optique définissant les rétrodiffusions Brillouin suit une fonction lorentzienne de largeur à mi-hauteur $\Delta\nu_B = \frac{\Gamma_B}{2\pi}$. La forme du spectre de rétrodiffusions est définie par [29] :

$$g_B(\omega) = g_0 \cdot \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\omega - \omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad \text{I.20}$$

Le maximum de gain Brillouin est atteint lorsque $\omega = \omega_B$ et vaut g_0 .

I.E.3.2 Systèmes de mesure Brillouin par analyse temporelle

Le schéma de principe du système de caractérisation de l'effet Brillouin est donné à la Figure I.24. Des impulsions optiques sont injectées dans une fibre optique monomode via un circulateur. Un coupleur permet de mélanger **les rétrodiffusions Brillouin** et **un oscillateur local optique**, tous deux issus d'une unique source laser. Le décalage de la fréquence Brillouin étant généralement inférieur à 12 GHz, une **détection cohérente hétérodyne** permet l'analyse du spectre de battement avec des équipements électroniques classiques (tels que des oscilloscopes hautes fréquences ou des analyseurs de spectres électriques). Ce dernier contient le spectre de gain Brillouin $g_B(\omega)$. La correspondance entre les courbes de gain Brillouin et une fonction lorentzienne définie par l'équation I.20 permet de définir précisément la fréquence de décalage, l'amplitude et la largeur de raie des rétrodiffusions Brillouin.

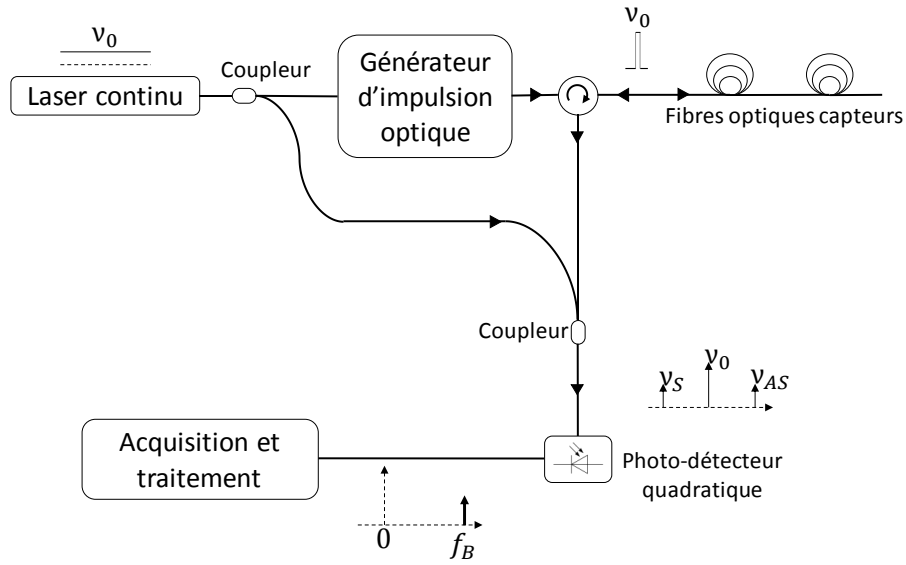


Figure I.24 Schéma de principe pour un Brillouin-OTDR par détection cohérente. ν_0 est la fréquence optique du laser, ν_S et ν_{AS} les composantes Brillouin Stokes et Anti-Stokes et f_B la fréquence de battement électrique.

I.E.3.3 Sensibilité de l'effet Brillouin à la température et à la déformation

De nombreuses applications en instrumentation ont vu le jour en raison de la dépendance de la fréquence centrale du pic Brillouin à la température et à la déformation de la fibre optique, comme le montre la Figure I.25. Cela se traduit par l'équation suivante :

$$\nu_{B1} - \nu_{B0} = \Delta T C_T + \varepsilon C_\varepsilon \quad \text{I.21}$$

avec ν_{B1} et ν_{B0} le décalage de la fréquence Brillouin à deux instants différents, ΔT et ε les variations de température et de déformation entre ces deux instants et $C_T \approx 1\text{MHz}/^\circ\text{C}$ et $C_\varepsilon \approx 0.05\text{MHz}/(\mu\text{m}/\text{m})$ les coefficients de conversion de température et de déformation.

Ces coefficients tiennent compte de la dépendance de la fréquence de décalage Brillouin $\nu_B(\varepsilon, T)$ à la température et à la déformation de l'indice de réfraction optique $n(\varepsilon, T)$ et de la vitesse des ondes acoustiques $v_a(\varepsilon, T)$ dans la fibre optique [26].

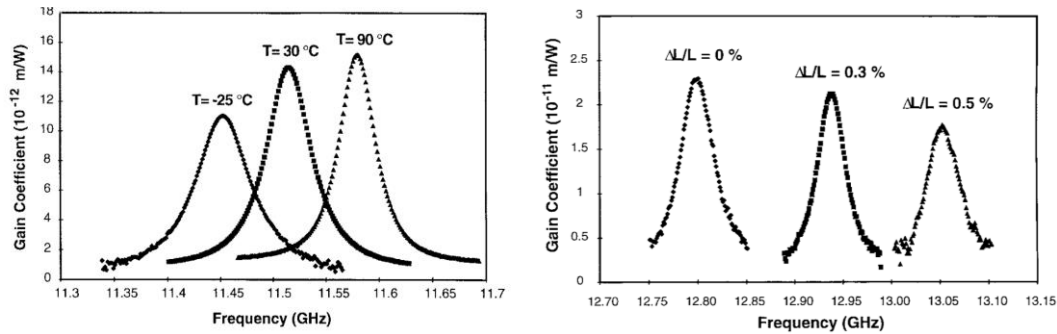


Figure I.25 Dépendance de la fréquence de décalage Brillouin à la température et à la déformation [76].

Il est donc possible, par l'obtention du spectre de gain Brillouin d'une fibre optique, de suivre son évolution en température et déformation. Il n'est cependant pas encore possible, à notre connaissance, de séparer ces deux grandeurs sur une seule et unique fibre optique. L'emploi de câbles particuliers permet néanmoins d'étudier l'une ou l'autre variable en suivant certaines procédures :

- **Avec un câble contenant une fibre optique libre** : le résultat de la mesure Brillouin sur cette fibre libre de toute contrainte mécanique ne dépendra que de la température. Si le câble contient également une fibre optique sous contrainte, alors la mesure de déformation est possible par compensation des effets thermiques. Pourtant, en raison du coefficient de dilation thermique du câble non nul, pour de grandes variations de température, des efforts mécaniques peuvent s'appliquer sur la fibre optique et donc perturber les mesures.
- **Utilisation simultanée d'un système Raman et d'un système Brillouin** : n'étant sensible qu'à la température, la mesure Raman permet de compenser les effets thermiques sur les résultats de la mesure Brillouin. Ainsi, une mesure de déformation seule est possible [77]. Les spectres Raman et Brillouin ne se superposant pas, une seule fibre monomode peut être suffisante.
- De nombreux projets de recherches et publications ont montré l'intérêt porté à ce sujet en tentant une différenciation des effets thermiques et des effets de déformations. L'une des pistes de recherches est l'étude de **l'influence des conditions de fibrage, du profil d'indice et de la composition des fibres optiques** sur la sensibilité C_T et C_ϵ de l'effet Brillouin à la température et déformation [26].

I.E.3.4 Résolution spatiale

La résolution spatiale des systèmes Brillouin par OTDR est dépendante de la durée des impulsions optiques injectées dans la fibre. Cependant, il est nécessaire de préciser que la réduction temporelle de ces impulsions a certaines conséquences sur la forme du spectre de gain Brillouin obtenue [78]:

- **Réduction drastique de l'amplitude de pics Brillouin** réduisant donc le rapport signal à bruit de la mesure,
- **Elargissement spectral** en raison de la convolution entre le spectre de gain Brillouin et le spectre optique de l'impulsion (d'autant plus large que l'impulsion est courte). La détermination de la fréquence de décalage Brillouin est soumise à une plus forte incertitude.
- **Le temps de vie des ondes acoustiques dans la fibre optique (≈ 10 ns)** marque une limite fondamentale à la résolution spatiale des systèmes Brillouin par analyse dans le domaine temporel.

Nous allons maintenant voir différentes architectures opto-électroniques permettant une mesure du spectre de gain Brillouin. Elles utilisent les différents régimes de rétrodiffusion Brillouin, spontané ou stimulé, et les différents principes de mesure décrits précédemment :

- **Brillouin Optical Time Domain Analyzer (Brillouin-OTDA)** : systèmes disponibles commercialement dont les performances permettent d'analyser plus de 100 km de fibre optique et qui sont capables de réduire la résolution spatiale à moins de 1 m.
- **Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (Brillouin-OTDR)** : systèmes de plus en plus recherchés en industrie en raison de leur facilité d'installation grâce à leur fonctionnement en réflectométrie, malgré des performances plus faibles que le Brillouin-OTDA.
- **Brillouin Optical Frequency Domain Analyzer (Brillouin-OFDA)** : systèmes peu répandus dans l'industrie mais dont les performances se rapprochent du B-OTDA.
- **Brillouin Optical Correlation Domain Analyzer/Reflectometer (Brillouin-OCDA/R)** : systèmes de laboratoire ayant une résolution spatiale maximale de l'ordre du centimètre mais une portée limitée à quelques dizaines de mètres.

I.F Systèmes opto-électroniques pour la mesure du spectre de gain Brillouin

I.F.1 Introduction aux systèmes de mesure Brillouin dans le domaine temporel

Les montages de types **Analyseur** nécessitent l'accès aux deux extrémités de la fibre optique pour l'injection des ondes optiques pompe et sonde. Cependant, dans le milieu industriel, cette configuration peut être difficile à mettre en place et à maintenir en phase de production. En cas de rupture de la fibre optique, le système ne sera pas capable de la localiser où qu'elle soit sur la ligne (i.e. éloignée ou non de l'interrogeur). Nous verrons que cela est dû à son schéma de détection optique, analysant le gain ou la perte sur le signal pompe transmis.

Un système de mesure par **réflectométrie** est donc avantageux dans certains cas : en cas de coupure, par exemple, la mesure sera toujours possible jusqu'à ce point et permettra donc de la localiser rapidement, tout en gardant la surveillance de la première portion de ligne. Dans cette catégorie, les performances de mesure sont moins bonnes que celles des systèmes par **analyse** [79, 80] :

	Brillouin-OTDA	Brillouin-OTDR
Portée de mesure	160 km	70 km
Résolution de mesure	2 $\mu\text{m}/\text{m}$	16 $\mu\text{m}/\text{m}$
Résolution spatiale	0.1 m	1 m
Temps de mesure	< 10 secondes	>10 secondes

Table I.1 Tableau de comparaison des performances entre Brillouin-OTDA et Brillouin-OTDR.

La différence de performance est principalement liée à la différence du gain d'amplification des ondes rétrodiffusées Stokes en raison du régime de fonctionnement : **il est stimulé dans les montages de type Analyseur et est spontané pour les montages en réflectométrie** où le rapport signal à bruit est plus faible.

I.F.2 Analyseur optique Brillouin dans le domaine temporel

Ce système d'analyse mesure le spectre de gain Brillouin sous un régime stimulé en injectant à chaque extrémité de la fibre optique les ondes sonde (continue et de faible puissance) et pompe (impulsionnelle de forte puissance) dont la différence de fréquence optique est modulée au cours de l'analyse. Le spectre de gain Brillouin local est mesuré par variation de la différence de fréquence entre l'onde pompe et l'onde sonde au voisinage de la fréquence de décalage Brillouin [81]. L'évolution de l'intensité des ondes optiques mises en jeu est définie par les équations de couplage acousto-optique (I.6 et I.7). Le couplage acousto-optique induit un transfert d'énergie de l'onde de fréquence supérieure vers l'onde de fréquence inférieure [76]. Le taux de transfert est défini en fonction des puissances optiques injectées aux deux extrémités de la fibre capteur. En particulier, l'onde optique continue ne doit pas dépasser la puissance seuil Brillouin au risque d'être rapidement déplétée. Cela aurait pour conséquence de réduire fortement la portée de mesure du système et d'introduire également une erreur quant à l'estimation de la fréquence de décalage Brillouin [82].

La Figure I.27 illustre cette mesure lors de l'interaction entre les deux ondes optiques pour deux valeurs d'écart en fréquence $\Delta\nu_1$ et $\Delta\nu_2$. Reprenons et détaillons chacune des étapes :

- Injection des deux ondes pompe et sonde à chacune des extrémités de la fibre dont une portion est sous contrainte.
- Interaction entre les ondes pompe et sonde avec le respect des équations de couplage ; le gain Brillouin est maximal ; il y a un transfert d'énergie de l'onde pompe de fréquence ν_p vers l'onde sonde de fréquence ν_s car $\nu_p < \nu_s$.
- Lors de l'interaction pompe/sonde sur la zone de fibre déformée, le couplage n'est pas à son maximum et le transfert d'énergie ne s'effectue pas ; le gain Brillouin est faible.
- Même configuration que l'étape b), le gain Brillouin est de nouveau maximal.
- Lors du changement de fréquence optique, les interactions précédentes (soient les étapes b, c et d) s'inversent et le gain Brillouin est alors maximal à l'endroit de la fibre déformée.

La mesure locale du gain Brillouin se fait par l'analyse temporelle de la puissance de l'onde sonde transmise de la gauche vers la droite sur la Figure I.27. La variation de la différence de fréquence optique $\Delta\nu = \nu_p - \nu_s$ permet de balayer et reconstruire le spectre de gain Brillouin.

La localisation sur la fibre optique se fait dans le domaine temporel, c'est-à-dire de manière équivalente à l'OTDR. Pour le Brillouin-OTDA, l'analyse se fait en transmission et non en réflectométrie. Deux schémas d'interrogateurs, dont les transferts d'énergie sont schématisés à la Figure I.26, sont alors possibles [83] :

- **Mesure par gain** : Si la fréquence optique de l'onde impulsionnelle est supérieure à celle de l'onde continue.
- **Mesure par perte** : Si la fréquence optique de l'onde impulsionnelle est inférieure à celle de l'onde continue.

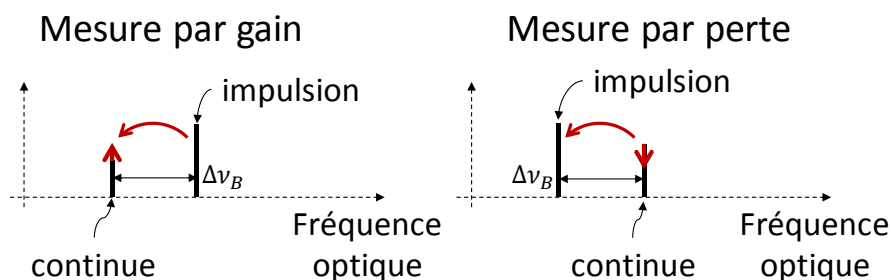


Figure I.26 Illustration des principes de fonctionnement des interrogateurs Brillouin-OTDA par gain (gauche) et par perte (droite). $\Delta\nu_B$ est la fréquence de décalage Brillouin.

Les performances de la mesure par perte sont meilleures en raison de l'amplification de l'onde impulsionnelle par l'onde continue (transfert d'énergie lors du couplage acousto-optique) ; la déplétion

de l'onde impulsionnelle est alors négligeable [23]. Malgré la déplétion de l'onde continue tout au long de la fibre optique, le bruit de détection est plus faible en raison de la puissance incidente sur le photodétecteur non négligeable. Ainsi, une résolution spatiale de 5 m contre 10 m et une portée de mesure de 32 km [84] contre 22 km [85] sont obtenues avec un montage par perte avec la même incertitude de mesure de déformation de 20 $\mu\text{m}/\text{m}$.

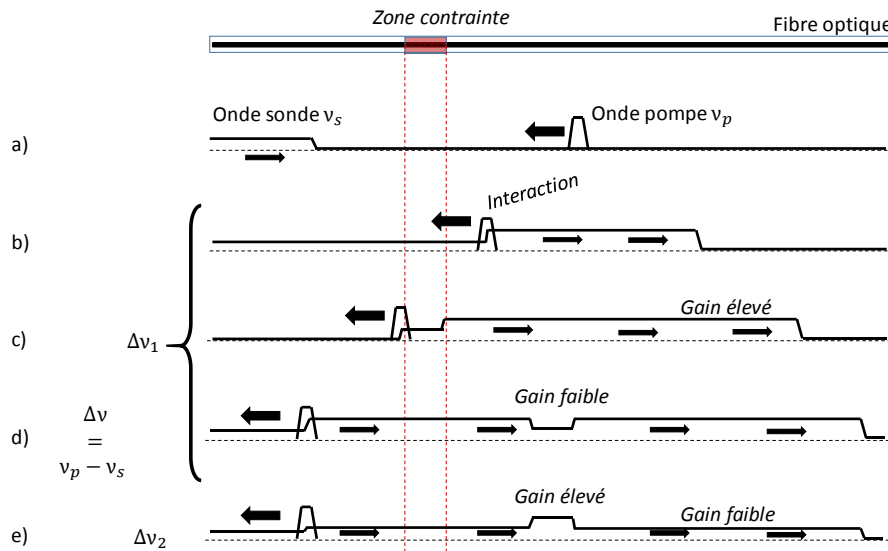


Figure I.27 Principe de fonctionnement d'un système pompe-sonde pour une analyse par un système Brillouin-OTDA.

I.F.3 Réflectomètre optique temporel par effet Brillouin

Nous venons de voir que le système Brillouin-OTDA nécessite l'accès aux deux extrémités de la fibre afin d'injecter les deux ondes pompe et sonde pour placer l'interaction Brillouin dans un régime stimulé. Ainsi, par l'amplification des ondes acoustiques via le phénomène d'électrostriction, le transfert d'énergie augmente entre les signaux pompe et sonde. Pour le montage de type Brillouin-OTDR, cela n'est plus le cas. Une seule extrémité est utile - l'autre étant simplement coupée. L'injection d'une unique impulsion induit alors une rétrodiffusion Brillouin spontanée lorsque la fibre optique est éclairée. Cette rétrodiffusion est ensuite analysée par **un système de détection cohérente** qui utilise un oscillateur local optique ayant pour objectif de transposer, par battement, des fréquences optiques en fréquences électriques. Le spectre de gain Brillouin est alors analysé avec des équipements et composants opto-électroniques et une carte d'acquisition ; un exemple de montage est donné ci-après.

Un système électronique de traitement analogique du signal permet le balayage du spectre de gain Brillouin – nécessaire à l'obtention de toutes ces caractéristiques, comme dans le montage Brillouin-OTDA. La bande passante des composants électroniques doit être adaptée afin de respecter les résolutions spatiales ou temporelles souhaitées (rappel : si la résolution souhaité est de 1 m, soit des impulsions de 10 ns, la bande passante de détection doit au minimum être de 100 MHz).

Le montage de la Figure I.28 présente un système pour l'analyse du spectre de rétrodiffusion Brillouin en régime spontané [72]. Une détection cohérente est réalisée entre les rétrodiffusions Brillouin spontanées de la fibre sous test et un oscillateur local optique. Le signal électrique issu de la détection du signal optique de battement est ensuite mélangé avec un oscillateur local électrique, ramenant le signal Brillouin vers une fréquence intermédiaire f_i . Un filtre passe bande de largeur 100 MHz et une diode Schottky permettent alors la détection de l'évolution temporelle de l'amplitude du gain Brillouin à une fréquence donnée. Le balayage en fréquence se fait alors par la modulation de l'oscillateur local électrique (nommé synthétiseur de fréquence sur la figure). Ce montage étant le point de départ du système de mesure conçu durant cette thèse, ce montage sera expliqué plus en détail au chapitre III.

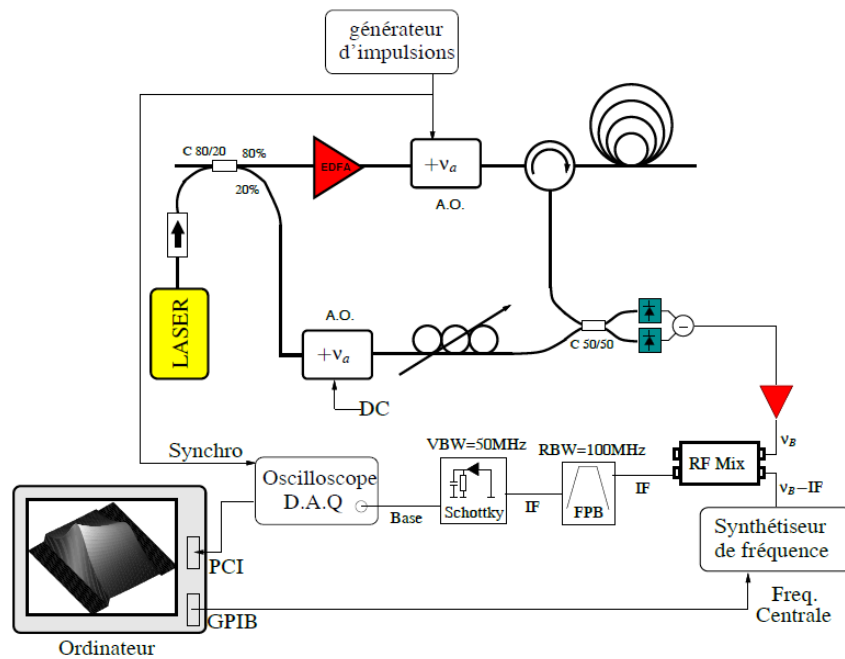


Figure I.28 Système opto-électronique de type Brillouin-OTDR d'après [72] permettant l'analyse du spectre de rétrodiffusion spontanée d'une fibre avec une résolution spatiale de 1 m.

Ce montage a été réalisé durant ma première année de thèse en reprenant les caractéristiques du montage de la Figure I.28 et permet d'obtenir une résolution spatiale de 1 m et une résolution en fréquence du décalage de la fréquence Brillouin inférieure à 1 MHz. L'utilisation d'un modulateur acousto-optique, induisant un décalage en fréquence entre les rétrodiffusions Brillouin et l'oscillateur local permet la distinction des composantes Stokes et Anti-Stokes sur le spectre de gain Brillouin local [86], comme présenté à la Figure I.29. Les résultats de fréquences centrales ν_B et de largeurs à mi-hauteur (*Full Width at Half Maximum*, FWHM en anglais) sont obtenus grâce à une correspondance avec une fonction lorentzienne. Les incertitudes de mesure pour ces expérimentations sont inférieures à 1 MHz. En régime spontané, la puissance et la largeur à mi-hauteur des composantes Stokes et Anti-Stokes sont égales. En régime stimulé, ce n'est plus le cas ; l'onde Stokes est naturellement plus amplifiée que l'onde Anti-Stokes,

qui est en plus déplétée, en raison du transfert d'énergie se faisant des hautes fréquences vers les basses fréquences, plus énergétiques.

Cependant, lors de la réalisation d'un système de mesure par effet Brillouin, il n'est pas nécessaire de séparer les composantes Stokes et Anti-Stokes. En effet, leur superposition offre un gain de détection de 3 dB car elles ont les mêmes caractéristiques spectrales.

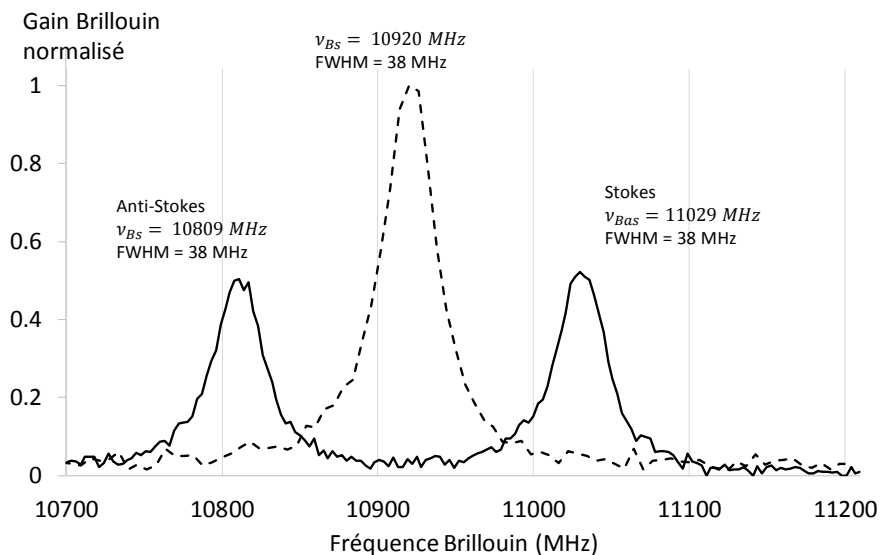


Figure I.29 Spectres Brillouin expérimentaux d'une fibre optique Corning G.652-ULL mono-mode. Courbe en trait plein : différenciation des composantes Stokes et Anti-Stokes grâce à un modulateur acousto-optique – leur décalage est de $2 * 110$ MHz. Courbe en pointillés : les deux composantes sont superposées dans le domaine électrique.

I.F.4 Autres systèmes de mesure Brillouin

I.F.4.1 Analyseur optique Brillouin dans le domaine de corrélation

L'analyse du spectre Brillouin par corrélation est totalement différente des deux méthodes fonctionnant dans le domaine temporel que l'on vient d'aborder précédemment. Dans ce cas, le point de mesure est défini par une modulation fréquentielle particulière des deux ondes optiques pompe et sonde mises en jeu.

Pour l'architecture de type *Brillouin-Optical Correlation Domain Analyzer* (BOCDA), l'onde pompe de fréquence ν_1 et l'onde sonde de fréquence ν_2 sont toutes deux continues et générées de manière à ce que ν_1 et ν_2 aient un écart de l'ordre de la fréquence de décalage Brillouin recherchée ; la variation de ces deux variables permettra le balayage fréquentiel du spectre de gain Brillouin. De plus, elles sont toutes deux modulées en fréquence par une fonction sinusoïdale d'amplitude ΔF_m de manière à ce que leur

interaction produise des nœuds que l'on appellera **des pics de corrélation**, comme illustrés à la Figure I.30. Ne pouvant pas y avoir plus d'un nœud présent dans la fibre, la longueur maximale d'analyse pour cet interrogateur est l'espacement entre deux nœuds de corrélation. Ce nœud correspond au point d'analyse et peut se déplacer tout au long de la fibre capteur selon les modulations appliquées aux ondes optiques.

Sur la zone où la corrélation est maximale (dont la longueur définit la résolution spatiale du système), la rétrodiffusion Brillouin stimulée est enclenchée. L'intensité de détection correspond à l'intensité du gain Brillouin pour une fréquence donnée et définie par l'écart de fréquence des deux ondes. Un balayage est alors nécessaire de manière à scanner l'intégralité du spectre de gain Brillouin [87].

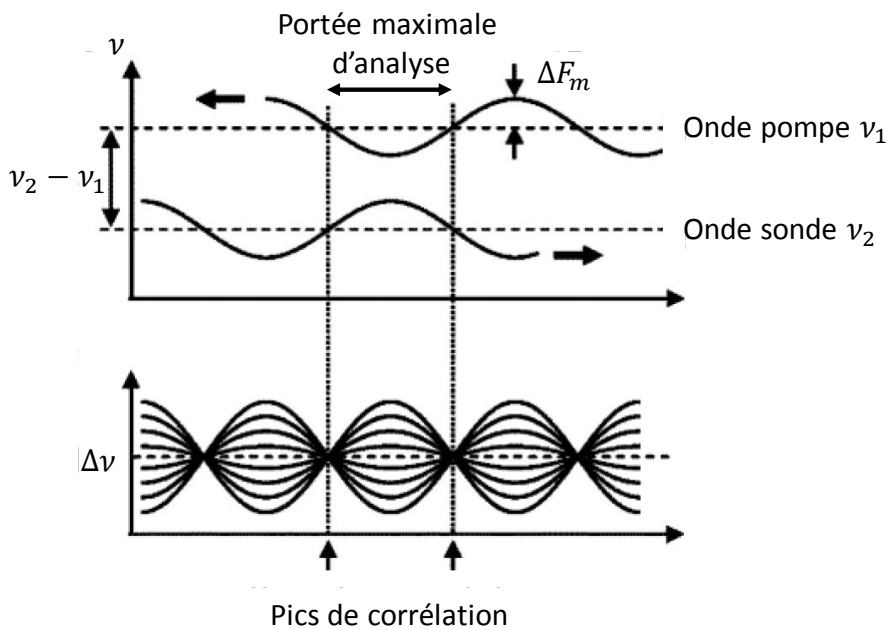


Figure I.30 Interaction entre les ondes pompe et sonde dans un système de type Brillouin-OCDA [72]. La distance entre deux pics de corrélation définit la portée maximale de mesure.

Le système équivalent existe en réflectométrie ; dans cette configuration, les pics de corrélation sont générés lors de la détection en modulant l'onde optique injectée dans la fibre, qui est aussi utilisée en tant qu'oscillateur local [88]. En cas de corrélation entre les deux signaux au niveau du détecteur électro-optique, l'intensité de détection est maximale.

Les systèmes basés sur l'analyse de corrélation permettent d'obtenir une excellente résolution spatiale mais pour une portée de mesure réduite. Une résolution spatiale de 1 cm a été démontrée par K. Hotate & al. sur une longueur de fibre optique inférieure à 3 m [89]. Pour atteindre des portées plus longues, la résolution spatiale doit être dégradée ; Y. Mizuno & al. ont atteint une résolution spatiale est

de 27 cm mais pour 1500 m de fibre optique en réflectométrie [90]. De nombreuses références sont présentes dans les travaux de K. Hotate [87] qui donnent un aperçu général des possibilités de cette technique.

I.F.4.2 Analyseur optique Brillouin dans le domaine fréquentiel

Dans cette section, la méthode par analyse fréquentielle du spectre de gain Brillouin est présentée. Cette architecture électro-optique, nommée Brillouin-OFDR, a été pour la première fois présentée par D. Garus & al. [91]. Le schéma expérimental est donné à la Figure I.31.

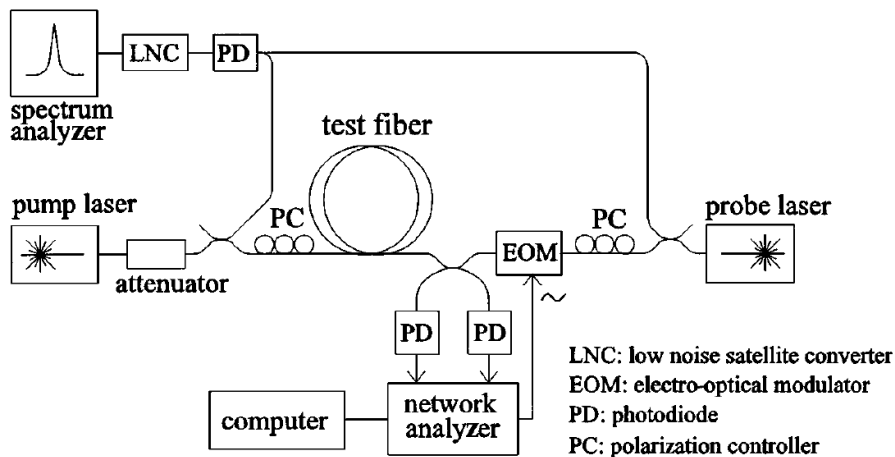


Figure I.31 Schéma expérimental du premier Brillouin-OFDA d’après [91].

Le principe d’analyse de cet instrument est similaire à celui de l’OFDR (voir section I.E.1.3) où la détermination de la position de mesure se fait par un calcul de transformée de Fourier inverse. Afin de permettre l’analyse du spectre de rétrodiffusion Brillouin, les deux ondes optiques pompe et sonde ont un décalage en fréquence environ égal à la fréquence de décalage Brillouin estimée $\Delta\nu_B$ de la fibre analysée. De plus, l’onde sonde est modulée par une rampe fréquentielle dont l’amplitude de modulation Δf_m est égale à la portion du spectre de gain Brillouin recherchée. L’injection de cette onde se fait de manière à ce qu’à un instant donné, toute la fibre optique capteur soit éclairée par une lumière de fréquence optique différente. La fonction de transfert obtenue par un analyseur de réseau après détection hétérodyne permet d’obtenir le spectre de gain Brillouin.

Comme pour l’OFDR, la portée L_{max} et la résolution spatiale Δz d’un tel système sont limitées par la résolution fréquentielle des composants ou équipements employés, notamment celle de l’analyseur de réseau δf , et sont définies par [91]:

$$L_{max} = \frac{c}{2n \cdot \delta f} \tag{I.22}$$

$$\Delta z = \frac{c}{2n \cdot \Delta f_m}$$

De même que pour les systèmes basés sur une analyse par corrélation, l'avantage de ceux basés sur une analyse fréquentielle est l'utilisation de signaux continus pour obtenir le spectre de gain Brillouin et donc le non élargissement de la largeur de raie Brillouin. Ainsi la résolution spatiale est fortement améliorée ; D. Garus et al. ont réalisé une mesure sur 10 m de fibre optique avec une résolution spatiale de 3 cm [92]. Des portées de plusieurs dizaines de kilomètres sont cependant possibles avec les systèmes Brillouin-OFDA mais les résolutions spatiales sont alors équivalentes (de quelques mètres) à celles obtenues par des systèmes Brillouin-OTDA [93].

Malgré les similitudes avec l'instrument OFDR, ce montage n'a pas d'équivalent en mode réflectométrie en raison de l'absence de la relation de phase entre l'onde incidente et l'onde rétrodiffusée Brillouin initiée par le bruit thermique [87].

I.F.5 Applications et performances des technologies Brillouin

I.F.5.1 Applications aux mesures de déformation

Les applications pour les mesures réparties par fibres optiques sont nombreuses. De nombreux domaines tirent profit de ces technologies dont le principal avantage est **l'absence de zone morte de mesure tout au long de la fibre optique**. L'état en déformation ou en température de l'intégralité de la fibre optique est alors analysé de manière simultanée. La surveillance et le suivi des structures (SHM) possédant de grand linéaire sont donc avantageés. L'industrie du transport de l'énergie (pétrole, gaz, électricité) est certainement le domaine où ces capteurs sont les plus utilisés du fait des longues distances sur lesquelles s'étendent leur structure (généralement supérieure à quelques kilomètres). Comme nous le verrons dans le chapitre II, le suivi de canalisations souterraines ou en milieu marin permet de détecter une déformation locale pouvant mener à leur rupture ou à leur flambement [94-96]. Les domaines des transports et du génie civil comme le ferroviaire profitent de cette technologie pour la détection de fontis sous les rails [97] ou pour le suivi de l'évolution de fissure sur des structures en béton telles que des ponts [98].

I.F.5.2 Applications aux mesures de température

L'effet Brillouin est sensible à la température et diverses méthodes permettent une différenciation des effets thermique et mécanique (voir section I.E.3.3). De nombreux exemples d'application, cités par C. A. Galindez-Jamiy & al. [99], utilisent l'effet Brillouin pour sa sensibilité à la température dans la cas, par exemple, la détection de fuite sur des canalisations enterrées.

I.F.5.3 Performances et améliorations des systèmes Brillouin

I.F.5.3.1 Résolution spatiale

Comme déjà évoqué à la section I.E.3.2, la résolution est l'un des points faibles des systèmes de mesure Brillouin par OTDR en raison de la limite fondamentale liée au temps de décroissance des ondes acoustiques dans la fibre optique et de l'élargissement de la largeur de raie Brillouin lorsque l'impulsion optique devient inférieure à 10 ns - soit 1 m de résolution spatiale. Dès lors, l'incertitude concernant la détermination de la fréquence de décalage Brillouin devient plus importante. Cependant, plusieurs études ont donné des résultats très intéressants dans ce domaine.

La technique de la double impulsion est employée dans les travaux de Wenhai Li & al. [100]. Elle se fonde sur l'analyse de deux spectres de gain Brillouin en injectant deux impulsions de durée différente. La soustraction des deux spectres permet d'obtenir des résolutions spatiales égales à cette différence (au temps de montée des impulsions près). Il est alors possible d'obtenir des résolutions spatiales de l'ordre du centimètre.

L'analyse par impulsion « noire » est une méthode d'analyse où les ondes pompe et sonde sont continues [101]. L'onde sonde est toutefois éteinte durant une durée définissant alors la résolution spatiale souhaitée. Les ondes acoustiques sont continuellement excitées par la présence permanente de lumière. L'interaction Brillouin est alors proche du régime stimulé et, par conséquent, le spectre de gain Brillouin obtenue n'est pas élargi, ce qui permet une détermination précise de la fréquence centrale. De cette manière, des résolutions de 50 mm ont été atteintes avec une incertitude de mesure de déformation de $6\text{ }\mu\text{m/m}$ sur une fibre de 100 m de long.

Les systèmes de mesure, qui fonctionnent avec la technique de l'impulsion déphasée, emploient une onde pompe impulsionnelle en termes de phase et non en termes d'intensité. Ce déphasage temporaire d'environ 1 ns , par exemple, a pour effet d'annuler le phénomène d'électrostriction, perturbant ainsi le régime Brillouin stimulé précédemment établi et le transfert d'énergie entre les deux ondes optiques. Le système de mesure Brillouin-OTDA se basant sur l'analyse nommée *Brillouin Echoes* permet d'atteindre des résolutions spatiales de 10 cm , tout en gardant la largeur de bande naturelle des rétrodiffusions Brillouin [102, 103]. L'architecture optique est similaire à un système Brillouin-OTDA où la différence de fréquence entre les ondes pompe et sonde est contrôlée de manière à balayer le spectre de gain Brillouin.

I.F.5.3.2 Portée de mesure

De nombreux autres systèmes permettent aussi d'obtenir d'excellentes performances. Dans la littérature actuelle, il est possible de trouver des montages permettant d'améliorer la portée des mesures en insérant dans la ligne optique des systèmes d'amplification via l'effet Raman [104, 105] ou des équipements de type EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) [106] ; ils atteignent des portées encore inégalées. Les systèmes Brillouin-OTDR peuvent également bénéficier des avantages de l'amplification en ligne. Une

portée de 150 km a été atteinte avec 50 m de résolution spatiale et une résolution fréquentielle d'environ 5 MHz par M. N. Alahbabi [107] grâce à l'amplification Raman.

Un autre moyen, développé par Y. Dong & al. [108], utilise les ondes optiques ayant des fréquences différentes afin de limiter le couplage acousto-optique sur certaines portions de la fibre optique proche du système d'interrogation et de l'optimiser sur des zones plus éloignées ; le nom de *Time Division Multiplexing* (TDM) Brillouin-ODTA est alors employé.

Les expérimentations de M. Alahbabi & al. [109] ont permis de développer un système de mesure Brillouin-OTDR avec une portée de 100km. Ces performances sont bonnes jusqu'à 80 km avec une résolution en fréquence de 2 MHz, mais se dégradent ensuite vite pour atteindre 8 MHz à 100 km - leur résolution spatiale étant de 50 m.

1.F.5.4 Rapidité de mesure

Le mode d'acquisition par balayage est celui originellement utilisé pour une analyse du spectre de gain Brillouin. Actuellement, la majorité des interrogateurs Brillouin nécessite l'analyse complète du spectre Brillouin afin d'estimer le plus précisément possible le décalage de la fréquence Brillouin. Pour cela, la mesure répartie du gain Brillouin pour toute une plage de fréquence est faite avec un pas en fréquence arbitraire. Cette analyse optique est ensuite suivie d'un traitement permettant d'estimer la fréquence centrale du pic Brillouin en minimisant les bruits de mesure. Il s'agit d'un processus de correspondance entre la forme théorique du spectre de gain Brillouin (lorentzienne) et le spectre mesuré. Ces deux étapes sont essentielles pour obtenir des résultats de qualité mais prennent du temps en fonction des caractéristiques de la ligne optique.

Malgré leur temps de réponse long (supérieur à quelques secondes ou minutes), ces systèmes offrent des très bonnes résolutions de mesure (résolution fréquentielle inférieure à 1 MHz) et des portées de plusieurs dizaines de kilomètres selon les versions ou les applications. Dans cette section, nous nous focalisons sur les principales études menées dans le but d'accélérer les temps d'acquisition de la mesure de déformation par effet Brillouin.

1.F.5.4.1 Systèmes de mesure par analyse multi-fréquentielle

L'inconvénient majeur de l'analyse du spectre complet de gain Brillouin est le balayage en fréquence forcément coûteux en termes de durée d'analyse. Une technique, appelée **agilité fréquentielle** (*Frequency Agile Technique, FAT* en anglais), emploie un peigne optique en fréquence, pour l'onde pompe ou l'onde sonde, afin de mesurer la forme du spectre Brillouin.

En 2008, P. Chaube présente un montage expérimental pour la mesure dynamique de déformation en utilisant une forme d'onde pompe continue et composée de différentes composantes fréquentielles [110]. Cette méthode permet alors d'analyser simultanément et de manière répartie la forme du

spectre de gain Brillouin. L'onde pompe, représentant alors un peigne en fréquence, interagit avec l'onde sonde (mono-fréquence), multipliant les interactions et les rétrodiffusions Brillouin.

Cependant, la résolution fréquentielle du spectre de gain Brillouin est limitée par l'étalement spectral des composantes du peigne, à cause de l'interaction Brillouin. Ces dernières ne doivent pas se superposer. De plus, la résolution spatiale du système de mesure doit être dégradée pour limiter cet élargissement. Des mesures dynamiques de 3.9kHz ont été obtenues avec une résolution spatiale de 12m.

Plus récemment en 2011, A. Voskoboinik & al ont amélioré le système précédemment détaillé en ajoutant une modulation en fréquence sur l'onde pompe [111, 112]. A présent, deux peignes de fréquence interagissent dans la fibre optique. L'espacement des composantes spectrales est tel que chaque interaction connaît un gain Brillouin différent. Ce processus permet de retrouver le spectre de gain Brillouin entier avec une résolution fréquentielle plus importante.

1.F.5.4.2 Mesure par flanc de frange

Après une analyse statique du spectre de gain Brillouin par balayage en fréquence, la méthode du flanc de frange permet de suivre dynamiquement l'évolution du décalage de la fréquence Brillouin. En effet, ce suivi est réalisé par l'enregistrement des variations locales du gain Brillouin, à une fréquence donnée de son spectre tout au long de la fibre optique. Au lieu d'analyser l'ensemble des fréquences pour reconstituer tout le spectre Brillouin à chaque mesure, une seule fréquence de celui-ci est suivie dans le temps et tout au long de la fibre optique ; le temps de mesure est donc considérablement réduit.

Cette méthode est celle que j'ai utilisée dans mon travail de thèse pour réaliser un système de mesure dynamique par Brillouin-OTDR. Elle sera expliquée au chapitre III. Dans cette section, un état de l'art des systèmes qui utilisent cette méthode sera fait.

Selon nos connaissances, les premières expérimentations de mesures Brillouin de déformation en mode flanc de frange ont été réalisées, en 2009 par une équipe italienne du laboratoire *Institute for Electromagnetic Sensing of the environment* (R. Bernini, A. Minardo, L. Zeni) et décrites dans la publication « *Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering* » [113]. Leur système de mesure est de type Brillouin-OTDA et est capable de réaliser une mesure répartie et dynamique de déformation sur une longueur totale de fibre optique de 30 m. Une acquisition à 200 Hz de la déformation d'un endroit donné de la fibre optique est réalisée ; l'incertitude de mesure est de 95 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Quelques années plus tard, ce système a été employé pour le suivi de la position d'un train [114]. Néanmoins, l'architecture opto-électronique du système en question utilise une fréquence de travail fixe. En effet, les variations spatiales statiques de déformation induites par les conditions d'installation pourraient fortement réduire la sensibilité de la mesure à certains endroits (voir figure 3 de [114]).

La solution est donc d'ajuster localement cette fréquence de travail en fonction des conditions initiales. Les travaux de Yair Peled, durant sa thèse de doctorat à l'université de Tel-Aviv en Israël soutenue en 2014 [115], ont fait évoluer ce montage en modulant la fréquence de l'onde sonde en fonction de la

caractéristique Brillouin initiale de la fibre optique capteur. Cette évolution rend ce montage plus flexible de sorte qu'il puisse s'adapter à toute instrumentation, sans que l'on ait à se soucier des conditions de pose de la fibre, générant souvent une variation aléatoire de déformation tout au long de celle-ci.

La méthode du flanc de frange offre de nombreuses possibilités de mesure dynamique, mais cette analyse Brillouin devient alors fortement dépendante des pertes optiques dans la ligne au cours de l'acquisition. L'expérimentation Brillouin-OTDA de Kenichiro T. & al [116] utilise deux lasers indépendants espacés en longueur d'onde de plusieurs nanomètres ($\approx 4\text{nm}$), générant ainsi deux pics Brillouin indépendants. L'analyse du ratio des gains Brillouin à deux fréquences de travail fixes - chacune respectivement sur la pente positive et négative, permet d'estimer les variations de fréquences Brillouin. Ce ratio, et donc le résultat de mesure, est indépendant des pertes optiques en ligne au cours de l'analyse. Cependant, aucune modulation de fréquence n'est réalisée ; les performances de ce système sont alors dépendantes des conditions de pose.

En 2016, Dexin Ba & al. [117] proposent une technique basée sur l'analyse par flanc de frange du pic de gain Brillouin mais en utilisant plusieurs points de mesure (via la technique d'agilité en fréquence - FAT). Cela permet d'étendre la plage de mesure en cas de variations importantes de fréquence de décalage Brillouin lors de l'acquisition. Ainsi, une mesure à 12,8 Hz a été effectuée avec une variation maximale de déformation de 5000 $\mu\text{m}/\text{m}$, une incertitude de mesure de 60 $\mu\text{m}/\text{m}$ et une longueur de fibre de 32 m. Une autre solution qui emploie la technique FAT, proposée par Zhou & al. [118], utilise les résultats de mesure de gain Brillouin et de phase de l'onde rétrodiffusée dans le but de rendre leur montage insensible aux variations de puissance de l'onde pompe. Zhou & al. implémentent également la technique de l'agilité fréquentielle (FAT) pour étendre la plage de mesure jusqu'à plus de 5000 $\mu\text{m}/\text{m}$; des mesures dynamiques de 11,14 Hz ont alors été reportées.

1.F.5.4.3 Systèmes de mesure par analyse de phase

Les travaux de l'équipe de A. Masoudi & al. [119] ont permis de réaliser, en 2013, un système de mesure dynamique de déformation par effet Brillouin spontané, avec un taux de répétition de 2 Hz sur une fibre optique de 2km. Ces travaux se fondent sur la détection d'une variation de phase dans les signaux rétrodiffusés. Avec l'aide d'un interféromètre de Mach-Zhender déséquilibré (i.e. dont l'un des bras est volontairement plus long) suivi d'un coupleur 3x3, les variations de phase des signaux entrant sont détectées. Cette nouvelle méthode permet de s'affranchir de toutes variations de décalage de fréquence Brillouin initialement présentes lors de la pose de la fibre optique. Ce montage détecte uniquement le changement de phase d'un signal optique.

Les performances d'un tel montage sont bonnes et pourraient lui permettre de réaliser des mesures de vibrations de structure, sur le court terme. Cependant, ce type de montage possède une fréquence de coupure basse pour la mesure de déformation car la détection se fait par analyse de variations de phase. Il ne serait pas possible d'identifier les déformations apparues entre deux campagnes de mesures consécutives.

I.F.5.4.4 Systèmes de mesure par mesure de corrélation

Les systèmes de mesure de déformation utilisant la technique de corrélation offrent de nombreuses possibilités. Malgré leur courte portée (généralement inférieure à 200 m), ils sont surtout reconnus pour leur résolution spatiale centimétrique (ou inférieure). Principalement, deux montages expérimentaux rapportent des mesures distribuées et dynamiques. En 2009, W. Zou & al réalisent un système avec une fréquence d'acquisition de 5 Hz sur une fibre optique de 50 m pour une résolution spatiale de 5 cm [120]. Deux ans plus tard, KY Song & al modifient le schéma de modulation des ondes pompes et sondes afin de scanner progressivement l'ensemble de la fibre optique [121] ; ils obtiennent, sur une fibre de 100 m, une mesure dynamique à 20 Hz avec une résolution spatiale de 80cm et 2,5 MHz d'incertitude sur la définition de la fréquence Brillouin.

I.F.5.4.5 Brillouin-OTDR avec traitement de Fourier

Dans la littérature actuelle et à notre connaissance, seule l'équipe de G. Tu & al. [122] a travaillé sur un montage expérimental basé sur le principe du Brillouin-OTDR afin de réaliser des mesures dynamiques et réparties de déformation. A l'aide d'un générateur de signal, le signal Brillouin est transposé en basse fréquence et est échantillonné par une carte d'acquisition à 300 Msamples/sec. Un calcul de transformée de Fourier permet de calculer la courbe locale de gain Brillouin et, ainsi, de déterminer la fréquence de décalage Brillouin par correspondance avec une lorentzienne.

Les performances de ce montage ont permis de mesurer les déformations réparties sur une fibre optique de 270 m avec une résolution spatiale de 12 m et une incertitude de $\pm 45 \mu\text{m}/\text{m}$. La fréquence de répétition de mesure est de 16,7 Hz.

I.G Conclusion du chapitre I

Les technologies de capteurs à fibres optiques sont une véritable révolution pour le monde de l'industrie. Les avantages liés à la mesure par ces techniques (encombrement et poids minimes, insensibilité aux champs électromagnétiques, portée de mesure, etc.) permettent de rivaliser et parfois même de surpasser les techniques de mesure traditionnelles par capteurs électriques. Dans le cas des mesures réparties, le bénéfice se trouve dans l'instrumentation des grandes structures linéaires. La détection de défauts ou le suivi de la production en tous points de celle-ci, sans aucune zone morte, est sûrement l'un des points les plus importants.

La recherche et le développement de nouveaux systèmes sont actuellement forts. Les performances obtenues permettent de diversifier ces appareils et de les rendre accessibles. Aujourd'hui, et depuis plus de vingt ans, des systèmes de mesure fondés sur l'analyse des rétrodiffusions Raman et Brillouin sont disponibles en version industrielle. Ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines comme l'énergie ou le génie civil en raison de leur apport sur le suivi de santé des infrastructures utilisées. Les

systèmes de mesures de déformations par effet Brillouin restent parfois en retrait à cause de leur manque de résolution spatiale et de rapidité d'acquisition mais ils sont alors employés pour la mesure de température avec des câbles de protection appropriés. Enfin, les recherches et applications concernant les mesures basées sur l'effet Rayleigh (OFDR et DAS) sont encore jeunes et sont dédiées à seulement quelques marchés niches (R&D, intrusion, caractérisation des écoulements dans les secteurs de l'énergie, etc.) mais leur potentiel est impressionnant.

Aujourd'hui la tendance est à l'optimisation des paramètres de mesure afin d'atteindre des résultats toujours plus fins en termes de résolution spatiale ou de mesure, de sensibilité, de rapidité d'acquisition ou encore de portée. Pour les industriels, les axes de recherche sont cependant plus orientés vers la rapidité et la réduction des coûts de ces systèmes. Les montages commerciaux fonctionnent cependant principalement dans le régime stimulé, où l'accès aux deux extrémités de la fibre optique est nécessaire. Cette condition est un inconvénient dans le cas où la ligne optique venait à être coupée, car plus aucune mesure n'est alors possible. C'est pourquoi nos recherches se sont orientées vers un système capable de détecter les variations de décalage de fréquence Brillouin dans un régime spontané où une seule extrémité de la fibre optique est nécessaire.

Par ailleurs, ces systèmes restent à un prix élevé et sont sensibles aux bruits thermiques et électroniques de leur propre architecture de détection ou d'analyse ; cela est dû notamment à l'emploi de technologies électriques dont les bandes passantes sont élevées (supérieure à 10 GHz).

Le tableau ci-après compare les ordres de grandeurs des performances des différentes technologies Brillouin présentées précédemment :

	Portée (km)	Résolution spatiale (m)	Résolution en déformation $\mu\text{m}/\text{m}$	Temps de mesures	R&D ou Industriel (I)
BOTDA	120 km	0.5 m	5 $\mu\text{m}/\text{m}$	10 secondes	Industriel
BOTDR	80 km	1 m	10 $\mu\text{m}/\text{m}$	20 secondes	Industriel
BOFDA	50 km	1 m	5 $\mu\text{m}/\text{m}$	10 secondes	Industriel
BOCDA	<500 m	1 cm	-	-	R&D
BOCDR	<500 m	1 cm	-	-	R&D

Chapitre 2

Mesures de déformation et suivi des structures linéaires

Dans ce chapitre, nous détaillons un modèle mécanique adapté à des structures linéaires (telles que des canalisations) qui permet, à partir de mesure de déformation avec un système Brillouin, de calculer le déplacement de la structure. Nous en démontrons l'application sur un banc d'essais mis en œuvre chez Cementys. Deux applications industrielles, dont j'ai été le chef de projet, sont ensuite présentées et démontrent les possibilités de ces capteurs dans des configurations et des environnements différents. Les mesures expérimentales de déformation présentées sont réalisées avec un système Brillouin-OTDA appartenant à Cementys, mais une version Brillouin-OTDR donnerait des résultats très similaires en raison de leur performance, sensiblement égale, comme démontré dans le chapitre précédent.

II.A Introduction

Des modèles mécaniques avancés sont nécessaires pour définir l'ensemble des paramètres de conception concernant le dimensionnement de chacun des éléments d'une structure et les matériaux adéquats. Aujourd'hui et depuis longtemps, ces modèles sont fiables et permettent de construire des infrastructures, toujours plus grandes et complexes, tout en respectant les normes de qualités et d'environnement [123].

Cependant, il est très difficile de prévoir tous les événements, comme les catastrophes naturelles, pouvant fragiliser l'infrastructure, la rendant ainsi moins performante ou moins fiable [124, 125]. De plus, sa conception est toujours soumise à une problématique financière qui, parfois, limite la qualité de construction ou des matériaux utilisés. C'est pourquoi l'emploi d'un système de surveillance permet, dans un premier temps, de valider les modèles de construction et, dans un second temps, de les garantir, notamment en cas d'utilisations ou d'événements non prévus initialement.

De plus, au cours du temps, les matériaux fatiguent et vieillissent à cause des sollicitations extérieures et répétitives à court terme (oscillations mécaniques dues à la houle dans les milieux Offshore par exemple) ou long terme (effets saisonniers par exemple). La fatigue et l'endommagement se caractérisent par le changement de réponse mécanique d'un matériau au cours du temps ; l'endommagement par fissuration, par exemple, diminue la raideur des éléments structurels. Des études en laboratoire, mesurant le nombre maximum de cycle qu'ils peuvent subir tout en gardant une réponse mécanique conforme, permettent de déterminer la durée de vie de la structure.

Plus particulièrement, les acteurs du domaine du transport d'énergie cherchent à assurer une meilleure rentabilité de leur infrastructure le plus longtemps possible (généralement au-delà de 25 ans). La conception et le développement rigoureux des moyens d'acheminement du pétrole ou du gaz (canalisations sous-marines et terrestres) permettent une utilisation de ces structures sur plusieurs dizaines d'années. Cependant, celles-ci sont et resteront toujours soumises à de fortes contraintes (mécanique, chimique et environnementale). Etant donné la difficulté de contrôler régulièrement l'état de fatigue et de santé de telles structures, la mise en place d'une instrumentation adaptée, dès sa construction, fournit des informations pertinentes sur leurs performances et défauts ainsi que sur leurs limites de fonctionnement (taux de déformation, analyses vibratoires et acoustiques, températures de fonctionnement, plastification ou ruptures des matériaux, etc.). Par ailleurs, les phases de maintenance sont optimisées, limitant ainsi que la maintenance réactive au profit d'une maintenance conditionnelle [126].

II.B Mesure statique de déplacement par Brillouin-OTDA

II.B.1 Méthodologies expérimentale et théorique utilisées dans cette section

L'objectif est de montrer, à partir d'une mesure Brillouin répartie par fibre optique collée sur un tube, comment nous pouvons déduire la courbe de déplacement $y(z)$, avec z représentant la distance longitudinale, quand il est supporté entre deux appuis et chargé par des poids. Les différentes étapes sont les suivantes :

- Avec un système commercial de type Brillouin-OTDA, le décalage de la fréquence Brillouin en fonction de la distance $\Delta\nu_B(z)$ est mesuré. Deux expérimentations sont menées sur deux tubes identiques, instrumentés par des fibres optiques collées dans des configurations différentes : **disposition longitudinale** et **disposition hélicoïdale**. Les tubes sont fléchis par une méthode flexion nommée **flexion 4 points**, pour différentes charges (poids compris entre 30 kg et 150 kg).
- $\Delta\nu_B(z)$ étant proportionnel à la déformation, les déformations relatives réparties $\Delta\varepsilon_{exp}(z)$ sont calculées. Les effets de la température sont négligés dans notre expérience.

- Enfin, grâce à un modèle mécanique approprié, la courbe de déplacement $y_{exp}(z)$ est calculée à partir des résultats de déformation $\Delta\varepsilon_{exp}(z)$. La flèche à mi-longueur et le rayon de courbure $R_c(z)$ en tout point du tube sont déduits de ces résultats.

Afin de valider ces résultats expérimentaux, un modèle mécanique éprouvé est utilisé ; il prédit, sous certaines hypothèses, la courbe de flexion théorique $y_{th}(z)$ du tube à partir de ses caractéristiques physiques. Le raisonnement est le suivant :

- A partir de la connaissance du poids et des dimensions du tube, ainsi que des positions d'application des charges, les moments de flexion $M(z)$ sont calculés théoriquement en tout point ; ils correspondent à la manière dont le tube est fléchi. La démarche de calcul est donnée en annexe A.
- Ces moments sont utilisés ensuite pour déterminer les déformations théoriques $\varepsilon_{th}(z)$ subies par le tube et de les comparer aux mesures Brillouin. Par le même raisonnement que pour la mesure Brillouin, il est possible de déduire la courbe de déplacement théorique $y_{th}(z)$. Le détail des calculs est donné en annexe B et C.

II.B.2 Instrumentation d'une structure linéaire : détermination de la déformation

II.B.2.1 Présentation de l'expérience mise en place

Dans le cadre de cette démarche de suivi de l'intégrité d'une structure, j'ai mis en place deux moyens d'essai pour la mesure de déplacement de tube soumis à des chargements. Cette instrumentation consiste en deux tubes indépendants et identiques, d'une longueur de 12,5 m et d'un diamètre externe de 88,9 mm, sur lesquels un système de trois câbles à fibres optiques a été collé.

- Sur le premier tube (tube A - Figure II.1 gauche), les câbles sont collés de manière longitudinale (trois câbles à 120°).
- Sur le second (tube B - Figure II.1 droite), les câbles sont disposés en hélice.

Les détails et les particularités de mise en œuvre et d'interprétation de ces deux modèles d'instrumentation par capteur réparti à fibres optiques basé sur l'effet Brillouin, sont donnés dans les sections suivantes.

Par application d'une ou plusieurs charges, le tube sera mis en flexion et, grâce à un modèle mécanique adapté, l'amplitude de celle-ci ainsi que les effets sur la structure seront calculés théoriquement (par simulation) et seront comparés aux résultats de mesure expérimentale. Par ailleurs, un capteur industriel de distance laser, placé à mi longueur du tube (mesure de flèche), validera nos résultats de déplacement.

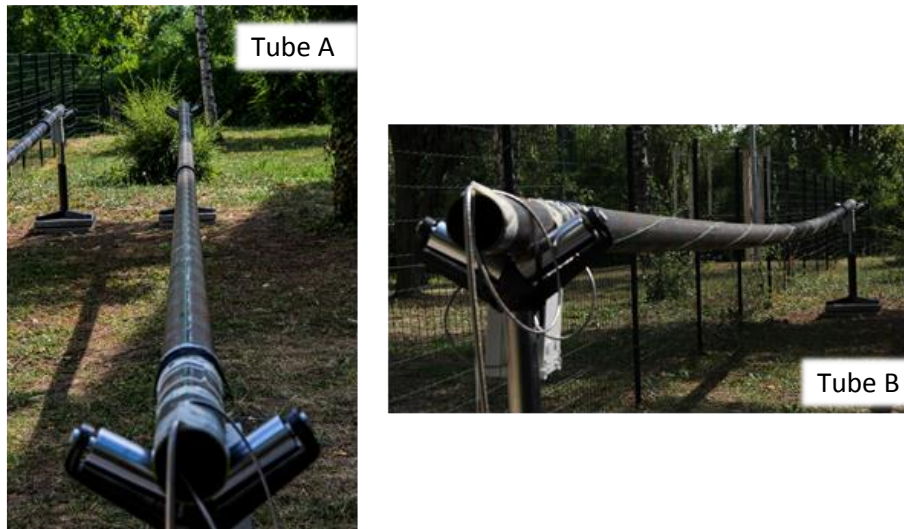


Figure II.1 Photos des tubes mis en place pour la mesure répartie de déformations sur des structures linéaires. Tube A : disposition longitudinale ; Tube B : disposition en hélice.

Le modèle mécanique utilisé tient compte des caractéristiques de l'acier et des moyens d'application des charges. Les principales caractéristiques des deux tubes en acier sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	Variables	Unités	Valeurs
Type d'acier :	-	-	NFEN10305-1 E235+C
Diamètre extérieur	D_o	mm	$88,9 \pm 0,5$ mm
Rayon interne	R_i	mm	$41,25 \pm 0,7$ mm
Epaisseur	e	mm	$3,2 \pm 0,2$ mm
Densité de l'acier	P	kg/m ³	7850
Module d'Young	E	N/mm ²	210 000
Module d'inertie	I_z	mm ⁴	792060
Coefficient de Poisson	V	-	0.30
Longueur du tube	L	mm	12540
Poids propre du tube en fonction de R, r, L, ρ	P_p	kg	84,81
Poids linéaire du tube	q	kg/ml	6,76

Table Annexe.1 Principales caractéristiques des tubes en acier utilisés.

Les câbles à fibres optiques collés, dont le nom commercial est **Sensolux TM®** (voir Figure II.2), sont spécialement conçus par Cementys pour la mesure de déformation. Ils ont été étudiés pour, à la fois protéger les fibres optiques et, transmettre les déformations subies par les structures jusqu'au cœur de la fibre optique [11]. La structure du câble est dite « serrée » (voir chapitre 1). Une coupe simplifiée de ce câble est présentée à la Figure II.2. Le câble contient quatre fibres optiques :

- Deux fibres optiques mono-modes, Fujikura 9/125 μm , de type G.652,
- Deux fibres optiques multi-modes, Fujikura 50/125 μm , de type G.651.

En plus de ses capacités en tant que capteur à fibre optique, elles peuvent être utilisées pour le transfert d'informations malgré son atténuation d'environ 0.3 dB/km légèrement supérieure aux caractéristiques habituelles des fibres monomodes utilisées dans les télécommunications en raison de la structure serrée du câble.



Figure II.2 Photo et coupe transversale du câble à fibres optiques *Sensolux TM®* de la société Cementys. Sa conception lui permet de réaliser des mesures de déformation et de température.

II.B.2.1.1 Configuration de l'instrumentation mise en place

Dans le but d'étudier leur courbure, nous allons mesurer expérimentalement, avec un interrogateur Brillouin-OTDA commercial, les déformations subies par les deux tubes en acier sous leur poids propre et lors d'application de charges. Ce paragraphe présente les deux configurations de pose de la fibre optique sur ces tubes, pour la mesure répartie de déformation et de déplacement.

La configuration de collage des fibres optiques est importante ; elle doit permettre de détecter des déformations dans toutes directions et amplitudes de flexion. Lors d'une simple flexion, il existe un plan où les déformations seront nulles : il s'agit du plan normal à la direction de flexion. Il est donc nécessaire de disposer les fibres optiques en dehors de celui-ci. De même, il existe un plan où les déformations sont maximales, à savoir le plan de la direction de flexion. Afin de minimiser les erreurs de mesure dues au seuil de détection de l'instrument utilisé, les fibres optiques devraient idéalement être placées sur ce dernier plan.

Pour un tube à section circulaire (Figure II.3), lorsqu'une fibre n'est pas dans le plan de flexion, une relation cosinusoidale relie la déformation subie ε avec la déformation maximale ε_{max} en fonction de l'angle θ :

$$\varepsilon = \cos(\theta) \cdot \varepsilon_{max} \quad \text{II.1}$$

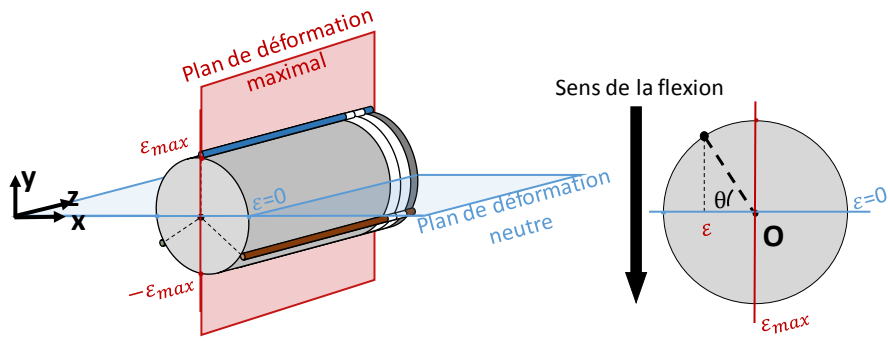


Figure II.3 Schémas pour les plans de déformation maximale et neutre

II.B.2.1.2 Pose en configuration longitudinale

La première implémentation possible sera appelée « fibres optiques longitudinales ». Le schéma suivant montre la position des fibres optiques sur un cylindre de rayon r :

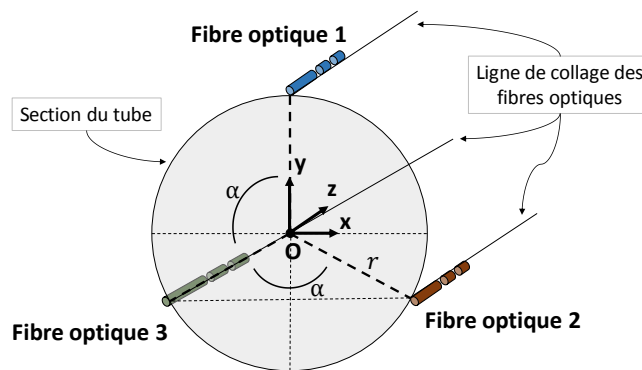


Figure II.4 Disposition longitudinale des fibres optiques à 120° autour du tube permettant la mesure des déformations et déplacements dans les trois dimensions X, Y et Z ($\alpha = 120^\circ$).

D'après la Figure II.3, au moins deux fibres optiques sont en dehors du plan de déformation neutre, quelle que soit la direction de la flexion. Sur la Figure II.4 par exemple, pour une flexion dans le plan XZ, la fibre optique 1 ne subira aucune déformation et les fibres optiques 2 et 3 subiront une déformation absolue de $\sin(\alpha) \cdot \varepsilon_{max}$.

Dans nos expérimentations en laboratoire et projets d'instrumentations, l'orientation sera définie de manière à ce que l'une des trois fibres optiques soit sur la ligne supérieure du tube lors d'une flexion verticale (soit dans le plan YZ sur la Figure II.3) : elle sera repérée à 00h et appelée ligne 1. Les deux autres fibres seront à 4h et 8h et respectivement appelée ligne 2 et ligne 3.

II.B.2.1.3 Pose en configuration hélicoïdale

Une option de substitution à la disposition droite de trois fibres optiques est l'hélice. Cette configuration a un avantage : elle ne nécessite qu'une seule et unique fibre optique. Toutefois, dans l'objectif d'avoir une redondance, trois câbles seront disposés autour du tube avec une phase relative de 120°. La longueur L_{spire} d'une spire et l'angle de l'hélice γ_0 sont définis en fonction du pas p , par les deux relations suivantes :

$$L_{spire} = 2\pi * \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2}$$

$$\gamma_0 = \tan^{-1}\left(\frac{2 * \pi * r_0}{p}\right)$$

II.2

Dans cette configuration, lors d'une flexion simple, la fibre optique subit une déformation dont la forme est une sinusoïde, étant donné la ligne de déformation suivie, alternativement au-dessus et en dessous du tube, par rapport au plan de flexion comme illustré à la Figure II.5.

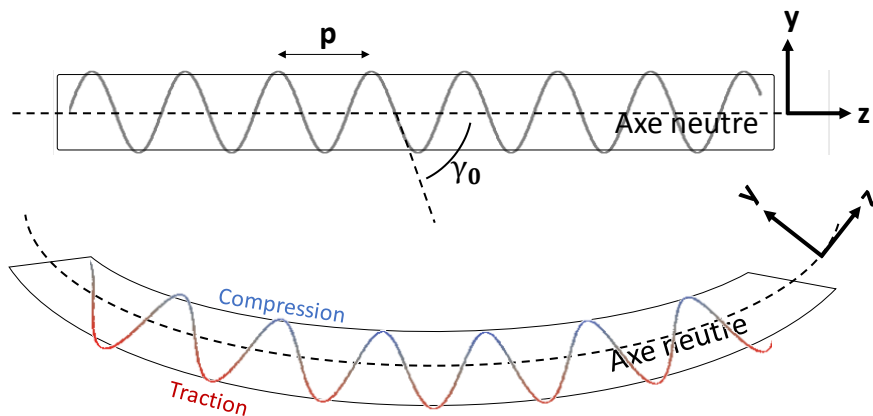


Figure II.5 Schémas pour la flexion d'une poutre avec une disposition des fibres optiques en hélice.

Dans la configuration des fibres optiques longitudinales, l'étude du signe des déformations permet d'identifier le sens de la flexion. Pour la configuration en hélice, ce n'est plus le cas. Comme illustrée à la Figure II.6, l'étude de la phase de la courbe sinusoïdale est nécessaire. Pour un déphasage spatial de Φ selon l'abscisse curviligne, le changement de direction de flexion, donné par l'angle α de la Figure II.6, a pour expression :

$$\alpha = 2\pi \frac{\Phi}{p}$$

II.3

Pour la mesure de déformation et de déplacement dans toutes les directions, dans une configuration en hélice, un seul câble à fibre optique est suffisant ; contrairement à la disposition longitudinale où trois câbles sont nécessaires. Le pas p de l'hélice choisi est de 3 m ; les valeurs de L_{spire} et γ_0 sont, respectivement, de 3.013 m et de 5.3 °.

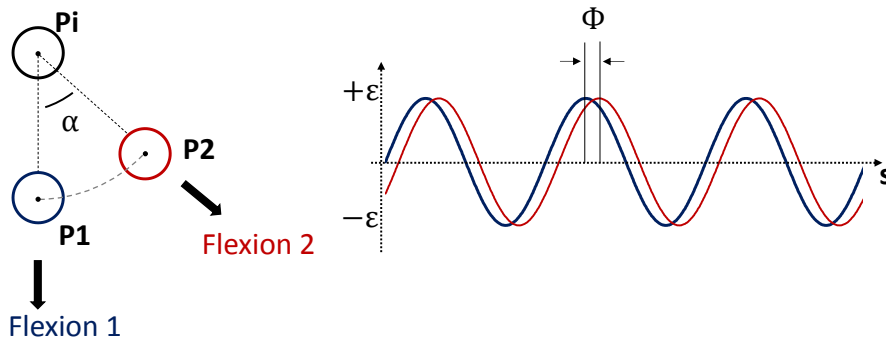


Figure II.6 Schéma explicatif de la variation de phase des mesures de déformation en cas de changement du plan de flexion pour la disposition en hélice. P_i est la position initiale et P_1 et P_2 les positions après flexions.

Le choix de la configuration en hélice dépend aussi du projet ; elle convient bien pour des canalisations longues où les rayons de courbure attendus sont grands vis-à-vis du pas de l'hélice. Ainsi, plusieurs spires de fibres optiques voient la même caractéristique de déformation, soit une courbe sinusoïdale d'amplitude et de phase constante.

Par ailleurs, cette configuration est adaptée lorsque la fibre optique est installée lors de la fabrication des tubes en usine, en raison des moyens et outils de manutention disponibles. Lors d'une installation directe en tranchée, la configuration longitudinale est souvent privilégiée.

II.B.2.2 Etude de la flexion d'une poutre sous différentes charges

II.B.2.2.1 Théorie de la flexion d'une poutre : déformations et rayon de courbure

La compréhension de ce chapitre nécessite une introduction à plusieurs outils mécaniques. Dans cette section, nous définissons certains termes usuellement employés en mécanique et résistance des matériaux ainsi que les relations qui les unissent. Les raisonnements mécaniques développés dans ce document nécessitent la définition de quatre hypothèses classiques de la résistance des matériaux issues de la théorie d'Euler-Bernoulli [127, 128] :

- 1- **La section de la poutre reste plane** (pas de gauchissement),
- 2- **La section de la poutre reste perpendiculaire à l'axe neutre** (pas de cisaillement),
- 3- **Les déformations sont petites** (le matériau reste dans sa zone de déformation linéaire et élastique),
- 4- **Les déplacements sont petits** (les directions et sens des forces s'appliquant sur le système restent identiques).

La **déformation** ε , exprimée généralement en $\mu\text{m}/\text{m}$ ou en %, est l'allongement ΔL relatif d'un élément unidimensionnel dont la longueur initiale est L_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{II.4}$$

Cette déformation ε est aussi définie en fonction d'une force P appliquée sur une surface A et dépendant du tenseur des constantes élastiques du matériau E , appelé aussi Module de Young :

$$\varepsilon = \frac{PL_0}{AE} \quad \text{II.5}$$

Cette équation est appelée la **loi de Hooke** et est valable pour de petites déformations.

Les **contraintes** σ , exprimées en Pa, représentent les forces sur chaque élément de surface du matériau et sont définies de manière simplifiée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{II.6}$$

Il existe différents types de contraintes, illustrées à la Figure II.7, permettant de définir un tenseur de contrainte dans le matériau : les **contraintes de cisaillement**, s'appliquant de manière parallèle ou tangentielle à une surface, et les **contraintes normales**, s'appliquant de manière normale à la surface.

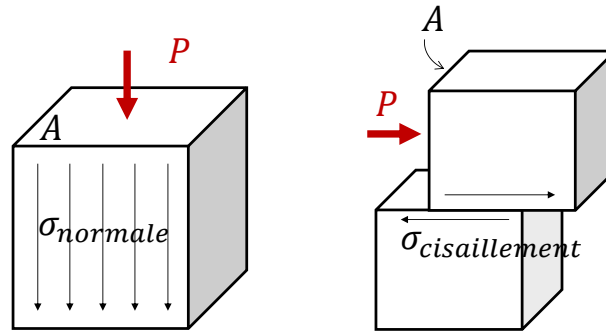


Figure II.7 Définition des contraintes de cisaillement et normale, en fonction d'une force P appliquée sur une surface A .

Ces deux dernières équations induisent la proportionnalité entre les déformations et les contraintes comme illustré à Figure II.8 jusqu'à un seuil, appelé **limite élastique** [129] :

$$\sigma = E\varepsilon$$

II.7

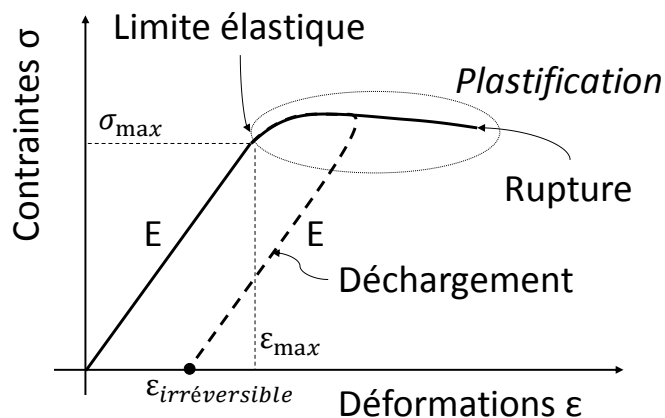


Figure II.8 La relation entre déformation et contrainte est linéaire jusqu'à un certain seuil ; au-delà, le matériau continue à se déformer mais ne reviendra pas à sa forme initiale à la fin de la sollicitation mécanique.

Dans le cas du dépassement de la limite élastique du matériau ($\varepsilon > \varepsilon_{max}$), sa microstructure interne est modifiée suite aux contraintes internes trop importantes. Ce phénomène s'appelle soit la **plastification** – pour les métaux – ou **l'endommagement** – pour les céramiques et composites ; il s'agit d'une transformation irréversible. La connaissance de cette limite pour les industriels est nécessaire lors de la manipulation de leur structure, en particulier lors des phases de construction ou de maintenance, afin de ne jamais la dépasser.

L'application d'une **force P**, sur un élément unitaire d'une structure aura pour conséquence de le **déformer**. L'ensemble des déformations engendrera un **déplacement D** global de la structure. Le **moment**

de flexion M (exprimé en N.m) représente la tendance de la structure à se fléchir sous l'action de cette force ; cette flexion donne à la structure un **rayon de courbure** R_c . Ces termes sont illustrés à la Figure II.9.

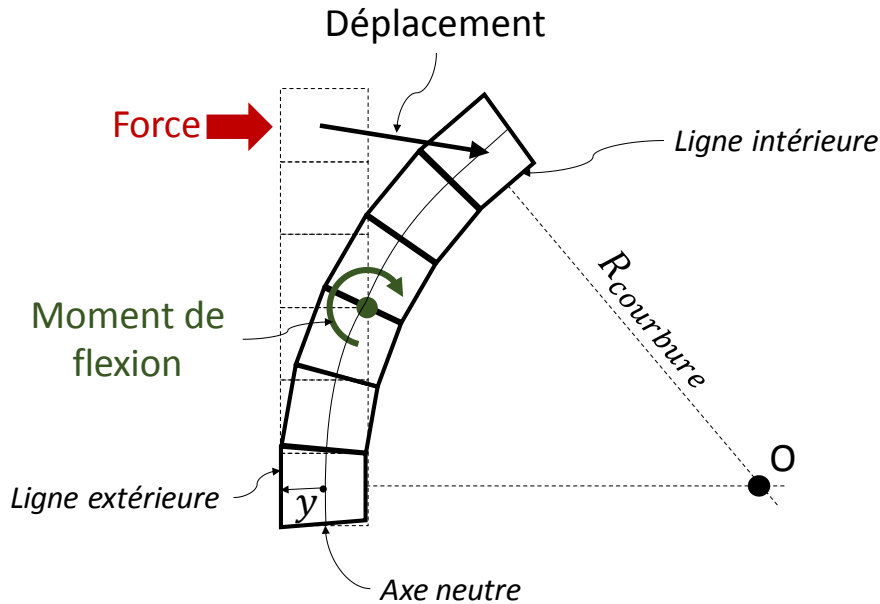


Figure II.9 Schéma montrant l'influence de la déformation de chaque élément sur le déplacement de la structure

Dans l'hypothèse où les contraintes de cisaillement sont nulles, c'est-à-dire que l'axe neutre ne change pas de longueur lors d'une flexion et que les lignes intérieure et extérieure de la structure subissent une déformation de même amplitude mais de signe différent, la flexion est appelée **flexion pure** ou **flexion circulaire**.

Le rayon de courbure R_c et les courbes de déplacements $d_{x,y,z}(z)$ sont déterminés par l'analyse mécanique d'un élément unitaire de la structure, ainsi que l'ensemble de la structure, lorsque le tube est soumis à une force extérieure. Ils sont définis par les équations suivantes :

$$R_c(z) = \frac{2r}{\varepsilon_{haut}(z) + \varepsilon_{bas}(z)} \quad \text{II.8 a}$$

$$d_{x,y,z}(z) = \iint_0^z \frac{1}{R_c\{X; Y; Z\}} dl \quad \text{II.8 b}$$

avec ε_{bas} et ε_{haut} les déformations des lignes inférieure et supérieure, r le rayon du tube et l la distance longitudinale du tube.

La fonction $d_{x,y,z}(z)$ définit trois courbes de déplacement : $x(z)$, $y(z)$ selon les axes X et Y (transverses à l'axe du tube) et $d_z(z)$ correspondant à d'allongement (ou à la contraction) selon l'axe Z . D'après les hypothèses émises en début de section, l'amplitude de cette dernière sera faible et considérée comme négligeable lors des expérimentations.

La relation linéaire entre les déformations ε et les moments de flexion M permettant aux lecteurs d'appréhender l'intérêt du type de flexion que l'on imposera aux tubes instrumentés et est définie par :

$$M = -\frac{EI_z}{r} \varepsilon_{\max} \quad \text{II.8 c}$$

avec E la constante d'élasticité du matériau, I_z le module d'inertie égale à $7,9 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$ pour un tube de diamètre extérieur et intérieur de 88,9 mm et 82,5 mm.

La démonstration de ces dernières équations est donnée en annexe B de ce manuscrit. Elles sont démontrées, avec la théorie des poutres d'Euler Bernoulli et Timoshenko. Nous détaillons par la suite comment définir la courbe de déplacement $y_{exp}(z)$ à partir des données de déformations expérimentales obtenues par l'analyse Brillouin des fibres optiques.

II.B.2.2.2 Méthode de flexion 4 points et étude des moments de flexion

Considérons une poutre de section quelconque et de longueur L . La Figure II.10 montre une méthode usuelle pour imposer une flexion à une poutre appelée **la flexion 4 points**. Les deux charges sont appliquées à une même distance de chaque support (dans notre cas, $L/6 = 2 \text{ m}$). Tous les points d'applications sont considérés comme ponctuels.

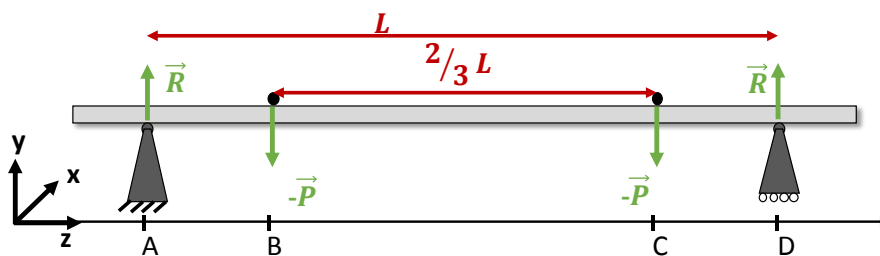


Figure II.10 Schéma de principe pour les flexions 4 points d'une poutre et repère utilisé pour l'orientation des forces et des déplacements. R représente la réaction des appuis et P la force de chacune des deux charges.

Le **repère mécanique** adopté est celui présenté sur la Figure II.10 ci-dessus:

- L'axe Z correspond à la direction de la poutre considérée ; il est orienté dans le sens croissant de la longueur - l'origine étant prise au point A, support situé à gauche sur le schéma.
- L'axe Y est utilisé pour orienter les contraintes et déplacements verticaux de la structure. Les forces de chaque point d'appui sont dans le plan YZ.
- L'axe X est utilisé pour orienter les contraintes et déplacements horizontaux. Dans notre modèle et nos expérimentations, l'hypothèse qu'aucun effort ne s'applique dans le plan XY est faite.

L'étude de toute flexion d'une poutre se fait par l'analyse indépendante de chacune des charges s'appliquant sur celle-ci. Dans le cadre de nos essais, deux charges sont définies :

- Le **pooids propre** de la poutre : il est représenté par une **force q** uniformément répartie le long du tube et dépendante de la masse de la structure.
- Les **forces F** que l'on appliquera afin de lui imposer une flexion : elles sont définies par $F = mg$ où m est une masse et g la constante gravitationnelle.

A un instant donné, plusieurs forces F peuvent s'appliquer sur une structure mécanique. Tant que le matériau reste dans sa zone de déformation élastique et linéaire, le principe de superposition peut être utilisé. **L'étude de sa flexion peut se faire en ne considérant que l'une d'entre elles, tout en en supposant les autres forces constantes.** L'état final du système correspond alors à la somme de chacune d'entre elles. Ce principe est utilisé pour étudier indépendamment l'effet du poids propre (sans autre charge) et l'effet des charges en flexion 4 points (sous son poids propre).

La théorie des poutres (Timoshenko [127]) donne le calcul du diagramme des moments de flexion $M(z)$, pour chacune des deux forces précédemment citées. Nous donnons dans cette section, les principaux résultats et leurs interprétations. Le détail des calculs est présenté en annexe A.

Le diagramme de la Figure II.11 a) permet de conclure que les déformations sont maximales au centre du tube sur les fibres inférieure et supérieure. A partir du diagramme de la Figure II.11 b), nous en déduisons le principal intérêt de la flexion 4 points : entre les points d'applications C et D, les moments de flexion sont constants et non nuls et les déformations longitudinales subies par la structure y sont donc constantes également (voir annexe B) – leur simulation est donnée dans la prochaine section en même temps que les déformations expérimentales).

Les moments de flexion étant constants entre les charges, la flexion est circulaire. La courbure prise par la structure représente **un cercle** entre ces charges.

Le calcul théorique des flexions, pour le dimensionnement des structures, nécessite la sommation des réactions liées au poids propre et aux charges appliquées. Pour notre moyen d'essai consistant en deux tubes en acier supporté en appui simple, **nos mesures expérimentales de déformation par effet Brillouin seront toujours référencées par rapport à l'état d'équilibre des tubes sous leur poids propre uniquement.**

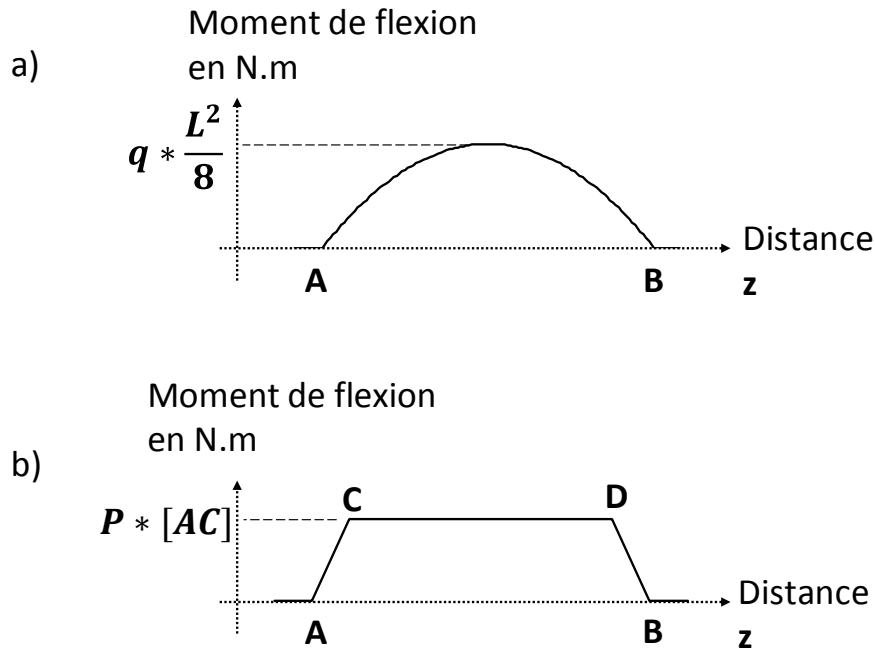


Figure II.11 Représentation graphique des courbes des moments de flexion $M(z)$ pour deux sollicitations : a) tube sous son poids propre et b) tube en flexion 4 points. A et B sont les points d'appuis ; C et D sont les points d'applications des charges ; P est la force exercée par chacune des charges ; L et q sont, respectivement, la longueur du tube et son poids linéique.

II.B.2.3 Mesures expérimentales de la déformation d'une poutre

Nous venons de voir, d'après la théorie des poutres, que les courbes des moments de flexion $M(z)$ et de déformations $\varepsilon_{th}(z)$, agissant sur une poutre en appui simple pour la flexion 4 points, sont proportionnelles. Dans cette section, nous présentons les mesures expérimentales de déformation $\varepsilon_{exp}(z)$ subie par les tubes instrumentés par fibre optique, lors de l'application de charges. Elles sont comparées aux résultats de simulation.

Les câbles à fibres optiques ont été collés manuellement, générant ainsi une variation de contrainte initiale aléatoire sur toutes les fibres optiques. Les expériences qui suivent nécessitent deux approximations :

- Les mesures sont prises dans un intervalle de temps court (inférieur à quelques minutes). Nous considérerons alors que **la température est constante**. En effet, sur des temps de mesure plus longs, en raison de l'ensoleillement ou du vent sur les tubes en acier noir et de la

sensibilité de l'effet Brillouin à la température, d'importantes erreurs de mesure pourraient apparaître.

- En raison du collage manuel, sur une faible distance, il est admis que **les écarts de position sont négligeables** dans nos mesures, notamment le respect de la disposition longitudinale et des trois fibres à 120° . Nous validerons, par la suite, que les erreurs engendrées par des faibles écarts de collage sont négligeables pour des tubes de diamètre de 10 cm et plus.

Le protocole de mesure est le suivant :

- 1- Mise en place et paramétrage des systèmes d'acquisition :
 - a. Interrogateur industriel Brillouin de type Brillouin-OTDA (étudié au chapitre 1).
 - b. Capteur de distance laser placé à mi-longueur de la poutre.
- 2- Enregistrement de la **mesure de référence** avec le système Brillouin avec la poutre sous son poids propre.
- 3- Ajout de différents poids sur le tube pour lui imposer une flexion 4 points puis prise de mesure avec le système Brillouin.
- 4- Traitement des données et validation de nos mesures par rapport au modèle mécanique.

La Figure II.12 présente les deux exemples de résultats obtenus pour la mesure répartie de décalage de fréquence Brillouin sur nos deux tubes instrumentés, pour les configurations longitudinale (Figure II.12a) et en hélice (Figure II.12b). Pour chaque tube instrumenté, une seule fibre optique, sans épissure, est utilisée pour réaliser chacune des trois lignes de mesure (i.e. la ligne 2 parcourt le tube en sens inverse comparé aux lignes 1 et 3). Les courbes en pointillés correspondent à l'état initial des tubes (poids propre) et les courbes pleines donnent la réponse Brillouin de la ligne optique lorsque le tube est chargé avec 150 kg (soit 75 kg à chacun des deux points d'application).

L'observation des courbes ci-dessous permet d'identifier différentes zones caractéristiques sur la ligne optique. Les portions de fibres non collées sur le tube gardent la même réponse Brillouin (de 0 à 42m pour la configuration en hélice par exemple) alors que les zones correspondantes aux tubes voient une nette variation de la fréquence de décalage Brillouin (entre 80 m et 130 m pour la configuration longitudinale et entre 43 m et 86 m pour la configuration en hélice).

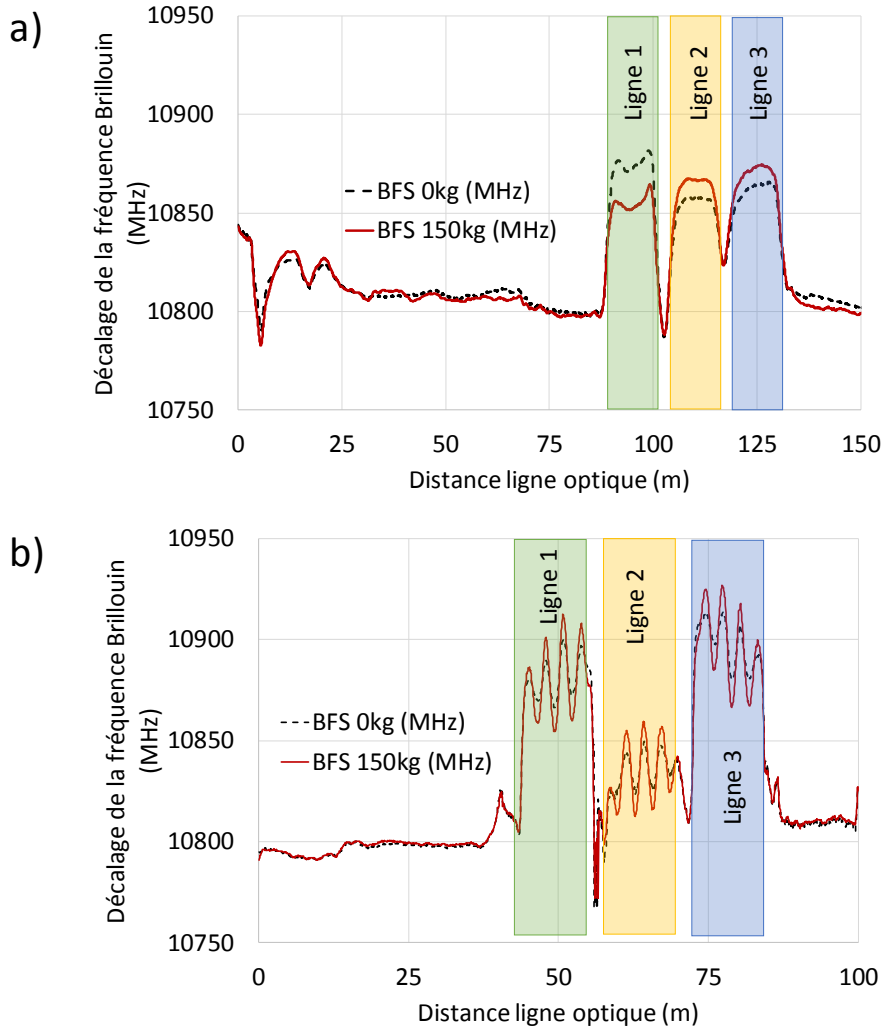


Figure II.12 Fréquence de décalage Brillouin (Brillouin Frequency Shift BFS) pour deux charges différentes du tube (poids propre et charges de $2 \times 75 \text{ Kg}$) pour une flexion 4 points. a) : configuration longitudinale ; b) : configuration hélice.

La Figure II.13 montre les mêmes résultats présentés à la Figure II.12 mais après conversion du décalage de fréquence Brillouin en déformation avec l'application du coefficient de conversion $C_\varepsilon = 20 \mu\varepsilon / \text{MHz}$ (voir chapitre 1). Chacune des trois zones précédemment identifiées sont aussi superposées et ajustées, de manière à ce que l'axe des abscisses représente la longueur du tube.

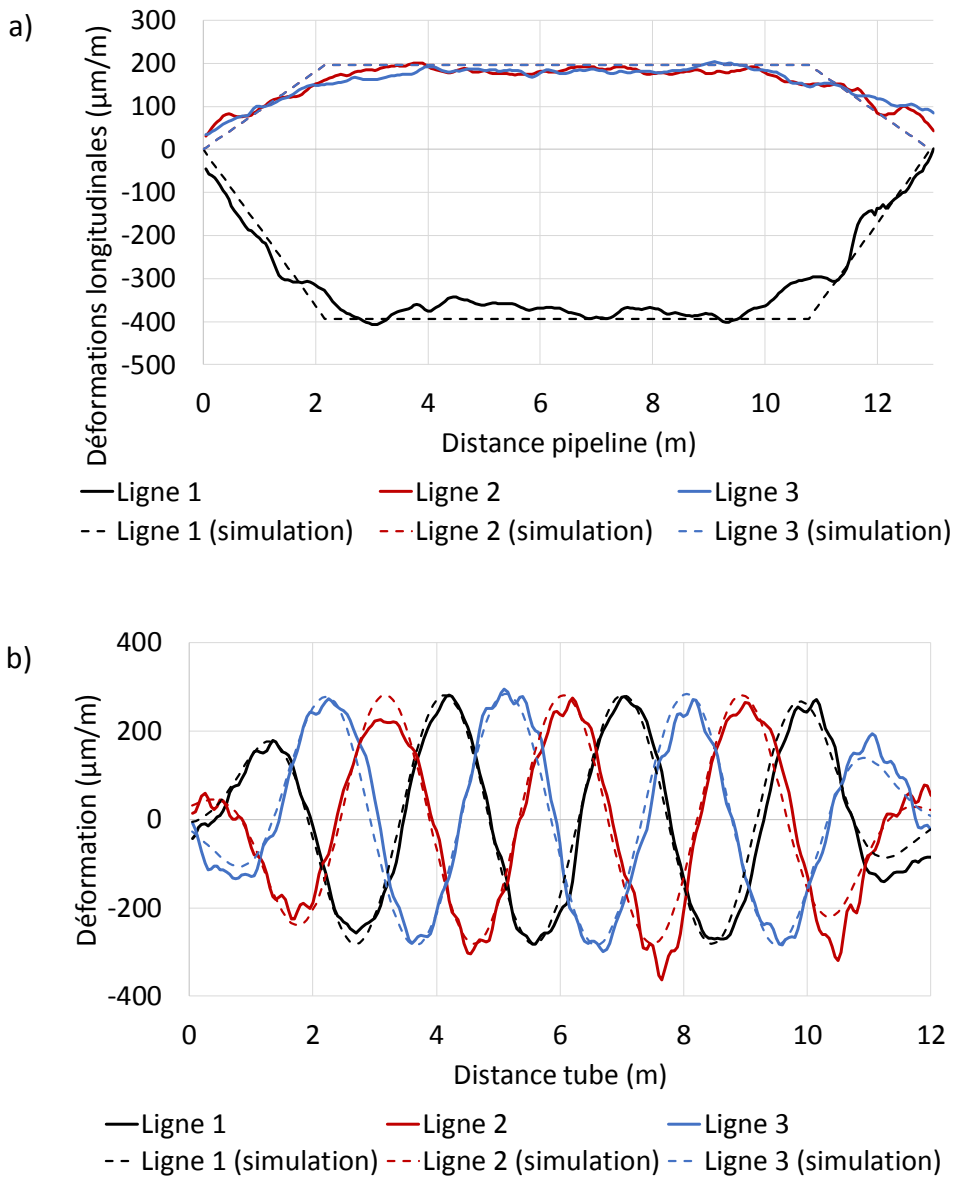


Figure II.13 Courbes de déformation mesurées pour les trois fibres optiques avec une charge de 2x75kg ; a) longitudinale et b) : hélice

Ces courbes de déformation sont typiques d'une flexion 4 points. Je rappelle qu'entre les points d'applications, les moments de flexion sont constants et, par conséquent, les déformations aussi (voir section II.B.2.2.1). Entre les supports et les points d'applications, les déformations suivent une évolution linéaire.

D'après la Figure II.13a, les valeurs absolues des déformations de la ligne 1 sont environ égales au double de celle des lignes 2 ou 3. Cela est dû à la disposition à 120° des fibres optiques sur le tube ; les lignes 2 et 3 ne sont pas sur le plan de déformation maximale contrairement à la ligne 1 (voir paragraphe

II.B.2.1.2). De plus, les résultats de simulation sur la Figure II.13a correspondant bien à la mesure expérimentale. Entre les points d'appuis et les points d'application des charges, les déformations sont croissantes et constantes.

Pour la configuration en hélice, les maxima et minima de déformation expérimentale sur le tube sont égaux en valeur absolue et ces extrema ont la même valeur (entre 2 m et 10 m). Les courbes de simulation (Figure II.12b – en pointillé) sont en accord avec les résultats expérimentaux en termes de fréquence d'oscillation et de phase. Cependant, lors de nos premières comparaisons, une différence importante apparaissait en raison de la résolution spatiale de l'instrument, paramétrée sur 0.5 m ; cette valeur n'est pas négligeable devant le pas de l'hélice égal à 3 m. Depuis, un traitement numérique a été ajouté sur les résultats de simulation ; ceux-ci sont obtenus par la convolution entre une fonction sinusoïdale, dont l'amplitude le long du tube suit la courbe de déformation locale maximale du tube (i.e. les déformations de la ligne 1 d'une configuration longitudinale par exemple), et une fonction rectangle de largeur 1,2 m. De cette manière, les écarts de mesure entre expérience et simulation sont réduits à $30 \mu\text{m}/\text{m}$ (en comparaison avec les $100 \mu\text{m}/\text{m}$ sans correction). Ce traitement montre que la configuration en hélice est limitée par la résolution du système de mesure par effet Brillouin, une résolution trop faible par rapport au pas de l'hélice entraîne une erreur sur la mesure des déformations ; elle doit être au minimum égale à la moitié du pas de l'hélice. Dans les cas industriels, les pas d'hélices seront toujours beaucoup plus grands (supérieurs à 10 m).

Malgré la configuration de l'interrogateur sur une résolution spatiale de 0.5 m, cela confirme la limite fondamentale de la résolution spatiale d'un système de mesure Brillouin dans le domaine temporel (Brillouin-OTDA et Brillouin-OTDR) en raison du temps de décroissance de 10 ns (soit 1 m) des ondes acoustiques dans la fibre optique. D'après les travaux de doctorat de E. Buchoud [130] (2014), une méthode de traitement, pouvant être implémentée a posteriori sur toute mesure Brillouin, permet d'améliorer d'un facteur 10 la résolution spatiale de ces systèmes. Celle-ci se fait par l'analyse de la distorsion du spectre de gain Brillouin due aux variations rapides de déformation.

La Figure II.14 représente les maxima théoriques (simulation) et expérimentaux de déformation, pour une série de mesures en augmentant la charge sur le tube entre 0 Kg et 150 Kg, avec la configuration en fibres longitudinales (un graphique similaire - non présenté - est obtenu pour la configuration en hélice). La linéarité des courbes pour chaque ligne confirme la proportionnalité des variables de déformation et de contraintes définies au paragraphe II.B.2.2.1. Elle prouve que notre étude se limite à la zone élastique du matériau.

La simulation du comportement de la poutre permet d'estimer les amplitudes de déformation pour toutes charges appliquées et quelle que soit la méthode de flexion (poids propre ou flexion 4 points). D'après nos simulations pour une flexion 4 points, les amplitudes maximales de déformations subies par le tube vont de $347 \mu\text{m}/\text{m}$ (lorsque le tube est sous son poids propre), à $740 \mu\text{m}/\text{m}$ (lorsque deux

charges de 75 kg chacune sont appliquées aux distances $z = 2\text{ m}$ et à $z = 10\text{ m}$). Pour permettre la comparaison avec les mesures expérimentales (obtenues avec le système Brillouin), l'influence du poids propre a été soustraite des résultats de simulation.

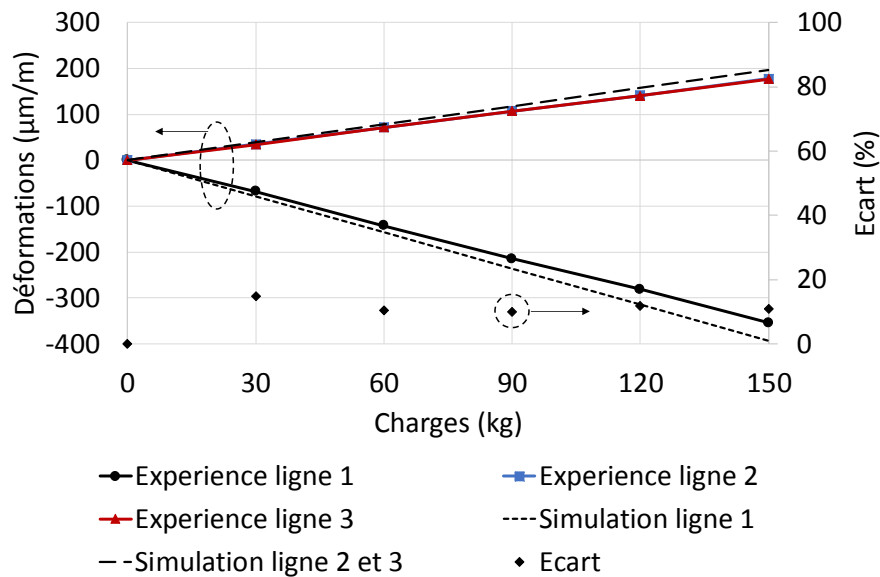


Figure II.14 Déformations maximales mesurées expérimentalement par les trois fibres optiques en fonction de la charge appliquée à la poutre (disposition longitudinale).

La précédente comparaison, entre simulation et expérience, montre que les mesures s'accordent avec le modèle mécanique mis en place au paragraphe II.B.2.2. Un écart de valeur moyenne 11,6 % est tout de même observé sur les fibres disposées longitudinalement. Etant donné la faible incertitude de mesure du système Brillouin utilisé ($\approx 10\text{ }\mu\text{m/m}$) et la faible influence des imprécisions quant à la disposition des fibres optiques, nous pensons que cet écart vient principalement des mouvements et frottements des supports, des incertitudes sur les dimensions physiques du tube (diamètre et épaisseur) et de l'incertitude sur la valeur du coefficient de conversion C_{ε} .

II.B.2.4 Correction des rotations accidentelles

Malgré les précautions prises, le tube peut avoir tendance à tourner sur lui-même lors de l'ajout des charges. Or, en raison de la disposition des fibres optiques sur le tube (longitudinale à 120°) et à la direction des forces appliquées pour le faire fléchir, les valeurs des déformations des lignes 2 et 3 doivent théoriquement être égales car leurs distances par rapport au plan neutre est identique. A partir de cela et par analyse géométrique du système, il est possible de retrouver l'angle de rotation et de corriger en conséquence les valeurs de chaque ligne. La rotation du tube a déjà été corrigée sur la Figure II.14.

Sur nos mesures expérimentales, la plus forte rotation observée est de 6.0° pour une charge de 90 kg, et engendre une variation d'environ $17\text{ }\mu\text{m/m}$ sur les valeurs de déformation des lignes 2 et 3. Ces rotations ont une influence plus importante sur les lignes 2 et 3 en raison de leur proximité au plan neutre

de déformation, comme illustré à la Figure II.15. Pour une rotation de $\delta = +20^\circ$ par exemple, la variation de déformation de la ligne 1 est de -6% contre -65% et $+53\%$ pour les lignes 2 et 3. D'un point de vue mathématique, cela est expliqué par le fait que la pente de la courbe sinusoïdale est maximale pour des angles de valeurs faibles.

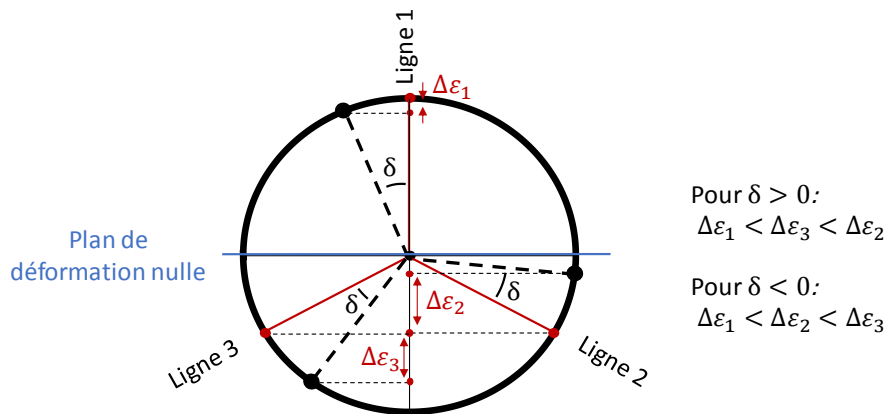


Figure II.15 Schéma pour la rotation du tube et sa correction

Ces rotations n'ont pas la même influence sur la configuration en hélice ; l'erreur obtenue ne concerne pas l'amplitude des déformations mais la détermination du sens de la flexion.

II.B.3 Détermination de la courbe de déplacement $y(z)$

Cette sous-section présente notre démarche pour déterminer et valider la courbe de déplacement expérimentale $y_{exp}(z)$:

- Détermination du modèle mécanique permettant le calcul de la courbe de déplacement $y(z)$ d'un tube à partir des déformations $\varepsilon(z)$.
- **Application et confirmation du modèle** sur nos résultats de déformation théorique $\varepsilon_{th}(z)$ et obtention de $y_{th}(z)$.
- **Application de ce modèle sur nos résultats expérimentaux de déformation $\varepsilon_{exp}(z)$** sur chacune des configurations d'instrumentation et obtention de $y_{exp}(z)$.
- **Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation.**

II.B.3.1 Modèle mécanique pour le calcul du déplacement d'un tube

II.B.3.1.1 Méthode de calcul

Le modèle mécanique, employé pour les simulations, est couramment utilisé pour dimensionner une poutre en fonction de ses appuis et de ses charges, et ainsi prévoir ses déformations et déplacements.

Dans le domaine de l'instrumentation, l'objectif est de mesurer la courbe de flexion de la structure uniquement grâce aux mesures des déformations - tous les événements extérieurs possibles ne pouvant pas être déterminés.

Durant toute sa durée de vie, une structure est soumise à différentes sollicitations, telles que, par exemple, ses déplacements dans les directions transversales (horizontale et verticale), sa compression ou traction dans la direction longitudinale, sa torsion ou son changement de température. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons particulièrement à son déplacement. Lors de nos expérimentations, les variables de torsion et de pression seront considérées comme nulles ou négligeables devant les dimensions de nos tubes. De plus, la température sera considérée comme stable au cours de la mesure et n'aura pas d'influence majeure sur les mesures Brillouin et sur le comportement mécanique de la structure.

D'après la section II.B.2.2.1, la courbe de flexion est reliée au rayon de courbure par une double intégrale et ce même rayon de courbure peut être défini en fonction des déformations subies par les lignes inférieure et supérieure du tube et son diamètre. D'après les équations II.8a et II.8b et la connaissance de la disposition des fibres optiques, le calcul des déplacements du tube dans toutes les directions est possible. De la même manière, les incertitudes de mesure $\delta d_{x,y,z}(z)$ liées aux incertitudes de la mesure répartie de déformation $\delta \varepsilon(z)$ sont définies ; en raison du calcul d'intégration, ces erreurs sont également sommées tout au long du tube :

$$d_{\text{erreur}}(z) = \iint_0^z \frac{1}{\delta R_c} dl \quad \text{II.9}$$

II.B.3.1.2 Adaptation pour une instrumentation par fibre optique longitudinale

La variable d'intégration sera l , représentant la longueur du tube. Le système de deux équations ci-dessous définissent les déplacements selon les directions transversales (horizontale et verticale) en fonction de la position z :

$$\begin{aligned} x(z) &= \iint_0^z \frac{\varepsilon_3(l) - \varepsilon_2(l)}{r * \sqrt{3}} dl \\ y(z) &= \iint_0^z \frac{\varepsilon_1(l) - \frac{\varepsilon_2(l) + \varepsilon_3(l)}{2}}{1.5r} dl \end{aligned} \quad \text{II.10}$$

avec ε_1 , ε_2 et ε_3 les déformations locales des lignes 1, 2 et 3, r le rayon du tube.

Les deux équations II.10 sont obtenues en fonction de la disposition des fibres sur le tube (voir Figure II.4, p.74). En pratique, les tubes sont couramment soumis à différentes contraintes et peuvent

présenter plusieurs flexions tout au long de la structure et dans différents plans ; celles-ci sont indépendantes de sa forme et position initiale – seuls ces déplacements relatifs seront mesurés. Par ailleurs, des mouvements solides tels qu’une translation ou rotation de toute la structure, probablement dus à des événements en dehors de la zone instrumentée, sont susceptibles d’apparaître mais ne peuvent pas être résolus. Dans ce cas, il est nécessaire de définir les coordonnées spatiales d’au moins deux points sur la structure. A moins de disposer d’autres informations, les constantes d’intégration seront définies de manière à ce que les déplacements selon les axes Y et Z soient nuls pour le premier point ($z = 0$) et le dernier point ($z = z_{max}$). Pour éliminer ces deux inconnues, une mesure topographique définirait les coordonnées des points initial et final.

Les mêmes formes d’équations sont utilisées pour définir l’incertitude de déplacement en tous points ; les signes des équations II.10 sont modifiés de telle sorte que les incertitudes sur les déformations $\delta\varepsilon$ s’additionnent :

$$\begin{aligned} \delta x(z) &= \iint_0^z \frac{\delta\varepsilon_3(l) + \delta\varepsilon_2(l)}{r * \sqrt{3}} dl \\ \delta y(z) &= \iint_0^z \frac{\delta\varepsilon_1(l) + \frac{\delta\varepsilon_2(l) + \delta\varepsilon_3(l)}{2}}{1.5 * r} dl \end{aligned} \quad \text{II.11}$$

II.B.3.1.3 Adaptation pour une instrumentation par fibre optique en hélice

Lors de la flexion d’un tube de rayon r (non nul) sur lequel est disposée une fibre optique en hélice, l’allure de la courbe de déformation $S(s)$ sera sinusoïdale, avec s représentant son abscisse curviligne :

$$\varepsilon(s) = \Delta\varepsilon(s) * \sin(K_0s + \Phi(s)) + \varepsilon_0(s) \quad \text{II.12}$$

Avec $\Delta\varepsilon(s)$ l’amplitude maximale des déformations, $\sin(K_0s + \Phi(s))$ la modulation des déformations selon l’axe du tube où K_0 dépend de la disposition des fibres optiques (notamment le pas de l’hélice choisi) et $\Phi(s)$ la phase de la courbe sinusoïdale représentant les déformations subies par la fibre optique.

Dans le cadre de la mesure de la flexion, c’est l’enveloppe $\Delta\varepsilon(s)$ qui permet de déterminer le déplacement de la conduite ; elle est obtenue par la correspondance avec une fonction mathématique de la forme suivante :

$$\Delta\varepsilon(s) = A(s) * \sin\left(\frac{2\pi}{p} + \phi\right) + A_0 \quad \text{II.13}$$

avec $A(s)$ un polynôme dont le degré est supérieur ou égal à 3, p est le pas de l’hélice, ϕ son terme de phase et A_0 une constante.

La relation mathématique entre $\Delta\varepsilon(s)$ et le rayon de courbure est similaire à l'équation II.8 avec l'ajout d'un coefficient $\cos(\gamma_0)$ permettant de ramener les déformations expérimentalement mesurées selon l'axe curviligne s de l'hélice à l'axe z de la conduite :

$$\frac{1}{R(z)} = \frac{1}{\cos(\gamma_0)} * \frac{\Delta\varepsilon(s)}{2r_0} \quad \text{II.14}$$

Avec r_0 le rayon du tube et γ_0 l'angle entre l'axe de la fibre optique et celui du tube.

Ensuite, le même raisonnement que pour la configuration longitudinale concernant la double intégration de l'inverse du rayon de courbure, est appliqué. Les constantes d'intégration sont également calculées de la même manière (les premier et dernier points de la zone instrumentée sont considérés comme fixes).

L'équation permettant de déterminer l'amplitude du déplacement du tube dans le plan défini par les extrema de déformations est la suivante :

$$d(l) = \frac{1}{\cos(\gamma_0)} * \iint_0^z \frac{\Delta\varepsilon(l)}{2r_0} dl \quad \text{II.15}$$

La définition de la direction de flexion se fait en calculant la phase entre deux courbes de déformations obtenues. Cela nécessite, soit une mesure d'étalonnage, soit la connaissance de l'angle d'installation initial de la structure.

De même que pour la configuration longitudinale, le calcul d'incertitude se fait en considérant l'erreur maximale pouvant apparaître sur les mesures de déformation et cela se traduit par l'équation suivante :

$$d_{\text{erreur}}(z) = \frac{1}{\cos(\gamma_0)} * \iint_0^z \frac{2\delta\varepsilon}{2r_0} dl \quad \text{II.16}$$

II.B.3.1.4 Calcul de l'allongement du tube

Dans notre modèle mécanique, nous faisons l'hypothèse que l'axe neutre ne subit pas de déformation ; le tube garde donc strictement la même longueur. Cela se traduit par l'égalité, en valeur absolue, de l'amplitude des déformations des lignes inférieure et supérieure (ε_{bas} et $\varepsilon_{\text{haut}}$). Or dans la réalité, cela peut être différent. La Figure II.16, par exemple, illustre l'allongement de l'axe neutre. Le calcul revient alors à prendre leur moyenne et à sommer l'ensemble des contributions sur la structure.

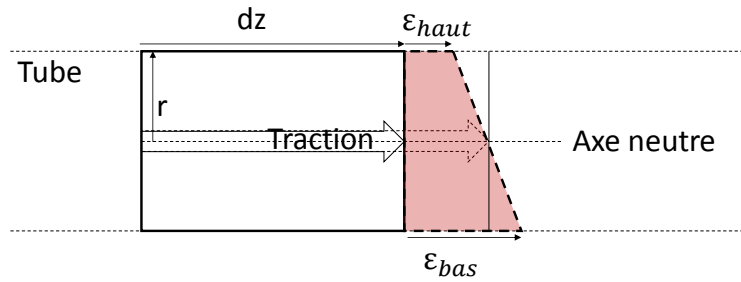


Figure II.16 Schéma d'un élément unitaire d'un tube subissant une traction et s'allongeant ainsi de ϵ .

Dans le cas d'une disposition longitudinale, l'allongement d_z du tube à la position l est donné par la relation suivante :

$$d_z(z) = \int_0^z \frac{\epsilon_1(l) + \epsilon_2(l) + \epsilon_3(l)}{3} dl \quad \text{II.17}$$

Dans le cas d'une configuration en hélice, le même raisonnement est suivi. En cas d'allongement, la courbe de déformation sinusoïdale aurait une composante continue correspondant directement à l'allongement (traction) ou rétrécissement (compression) de l'axe neutre du tube. Par ailleurs, il est important de ne pas confondre ce phénomène mécanique avec une variation de température du tube, qui aurait le même effet sur les mesures de déformation.

II.B.3.2 Validation du modèle de déplacement

Un exemple de simulation de mesure de déformation par une implémentation à trois fibres optiques disposées de manière longitudinale et le calcul par intégration du déplacement et de rayon de courbure du tube sont présentés à la Figure II.17.

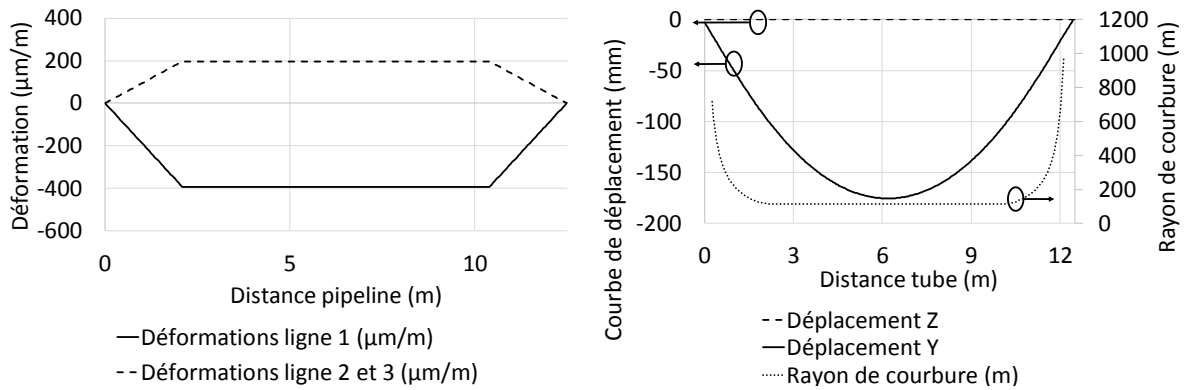


Figure II.17 Simulations de déformations pour une charge de 150 kg, soit une déformation maximale de 393µm/m pour la ligne 1 (gauche). Déplacement et rayon de courbure calcul à partir de l’intégration des déformations simulées (droite).

Les déplacements dans les plans XY sont nuls en raison de la flexion dans le plan YZ. Pour une charge de 150kg (soit 75Kg sur chacun des points d’application), la flèche calculée est de 175,4 mm.

La flexion 4 points permet d’obtenir un rayon de courbure constant entre les deux points d’application des charges – d’où le nom de flexion circulaire. En dehors de cette zone, la flexion est moins importante, le tube possède donc un rayon de courbure plus grand. Le rayon de courbure minimum est de 115 m.

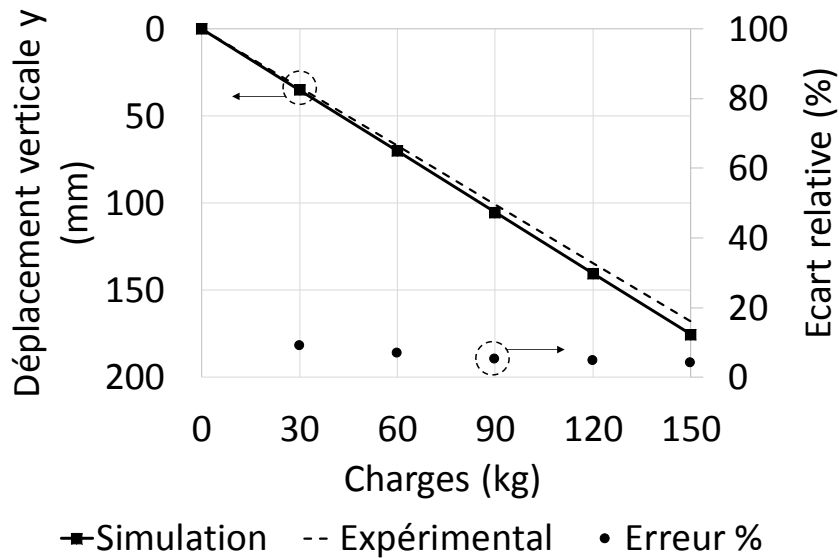


Figure II.18 Résultats de simulations et issue de l’expérience des flèches relatives maximales pour un tube en flexion 4 points entre son poids propre et avec charges comprises entre 30 kg et 150 kg. Les résultats expérimentaux sont obtenus grâce à un capteur de distance laser ponctuel placé à mi longueur.

D’après la Figure II.18, les résultats issus de notre modèle mécanique développé précédemment et ceux de notre capteur de distance laser sont très similaires – avec une erreur moyenne de 6 %. Les différences viennent toujours des hypothèses faites sur les dimensions mécaniques du tube, la précision des charges appliquées (points d’applications, masses) ainsi que de la répétabilité du capteur laser (inférieure à 0.5 mm). Nos tubes en acier se comportent de la manière prédite par le modèle mécanique lors de l’application des charges et l’acier reste dans sa zone linéaire et élasticité.

II.B.3.1 Mesures expérimentales de déplacement

Les résultats de simulation et expérimentaux des courbes de déplacement et de rayon de courbure du tube, obtenus à partir des mesures réparties par fibre optique en configuration longitudinale et en configuration en hélice, sont montrés à la Figure II.19. Les deux modèles de calcul fonctionnent et s’accordent : le comportement des deux tubes utilisés est similaire. L’erreur moyenne de déplacement entre les simulations et l’expérimentation, pour les configurations longitudinale et hélicoïdale, est respectivement de 22 % et 32 %.

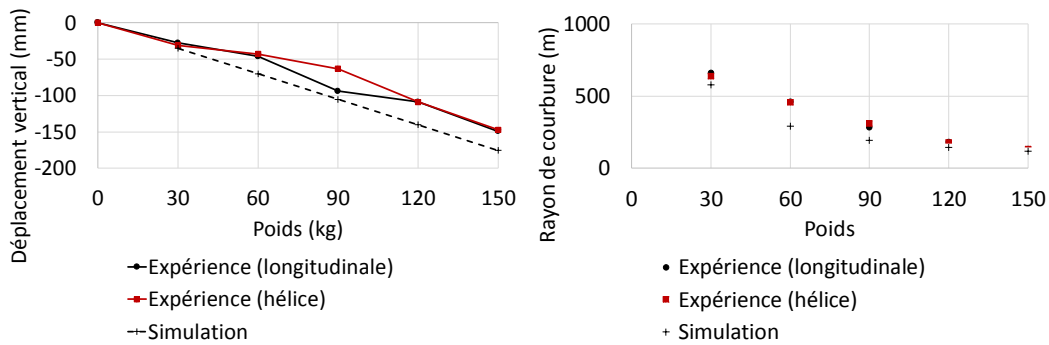


Figure II.19 Gauche : déplacement (gauche) et rayon de courbure (droite) calculés expérimentalement à partir des déformations pour une poutre en flexion 4 points.

II.B.4 Conclusion sur la mesure de déplacement

Pour de grandes structures, l’instrumentation par capteur réparti à fibre optique possède de nombreux avantages dont le plus important est la prise de mesure à toutes les zones où se situe la fibre optique. Que ce soit pour la température, la déformation ou les vibrations, tout nouvel événement est détecté. Il n’y a pas de zone morte comme avec les technologies ponctuelles telles que les capteurs à réseaux de Bragg.

Cette instrumentation, ne nécessitant pas de grands moyens d’installation, possède une valeur ajoutée très importante en termes d’exhaustivité de mesure. Pour les industriels du domaine de l’énergie, pour lequel son transport nécessite des moyens de surveillance sur de très longues distances, elle prend tout son sens. L’emploi de fibres optiques pour surveiller une zone à risque devient le choix idéal.

Les résultats fournis par cette technologie dépendent des procédés d'installation et de la disposition des fibres optiques sur la structure en question, en particulier pour les mesures de déformation, où seuls les mouvements hors du plan neutre seront détectés. Le modèle mécanique mis en place est intimement lié à la position des fibres optiques. La connaissance précise de leur disposition est donc primordiale. Deux configurations différentes ont été détaillées et possèdent chacune leurs avantages et inconvénients. Le collage longitudinal à 120° nécessite trois fibres optiques contrairement à l'hélice, mais est plus simple à mettre en œuvre lors de la l'installation en tranchée. Dans le cas des conduites (flexibles ou rigides) réalisées en usine grâce aux moyens industriels, l'installation en hélice est plus pratique.

La disposition en hélice offre donc une résolution spatiale de flexion moins bonne que la configuration longitudinale en raison de la méthode de résolution des calculs de déplacement (détection d'enveloppe) où plusieurs spires sont nécessaires pour détecter une flexion. Elle est généralement de l'ordre de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres.

L'application de ce modèle aux mesures de déformation sur des structures linéaires, telles que des poutres ou canalisations, permet de remonter aux informations de déplacement relatif entre les deux extrémités de la structure ; les mouvements solides tels que les translations ou rotations ne pouvant pas être résolus avec les seules mesures Brillouin. Nous allons voir dans les prochaines pages, deux applications industrielles pour la mesure de déplacement de canalisations de pétrole possédant chacune ses particularités.

II.C Mesures réparties de déformation par effet Brillouin – Applications industrielles

Deux projets industriels, menés avec, tout d'abord, une société gérante d'infrastructures de transport d'hydrocarbures et, ensuite, avec la société **SAIPEM**, utilisent les technologies de mesure répartie par fibre optique de déformation et de température basées sur les effets Brillouin et Raman. Comme expliqué au chapitre 1, la température ne doit pas influencer les mesures de déformation mécanique (déformation thermique et sensibilité à la température de l'effet Brillouin) ; la mesure Raman est alors présente pour compenser ces grandeurs d'influence.

L'objectif principal de ces instrumentations est de calculer la courbe de déplacement $y(z)$ d'une canalisation grâce aux mesures réparties de déformation dans chacun des deux types d'implémentation des câbles à fibre optique.

Pour le premier projet, une disposition longitudinale a été adoptée car la pose des câbles à fibre optique est plus simple en tranchée même si trois câbles à fibre optique disposés à 120° autour de la canalisation sont nécessaires. Le suivi des déformations de cette canalisation est l'objet principal de ce projet en raison des conditions environnementales et des mouvements de sols.

Concernant le second projet avec la société SAIPEM, l'objectif est la qualification des méthodes de mesures permettant d'obtenir le comportement ou la signature thermique et mécanique des tubes en fonction de leurs caractéristiques de fabrication. Ce prototype de canalisation inclut des câbles électriques préinstallés en hélices de manière industrielles en usine ; cette même disposition a donc été préférée pour les câbles à fibre optique.

Ces projets d'instrumentation, ayant été initiés par Cementys avant le début de cette thèse, concordent avec mes objectifs concernant le suivi de canalisations par capteur reparté à fibre optique.

II.C.1 Mesure statique de déplacement d'une canalisation enterrée

II.C.1.1 Contexte

Pour ce projet, le partenaire industriel de Cementys gère une canalisation enterrée d'hydrocarbure qui passe dans des régions montagneuses (Figure II.20). Celle-ci peut être soumise à des fortes contraintes dues aux importants dénivelés et aux conditions climatiques. Lors d'une phase de maintenance, des déplacements ont été détectés par un robot racleur instrumenté sur une portion proche d'un passage de rivière. Afin de suivre les déformations subies par la nouvelle conduite installée en 2013, il a été décidé de l'instrumenter par capteur réparti à fibre optique.

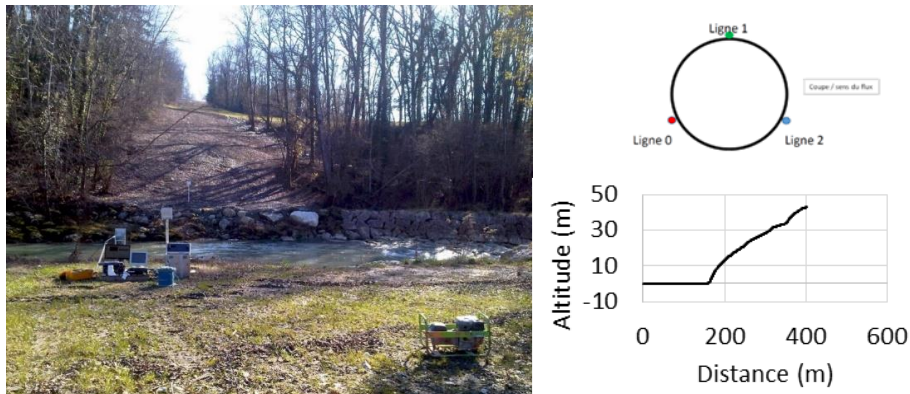


Figure II.20 Photo du site. La canalisation est enterrée et passe sous la rivière avant de remonter vers la colline. Disposition des fibres longitudinales autour du tube. Profil d'altitude de la canalisation.

Des câbles à fibres optiques ont été collés directement sur la surface externe du tube. Une disposition longitudinale des câbles a été choisie en raison du passage du tube sous une rivière et de l'environnement trop contraignant pour le collage en hélice. L'instrumentation mise en place en Octobre 2013 est toujours fonctionnelle (Figure II.21) et au moins deux à trois campagnes de mesures sont réalisées tous les ans. Les systèmes de mesures suivants sont utilisés :

- Un système Brillouin-OTDA puis Brillouin-OTDR,
- Un système Raman-OTDR.

Ce projet est un parfait exemple de l'avantage des systèmes de type Brillouin-OTDR vis-à-vis des systèmes de type Brillouin-OTDA dans le cas d'une instrumentation mise en place lors de la construction. En effet, la rupture du câble à fibre optique au cours de l'année 2015 empêche la continuité des mesures avec le système initial (Brillouin-OTDA) nécessitant l'accès aux deux extrémités de la fibre optique pour réaliser la mesure. Dès lors, un système Brillouin-OTDR est utilisé pour analyser de manière indépendante les portions de fibres optiques avant la zone de rupture, par l'accès noté « connexion fibres optiques » sur la Figure II.21, et après la zone de rupture, par un boîtier de jonction accessible au point $z=300$ m.

Grâce aux propriétés de l'effet Brillouin et la méthode d'acquisition des systèmes de mesure employés, la continuité de la surveillance, depuis le début du projet (2013), est assurée malgré le changement de système. Seule une adaptation est à réaliser au cas où la longueur d'onde λ_0 de travail des interrogateurs est différente en raison de la dépendance du décalage de fréquence Brillouin à ce paramètre (voir équation I.13, p.47). Pour un changement de +10 nm de longueur d'onde de travail, la fréquence de décalage Brillouin est modifiée d'environ 80 MHz (en considérant l'indice effectif de la fibre identique pour de faibles variations de longueur d'onde).

II.C.1.2 Résultats des mesures réparties

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, pour toutes mesures de déformation avec un système d'interrogation basé sur la rétrodiffusion Brillouin, une mesure préliminaire, appelée référence Brillouin, est nécessaire. Elle représente l'état en tension/déformation et en température de la fibre juste après son installation sur la structure. Pour ce projet, elle a été réalisée quelques semaines après les travaux de génie civil (remblayage et terrassement du terrain), soit en octobre 2013. En prévision de la compensation thermique par la mesure répartie de température avec le système basé sur l'effet Raman, une référence Raman est également enregistrée. Ces deux mesures seront, pour le restant du projet (ou du suivi de la canalisation), les deux mesures de référence et serviront à toutes les mesures ponctuelles ultérieures.

Concernant la température, elle est la même en tous points d'une section de tube en raison de la profondeur à laquelle il est enterré (<5m). Ceci a été vérifié par la comparaison entre les mesures réalisées sur chacune des trois fibres optiques (à 120 °C autour du tube). D'autre part, en cas de fuite et en fonction des conditions d'humidité et de température du terrain, une variation locale et anormale de la température pourrait être détectée.

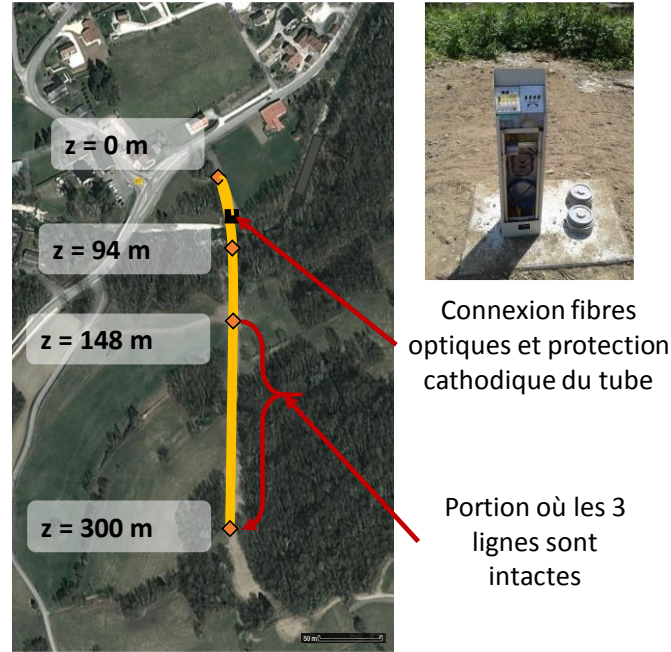


Figure II.21 Schéma d'installation des fibres optiques pour la mesure de déformation et déplacement de la canalisation.

Compenser les mesures de déformation par analyse Brillouin des effets thermiques est indispensable pour ce projet d'instrumentation à long terme. Les conditions météorologiques et environnementales font que les variations de température d'une campagne de mesure à une autre ne sont pas négligeables ; une différence de plus de 15°C peut être enregistrée entre l'été et l'hiver. Elles sont compensées en utilisant l'équation II.18 tenant compte de la différence de température $\Delta T(z)$ entre la mesure de référence Raman et la mesure actuelle à la position l , des coefficients de conversions Brillouin en température C_T ($\approx 0.975 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$) et en déformation C_ε ($\approx 0.052 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$) et également du coefficient de dilatation thermique de l'acier du tube α_{acier} ($\approx 12.10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

$$\Delta\varepsilon(z) = \frac{\Delta\nu_B(z) - C_T\Delta T(z)}{C_\varepsilon} - \alpha_{acier} \cdot \Delta T(z) \quad \text{II.18}$$

Cette expression est valable lorsque les fibres optiques sont collées sur structure instrumentée. Dans ce cas, la dilatation thermique de la fibre optique et celle du câble de protection sont négligeables.

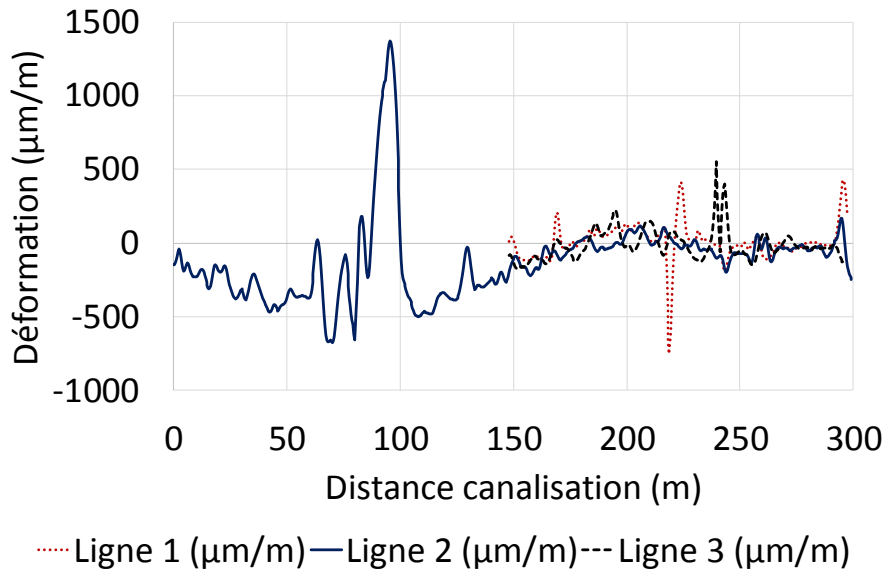


Figure II.22 Courbes de déformations réparties pour l'implantation actuelle des fibres optiques sur la canalisation (Juillet 2016).

Un exemple de résultats est présenté à la Figure II.22. Les trois courbes représentent les déformations des lignes optiques 1, 2 et 3 disposées longitudinalement à la canalisation. Pour des raisons de faisabilité de mise en œuvre, les lignes 2 et 3 ne commencent qu'à partir du point $d = 148 \text{ m}$. Une interprétation de ces courbes est donnée ci-dessous, en fonction de la topographie du terrain, de l'environnement et des caractéristiques de l'instrumentation.

Tout d'abord, une tendance générale se dessine : une compression (déformations négatives) entre 0 et 175m, suivie d'une légère tension (déformations positives) de 175m jusqu'à 225m pour finir sur de très faibles déformations négatives. Cette évolution est présente depuis la première campagne de mesure en Février 2014. Elle a été engendrée par le tassement naturel du terrain suite aux travaux. Ce tassement dépend de la topographie de l'environnement, notamment en raison de fort dénivelé à partir de la distance $d=100\text{m}$ (voir Figure II.20). Ensuite, une zone de tension est clairement identifiable sur la ligne 2 aux alentours de la distance $d=90 \text{ m}$. A cet endroit-là, le tube forme un coude. En effet, en raison du passage de la rivière, celui-ci est placé dans une gaine ; il n'est alors plus maintenu par le sol.

Ces deux premiers événements n'évoluent que très peu depuis les premières campagnes de mesure, ce qui confirme l'hypothèse du tassement naturel du terrain suite aux travaux.

Deux événements sont également présents aux distances 220 m et 240 m dont les caractéristiques de déformations ressemblent à celles d'une déformation locale (compression-traction-compression pour la fibre supérieure et inversement pour la fibre inférieure). Leurs amplitudes ne sont pas trop importantes (inférieure à $800\mu\text{m/m}$ d'amplitude pic-pic) mais ont tendance à évoluer au cours du temps. Une surveillance par mesure régulière est en cours afin de garantir que la conduite n'atteigne pas sa limite d'élasticité.

II.C.1.3 Traitement sur les données de température et déformation

Nous allons maintenant utiliser le modèle mécanique défini au début du chapitre pour déterminer la courbe de déplacement $y(z)$ de la canalisation. La configuration longitudinale des câbles à fibre optique nécessitant au moins la mesure sur trois lignes de déformation ; ce modèle ne peut s'appliquer que sur une portion du tube entre 148 m et 300 m.

En appliquant aux résultats de déformation les équations définies au début de ce chapitre, le déplacement de la conduite est déterminé en tous points dans les 2 dimensions (X et Y) ainsi que son allongement. Nous ferons l'hypothèse que les deux extrémités de la structure ne subissent aucun déplacement selon les directions verticale et horizontale. Cette analyse permet de visualiser la forme relative de la canalisation entre la mesure de référence (Octobre 2013) et la dernière mesure – en dehors de tout mouvement solide (translation ou rotation).

La Figure II.23 représente les faibles déplacements de la canalisation dans les trois dimensions (X, Y et Z) obtenus grâce à notre modèle mécanique entre Octobre 2013 et Juillet 2016. Leurs amplitudes absolues sont toujours inférieures à 10 cm. Le déplacement selon l'axe Z représente l'allongement ou la contraction du tube ; celui-ci étant faible, il a été multiplié par un facteur 10 pour mieux le visualiser.

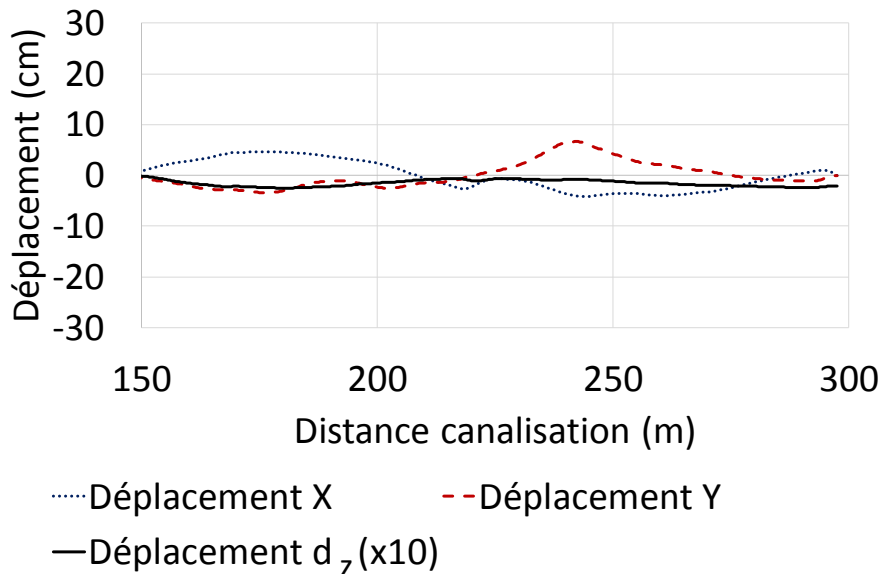


Figure II.23 Déplacements dus à la déformation de la canalisation calculés expérimentalement à partir de mesures réparties de déformations dans les trois directions X, Y et Z (d'après les équations II.10 et II.17).

Aux abscisses 220 m et 240 m (courbe bleue et rouge respectivement), de légers « coudes » sont présents ; ils sont en lien avec les deux évènements présents sur les mesures de déformation (Figure II.22).

Sur de faibles longueurs de ligne (environ quelques centaines de mètres), les incertitudes sur les mesures de déformations sont constantes ($\approx 2 \mu\text{m/m}$ pour l'interrogateur B-OTDA selon les caractéristiques constructeur). La Figure II.24 représente les erreurs maximales faites sur les mesures de déplacement de la conduite. En bout de ligne, les faibles déplacements mesurés sont inférieurs à l'erreur de mesure.

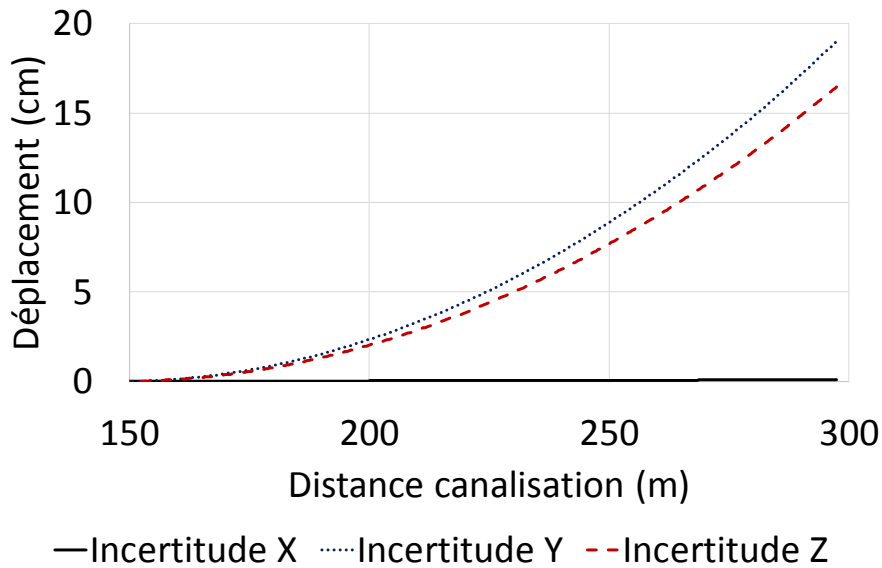


Figure II.24 Incertitudes d'intégration sur les mesures de déplacements de la canalisation calculés expérimentalement à partir de mesures réparties de déformation dans les trois directions X, Y et Z.

II.C.1.4 Conclusion sur le projet

Cette étude de déplacement ne nécessite l'actualisation de ces données que quelques fois par an seulement. Les systèmes de mesure utilisés sont des systèmes commerciaux réputés pour leur faible incertitude de mesure malgré leur durée de mesure, de plusieurs minutes au minimum. Les événements recherchés étant statiques (évolution lente de la déformation et de la température sur plusieurs mois), le temps d'acquisition est volontairement augmenté afin de réduire les incertitudes de mesure. Ce projet de surveillance de l'état de santé de la structure n'est donc pas limité par la rapidité des mesures.

Ce projet permet aussi de justifier l'emploi d'un système de mesure par réflectométrie, lorsque la ligne est installée dès la construction de la structure. En effet, la fibre optique ayant été cassée, un changement de système s'est imposé ; celui-ci n'a modifié en rien la qualité et la plus-value des mesures en raison de la continuité de la surveillance – l'effet Brillouin étant un effet intrinsèque à la fibre optique, il ne dépend pas de l'interrogateur.

Nous allons voir dans le paragraphe suivant un projet similaire d'instrumentation de canalisation. Les différences résident dans l'implémentation des fibres optiques et ses enjeux.

II.C.2 Mesure statique de déplacement d'une canalisation sous-marine

II.C.2.1 Contexte

Le projet détaillé dans cette section a été fait en collaboration par les sociétés Saipem et Cements. Son objectif est la réalisation d'un prototype de canalisation, couramment appelée PIP-ETH, *Pipe-In-Pipe Electrical Trace Heating*, pour le transport d'hydrocarbures en milieu sous-marin [131] ; une illustration est donnée à la Figure II.25. Sa structure est, comme son nom l'indique, « un tube dans un tube » : le fluide circule dans le tube interne et est isolé de l'environnement extérieur par une couche d'isolant et un second tube externe coaxial au premier. Ce type de structure est généralement utilisé dans les longues liaisons de transport d'hydrocarbures en milieu sous-marin. En raison des températures basses (environ 4°C), les fluides transportés changent de propriétés (variation de viscosité par exemple). Cela peut alors générer des bouchons réduisant, voire stoppant, l'écoulement. La notion d'ETH est une évolution des PiP classiques pour lesquels des conducteurs électriques sont ajoutés dans l'interstice afin de chauffer la canalisation par effet Joule. Grâce à cette solution, les conduites sous-marines atteignent désormais des longueurs supérieures à 10 km de long.

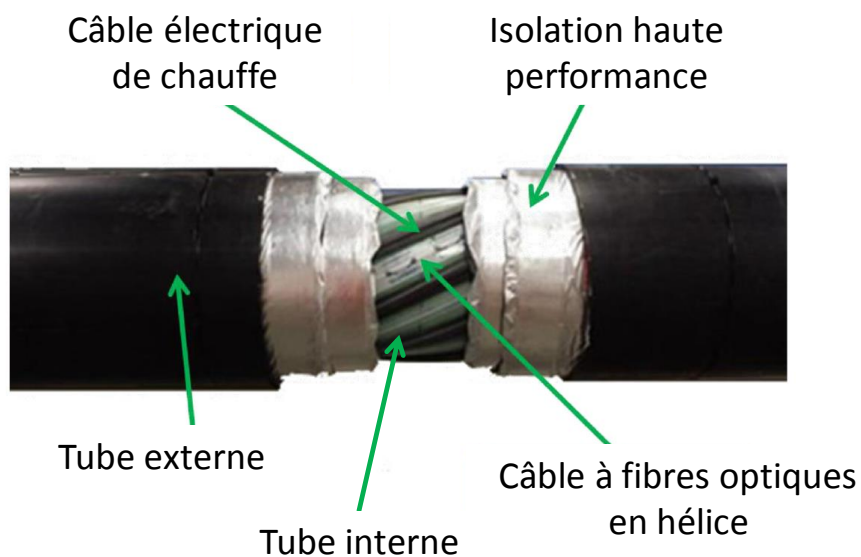


Figure II.25 Schéma d'une canalisation de type Pipe-In-Pipe Electrical Trace Heating (PiP-ETH), avec une disposition longitudinale des câbles électriques [131].

Grâce à l'utilisation des câbles à fibres optiques, qui permettent la mesure répartie de température et de déformation simultanée, l'évolution de la température du tube et de sa réponse mécanique, lors d'une flexion, sont enregistrées. Ces mesures définissent **les signatures thermique et mécanique** de la structure avant leur installation et leur mise en service ; il s'agit d'un étalonnage du comportement des éléments de la structure qui pourraient varier d'un élément à un autre même si les conditions de fabrica-

tion sont les mêmes. Cette réponse mécanique particulière est propre à chaque section. Lors de son utilisation en conditions réelles (en milieu sous-marin), il sera possible de comparer son comportement aux essais mécaniques et thermiques initiaux réalisés en usine. Une réponse anormale, sur site, implique alors un changement de propriétés - mécanique et thermique - de ladite portion. Ce concept fait actuellement l'objet d'un brevet entre les sociétés SAIPEM et CEMENTYS dont je suis co-inventeur.

Ce projet d'instrumentation consiste donc en la mise en place de câble à fibres optiques le long d'une conduite d'une longueur totale de 30m (plus précisément trois conduites de 10 m soudées entre elles ; voir Figure II.26). Ils suivront la configuration en hélice des neuf câbles électriques de chauffe, avec un pas de 3 m. Par souci de fiabilité et de redondance, neuf câbles optiques sont disposés autour de la structure.



Figure II.26 Photo de l'installation des câbles à fibre optique Sensolux TM en hélice autour d'une section de 10m (gauche). Photo des connections entre les tronçons des tubes de type PIP.

II.C.2.2 Mesure de la température

La température est contrôlée par capteur réparti à fibres optiques utilisant l'effet Raman. Ces derniers donnent une mesure continue de la température absolue du tube tous les 2m, avec une incertitude inférieure à 1°C. La Figure II.27 montre l'évolution de la température en fonction de la position sur le tube et de la durée de chauffe. Les trois bosses de température visibles sur la figure correspondent aux centres de chacune des trois sections, où l'absence des jointures (Figure II.26 - droite) améliore l'isolation thermique – la température y est donc plus élevée.

En plus de définir la signature thermique de la canalisation, dépendant des caractéristiques des deux tubes et des matériaux isolants, ces mesures réparties de température permettront de compenser les effets thermiques sur les mesures de déformations réalisées avec le système Brillouin.

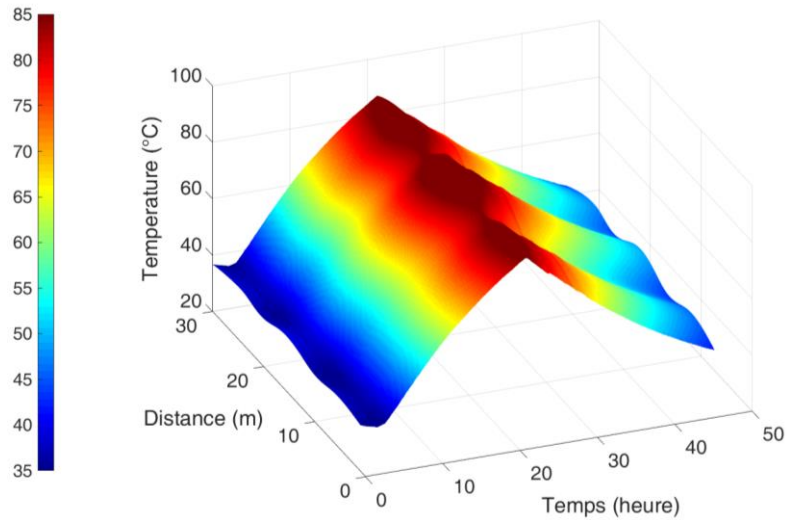


Figure II.27 Mesure répartie de la température sur l'intégralité du prototype de PiP pendant une expérimentation de chauffe active pendant 20h puis de refroidissement passif.

II.C.2.3 Mesure de la déformation et du déplacement

La mesure de déformation est réalisée avec un interrogateur Brillouin de type Brillouin-OTDA. Le système de déplacement, montré à la Figure II.28, consiste en un treuil fixé au sol permettant la flexion du tube vers le bas ou vers le haut. Une flexion 3 points est donc réalisée en positionnant le tube à une certaine hauteur ; le point d'application est situé à mi-longueur.

La Figure II.29 montre un exemple de résultat de déformation sur les trois portions de tubes pour une des neuf fibres optiques disposées. Leur forme sinusoïdale est caractéristique d'une implémentation des câbles à fibres optiques en hélice. La mesure de référence Brillouin a été enregistrée lorsque le tube était à l'horizontale¹, soit soutenu en son milieu par le système de déplacement. Une mesure de déformation est ensuite réalisée une fois le tube déplacé d'une certaine hauteur vers le bas (pour le point situé au centre du tube). Les amplitudes maximales de déformation sont de l'ordre de $\pm 200\mu\text{m}/\text{m}$ pour des déplacements de 20 cm.

¹ Le tube n'est pas parfaitement à l'horizontale pendant cette manipulation. Dans notre modèle mécanique, nous ne prenons volontairement pas l'état initial des tubes supportés en leur centre, en raison de la courbure sous leur poids propre entre les deux extrémités et le support central. Pour ce projet, nous admettrons que cela n'a pas d'influence sur les calculs de déplacement.



Figure II.28 Système de levage et de flexion du tube de type PiP générant ainsi une flexion 3 points.

La relation de phase pour les courbes de déformation entre les trois sections de 10 m du tube est arbitraire (les tubes ayant été soudés après la pose des câbles à fibres optiques et sans le respect d'un angle relatif précis). Cela n'influence pas la mesure de déplacement, étant donné le modèle mécanique mis en place lors d'une configuration en hélice prenant en compte l'enveloppe de la courbe de déformation (voir II.B.3.1.3). La phase des courbes de déformation sera néanmoins comparée à celle des mesures de référence afin de déterminer le sens de la flexion.

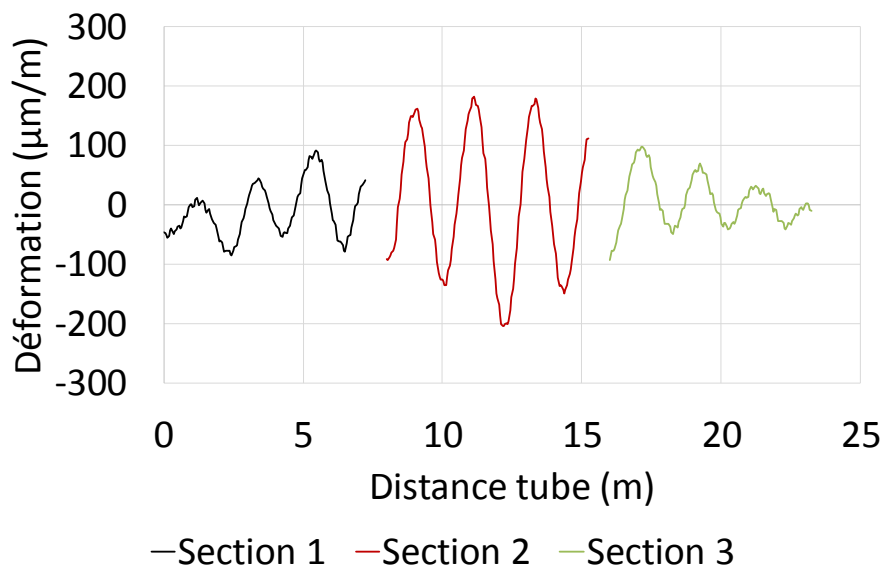


Figure II.29 Mesure répartie de déformation par fibre optique pour une configuration en hélice.

La Figure II.30 montre la différence de phase et de niveau de déformation entre deux mesures dont le sens et l'amplitude de flexion sont différents. Pour des déplacements d'amplitude -15 cm et +10 cm, les courbes de déformation sont en opposition de phase et d'amplitude d'enveloppe différente. Le système de treuil permettant d'imposer une flexion au tube permet seulement de faire monter ou descendre le tube. Cette étape d'étalonnage, reliant la phase à la direction de flexion, est essentielle : les flexions et déplacements, lors de son utilisation en conditions réelles, seront comparés à ces résultats.

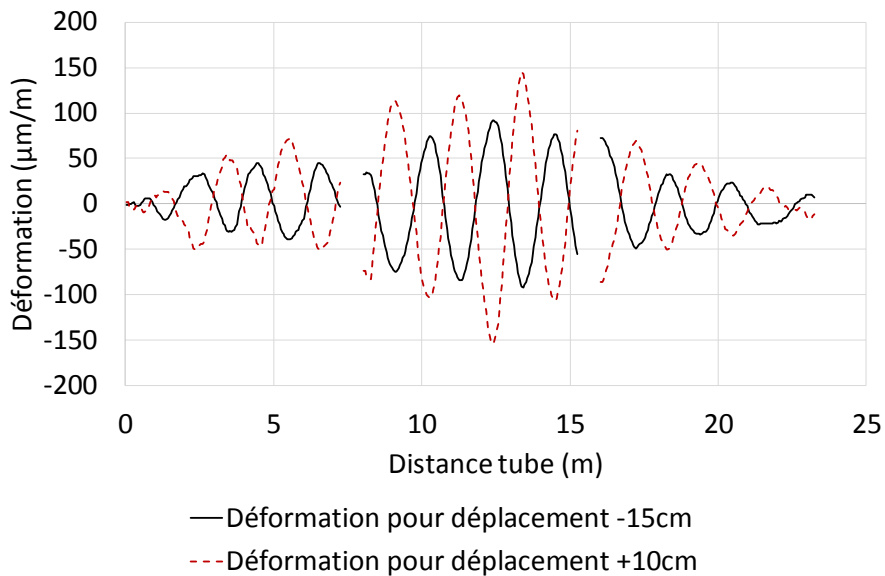


Figure II.30 Relation de phase entre deux mesures dont la direction de la flexion est différente (180°)

A la Figure II.31, la courbe du déplacement calculé (après étalonnage) montre une évolution linéaire et très similaire au déplacement réel (pente égale à 1).

Pour des déplacements supérieurs à 5 cm au centre, l'erreur de mesure est très faible et est inférieure à 0.5 %. Elle est cependant plus élevée (supérieure à 1 %) lorsque ces déplacements sont inférieurs à 3 cm en raison des faibles déformations subies par les fibres optiques (environ $20 \mu\text{m/m}$). L'interrogateur Brillouin a une incertitude de $7 \mu\text{m/m}$.

II.C.2.1 Conclusion sur le projet

L'instrumentation mise en place est destinée à estimer en temps réel de l'état de la canalisation, que ce soit en température ou en déformation. En sortie d'usine, cet état a d'abord été mesuré afin de lui associer une signature ou un comportement mécanique et thermique vis-à-vis de perturbations extérieures telles que le déplacement de la conduite, la variation de pression ou de température de l'environnement ou des fluides circulant à l'intérieur. Le changement de réponse au cours de son utilisation signifiera alors un potentiel défaut ou un vieillissement des matériaux et, probablement, une baisse des performances de la structure.

La rapidité d'acquisition des systèmes de mesure est aussi un point déterminant. Les conditions d'installation (entraînant d'importantes déformations en raison des flexions imposées) et de production du tube en milieu marin (température des fluides, pression interne et sollicitations extérieures) impliquent des contraintes importantes dont l'évolution temporelle est rapide ; c'est pourquoi un suivi dynamique serait nécessaire afin de détecter, le cas échéant, le dépassement des limites d'utilisation de chacun des éléments.

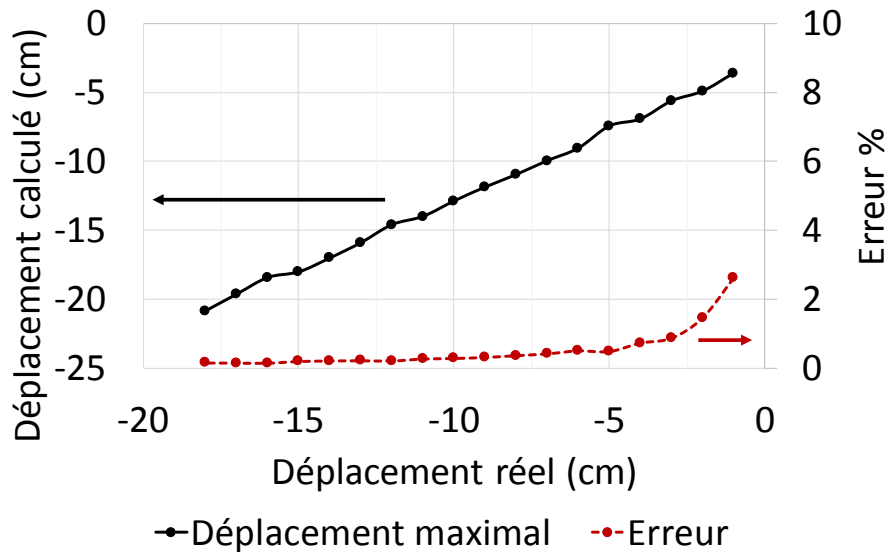


Figure II.31 Caractéristique du déplacement de la canalisation (calculé VS réel – trait plein), dont la pente est égale à 1, et estimation de l'erreur % (pointillé).

II.D Conclusion du chapitre 2

Le modèle mécanique mis en place dans ce chapitre permet de mesurer les déplacements d'une poutre de section circulaire. Il peut s'étendre à toutes formes de section en adaptant les équations II.10 (disposition longitudinale) et II.15 (disposition en hélices). Cependant, les mesures de déformation par effet Brillouin étant relatives, les déplacements solides de type rotation et translation ne sont pas pris en compte. De ce fait, le choix des constantes d'intégration est important. De plus, l'incertitude de mesure sur les déplacements est d'autant plus importante que la longueur du tube est grande - les incertitudes de chaque mesure locale de déformation se sommant du fait du calcul d'intégration. Les résultats d'expérimentations obtenus sur les démonstrateurs chez Cementys s'accordent avec les résultats de simulations et valident alors les deux configurations de pose de la fibre optique.

En fin de chapitre, nous avons vu deux applications où l'emploi d'une instrumentation par capteur réparti à fibre optique s'avère être la meilleure solution technique. La détection de nouveaux événements, permettant la mesure de l'intégrité et de l'état de tous points de la structure, n'est possible qu'avec cette

technologie répartie. L'emploi de capteur ponctuel ne serait pas en mesure de déterminer l'ensemble des flexions subies par les canalisations instrumentées.

Ces deux projets concernent des applications de surveillance d'infrastructure sur le long terme, à savoir la détection de mouvement de la conduite pouvant provoquer un endommagement des matériaux (plastification ou fissures) et ainsi changeant sa réponse mécanique et thermique. De manière générale, ce type de mesure est fait à intervalle de temps régulier, de l'ordre d'une heure pour les projets critiques ou de l'ordre du jour, de la semaine ou même du mois pour des projets moins sensibles.

Un suivi en temps réel, de l'ordre de la seconde ou du dixième de seconde, serait un avantage lors de la construction ou de l'installation, ou pour des structures subissant des perturbations journalières liées à des événements naturels (vent, passage de véhicules, houle, etc.) ou à des événements liés à son utilisation ou sa manipulation (démarrage ou arrêt de production, transports, maintenance, interventions diverses dans son environnement proche). Cependant, les systèmes industriels de mesures actuels ne bénéficient pas des performances requises pour un suivi en temps réel. Ces limites, que nous allons voir dans le prochain chapitre, sont principalement liées aux méthodes d'acquisition opto-électronique et à la portée de mesure (i.e. longueur de fibre totale utilisée). Ces mesures restent donc qualifiées de statiques.

De plus, le choix de la technologie Brillouin est avantageux dans les projets où la surveillance est nécessaire sur le long terme. Il est possible, pour une raison ou une autre, d'interchanger un système de mesure Brillouin par un autre pour assurer un suivi continu de la structure.

Le chapitre suivant détaille le montage expérimental conçu au sein du laboratoire Télécom ParisTech dans l'objectif de mesurer les oscillations libres d'une poutre supportée en deux appuis simples. Nous utiliserons la technique du flanc de frange pour mesurer de manière dynamique et répartie les variations de déformation.

Chapitre 3

Mesure de déformation dynamique par réflectométrie Brillouin

III.A Applications industrielles pour les mesures dynamiques de déformation

III.A.1 Problématique

Un événement est qualifié de dynamique lorsque son état, à un instant donné, dépend de ses états précédents. Pour l'industrie, la mesure de tels événements est un enjeu majeur pour la surveillance des infrastructures car leurs réponses statique et dynamique sont souvent différentes. Malgré tout, cette étiquette « dynamique » ou « statique » n'est pas absolue. Il est nécessaire d'adapter l'échelle de considération au domaine d'application ou au projet. Un événement dynamique pour le domaine du génie civil, par exemple, - comme les oscillations d'un pont inférieures à 1 Hz à cause du vent - peut être considéré comme statique dans le domaine de l'aéronautique.

En mécanique des matériaux, la variation de déformation subie est dite quasi-statique lorsque elle est comprise entre 10 à 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ par seconde et est dite dynamique entre 10^5 à 10^7 $\mu\text{m}/\text{m}$ par seconde ; entre ces deux régimes, elle est dite intermédiaire [129]. En instrumentation, une mesure est dite dynamique lorsque l'événement mesuré varie dans le temps et que le temps de mesure n'est pas négligeable devant la durée de l'événement. Par opposition, une mesure est dite statique lorsque les variations de la grandeur mesurée sont infiniment faibles vis-à-vis du temps de mesure. Un bon rapport entre vitesse d'acquisition et vitesse de l'événement doit alors être choisi afin d'échantillonner correctement son évolution.

De nombreuses recherches sur les mesures réparties par fibre optique ont permis de mettre au point des systèmes commerciaux performants tant sur les résolutions spatiale ou de mesure que sur la portée. Aujourd'hui, la tendance est à la recherche de performance quant à la rapidité d'acquisition. En effet, les interrogateurs actuels sont souvent limités à la mesure d'événements dont la durée caractéristique est de l'ordre de quelques secondes et, par conséquent, la surveillance d'infrastructure durant leur construction (installation de canalisation, par exemple) n'est pas possible.

Nous avons vu à la fin du premier chapitre, différentes méthodes et principes d'amélioration de la rapidité d'acquisition pour les systèmes de mesure répartie par effet Brillouin. Du fait de l'absence de balayage en fréquence du spectre de gain Brillouin, la **méthode du flanc de frange** est particulièrement appropriée pour l'analyse des variations de la fréquence de décalage Brillouin. Cependant, ce type d'acquisition n'avait été démontré, avant le début de ma thèse, que pour des configurations opto-électroniques de type Brillouin-ODTA. L'objectif principal de ce chapitre est la présentation et la démonstration d'un nouveau système de mesure Brillouin utilisant cette méthode. Il est nommé SA-BOTDR (*Slope-Assisted Brillouin Optical Time Domain Reflectometer* en anglais).

III.A.2 Mesures dynamiques par OTDR

III.A.2.1 Le choix d'un système de mesure

Les avancées technologiques dans le domaine des télécommunications optiques ont permis le développement de systèmes de mesure par fibre optique très performants dont les résultats sont aujourd'hui intégrés dans les processus de production ou de maintenance. Cependant, les recherches sur l'amélioration de la qualité des mesures sont parfois limitées en performances par des effets physiques fondamentaux, comme la vitesse de propagation de la lumière dans la fibre optique et des problèmes purement matériels, comme la bande-passante des systèmes opto-électroniques ou leur niveau élevé de bruit thermique.

L'équilibre entre résolution sur la grandeur mesurée, résolution spatiale, temps d'acquisition et portée de mesure est alors défini par le cahier des charges du projet dans lequel l'instrument est utilisé. Ces quatre paramètres, conditionnant la qualité et la rapidité d'une mesure, sont les plus importants à prendre en compte. A performance et rapidité de mesure égale, le choix d'un interrogateur peut se faire sur d'autres points tels que :

- Poids et encombrement,
- Fiabilité, taux de panne et niveau de maturité technologique¹.

¹ Le niveau de maturité technologique (*TRL Technology Readiness Level* en anglais) est une échelle employée pour évaluer le stade de développement d'une technologie. Elle est comprise entre 1 (principe de base et concept) et 9 (déploiement dans un contexte opérationnel réussi).

- Utilisation en milieu ATEX (ATmosphère EXplosives),
- Consommation en énergie (basse consommation nécessaire si alimenté par un panneau solaire),
- Connectivité (réseau internet filaire ou non, Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA), etc.)
- Environnement d'utilisation (conditions météorologiques : température, humidité, pression, vibration, etc.)

III.A.2.2 Limites physiques et matérielles pour le temps d'analyse

La chronologie d'un modèle d'analyse adapté aux mesures réparties par fibre optique est analysée, depuis la mise en place d'un interrogateur jusqu'à l'affichage des résultats pour les utilisateurs finaux. La Table III.1 comprend les cinq étapes principales de mise en place et d'utilisation d'un système de mesure par fibre optique, précisant l'impact temporel sur le temps de réalisation d'une mesure.

Les étapes 3 et 4, qui sont les plus chronophages, seront détaillées ; les deux premières étant la simple installation du matériel et la phase d'apprentissage de la ligne optique, et la dernière ne comprenant qu'un affichage dans un but de communiquer l'information à d'autres systèmes ou utilisateurs via un système centralisé ou à un serveur (appelé couramment dans le domaine de l'instrumentation un « superviseur »).

a) *Analyse complète et enregistrement des données brutes (étape 3)*

Pour des mesures réparties par capteur à fibre optique, le temps de parcours de l'intégralité de la ligne optique par la lumière est une limite fondamentale pour les technologies basées sur l'analyse des rétrodiffusions optiques, que ce soit dans les domaines temporel ou fréquentiel. Ce temps de parcours a un impact sur le temps entre deux répétitions de mesure. D'après la Table III.2, pour une fibre optique de longueur de 10 km, par exemple, le temps minimal à respecter entre deux impulsions consécutives est de 200 μ s, correspondant alors à un taux de répétition de 10 kHz. Les performances du système de mesure DAS (voir chapitre 1) sont d'ailleurs fortement réduites à cause de cette limite fondamentale (d'après la loi de Shannon, le taux de répétition des impulsions limite la bande passante acoustique).

N°	Etape	Descriptions	Impact temporel
1	Démarrage du système	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place et installation du système - Non pris en compte dans le temps de calcul car en amont des mesures 	Nul
2	Paramétrages électro-optiques	<ul style="list-style-type: none"> - Apprentissage de la ligne optique (portée, perte, zones) - Configuration optimale selon le cahier des charges (paramètres électro-optiques, alarmes, communication et interface utilisateur) 	Nul
3	Analyse complète Enregistrement des données brutes	<ul style="list-style-type: none"> - Lancement d'une analyse complète (analyse temporelle et/ou fréquentielle, moyennage) - Enregistrement des données brutes (DAQ, RAM ou HDD) dont le volume de données peut être important 	Fort
4	Traitement des données	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement des données du système d'acquisition (par application de fonctions et filtres) 	Moyen
5	Formatage des résultats et exportation des données	<ul style="list-style-type: none"> - Affichage des courbes et informations pertinentes selon le projet - Envoi des données ingénieries vers les utilisateurs selon leur niveau d'autorisations 	Faible

Table III.1 Chronologie des événements pour la mise en place d'un système de mesure répartie par fibre optique

Concernant les systèmes de mesure répartie par effet Brillouin ou Raman, étant donné la faible puissance mesurée au niveau du système de détection (en raison des faibles gains de rétrodiffusion), une acquisition sur plusieurs dizaines voire milliers de traces, qui sont moyennées, est souvent nécessaire dans le but d'extraire les signaux utiles du bruit optique, électronique et thermique des équipements. Pour une fibre optique longue (supérieure à quelques kilomètres), le temps d'analyse peut alors atteindre plusieurs minutes ou dizaines de minutes pour obtenir les résolutions de mesure ou spatiale maximales ou souhaitées.

Une analyse complète fait souvent intervenir plusieurs paramètres électro-optiques, notamment lorsqu'un balayage en fréquence est nécessaire et que le système est sensible à la polarisation de la lumière. La durée de chargement de ces paramètres électro-optiques est constante (calcul et envoi des informations) et dépend des performances des équipements, ainsi que de leur interconnexion ; elle est de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes, voire supérieure. Lors d'une analyse d'une fibre optique courte, ce temps de chargement peut devenir prédominant sur le temps d'une analyse optique.

Longueur de la ligne optique Km	Temps de parcours (aller-retour) μ s	Taux de répétition KHz
0.1	2	1000
1	20	100
10	200	10
25	500	4
50	1000	2
100	2000	1

Table III.2 Tableau de correspondance longueur de fibre optique / temps de vol aller-retour des impulsions optiques.

b) *Traitement des données brutes (étape 4)*

Une fois les données brutes enregistrées, un premier traitement est fait pour obtenir la grandeur physique initialement recherchée. Ce processus peut être lourd et d'autant plus long que la longueur de fibre et le taux d'échantillonnage sont importants. A la fin de cette phase, les données sont dites « ingénieuses », comme la fréquence de décalage Brillouin – extraite à partir du spectre de gain Brillouin mesuré. Cette analyse se fait en chaque point de la fibre optique. Ensuite, une analyse particulière, mise en place lors de l'étape 2, est lancée. Elle concerne la recherche d'événement ou de signature particulière le long de la ligne optique, à partir de ces données ingénieuses ; des fonctions et filtres (temporels et fréquentiels) permettent de les mettre en avant et de les identifier.

La longueur de fibre optique et la vitesse d'échantillonnage du signal jouent également sur la quantité de données stockées. Les vitesses de lecture et d'écriture sur les supports de stockage utilisés sont donc des paramètres à prendre en compte et à adapter. La quantité d'informations brutes (sans aucun traitement) pour le système DAS peut atteindre 300 Mo/s lorsqu'une grande longueur de fibre optique est analysée avec un taux d'échantillonnage maximal ; pour les systèmes Brillouin et Raman, les fichiers bruts ont une taille allant de quelques kilooctets à quelques dizaines de méga-octets.

La conception d'un système de mesure passe alors principalement par l'optimisation des étapes 3 et 4 afin d'extraire rapidement les informations nécessaires à la surveillance en temps réel de l'infrastructure instrumentée. Au cours de ce chapitre, le point de considération sera l'étude d'une nouvelle architecture électro-optique pour l'analyse des déformations par effet Brillouin. Notamment, nous nous concentrerons sur la réduction du nombre de point d'analyse par mesure grâce à l'emploi de la méthode du flanc de frange.

III.B Principe de mesure du spectre de gain Brillouin par OTDR

Le point de départ de cette thèse a été le système de mesure développé par Vincent Lanticq (au cours de sa thèse soutenue en 2009, [72]). Nous avons repris son architecture opto-électronique et l'avons modifiée de telle manière à accélérer la vitesse de mesure. Dans les sous-sections suivantes, nous détaillons les principes généraux de l'analyse Brillouin par OTDR, nécessaires à la compréhension des évolutions mises en place. Notamment, la méthode de détection cohérente du spectre de gain Brillouin ainsi que son acquisition par balayage sont expliquées. Ces deux méthodes d'analyse sont aujourd'hui employées par la plupart des systèmes Brillouin-OTDR commerciaux.

III.B.1 Mesure répartie classique par détection cohérente

Comme déjà vu au chapitre 1, les systèmes de mesure Brillouin actuels emploient une technique de balayage pour reconstituer le spectre de gain Brillouin. Ensuite, par une correspondance avec une fonction lorentzienne, la fréquence de décalage Brillouin ν_B est estimée. La déformation ε de la fibre optique s'obtient nécessairement en deux mesures indépendantes, par le calcul de la différence des fréquences de décalage ν_{B1} et ν_{B2} (en tenant compte du coefficient de conversion mécanique C_ε). Ces étapes sont schématisées à la Figure III.1. Le temps de mesure est alors principalement limité par le nombre n de fréquence analysée - ce paramètre détermine la résolution fréquentielle de la courbe de gain Brillouin - et par le nombre de traces acquises.

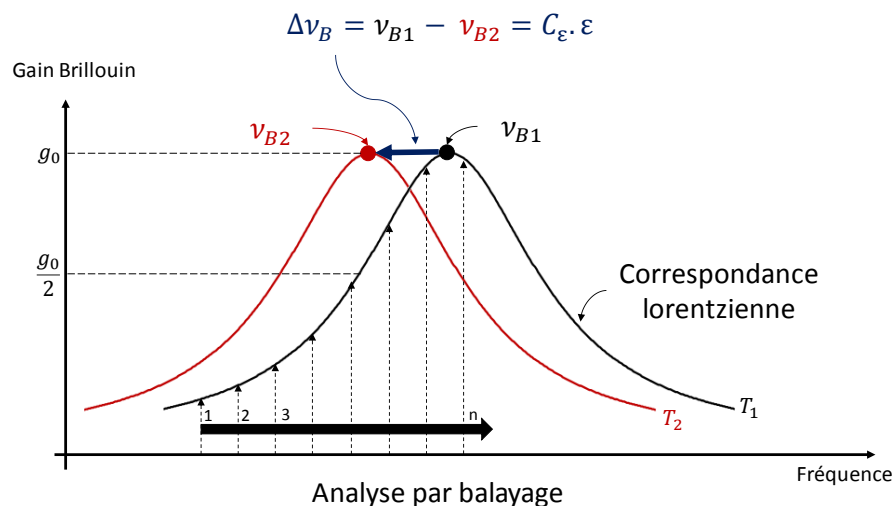


Figure III.1 Schéma de principe pour la mesure du spectre de gain Brillouin par balayage et l'analyse des variations de fréquence de décalage Brillouin

Le schéma d'un système de mesure est donné à la Figure III.2. Il fonctionne par **la détection cohérente des rétrodiffusions Brillouin spontanées**, dont la fréquence de décalage optique est $\nu_0 - \nu_B$.

L'intérêt de cette architecture est la multiplication des amplitudes des deux signaux optiques sur un détecteur quadratique. Ainsi, grâce à un oscillateur local optique puissant, l'analyse des signaux optiques de très faibles amplitudes est possible. Le montage est composé d'une source laser continue de longueur d'onde ν_0 , d'un générateur d'impulsion courte, d'un oscillateur local à la longueur d'onde ν_0 , amplifié par un EDFA et dont la polarisation est brouillée, et d'un système de détection.

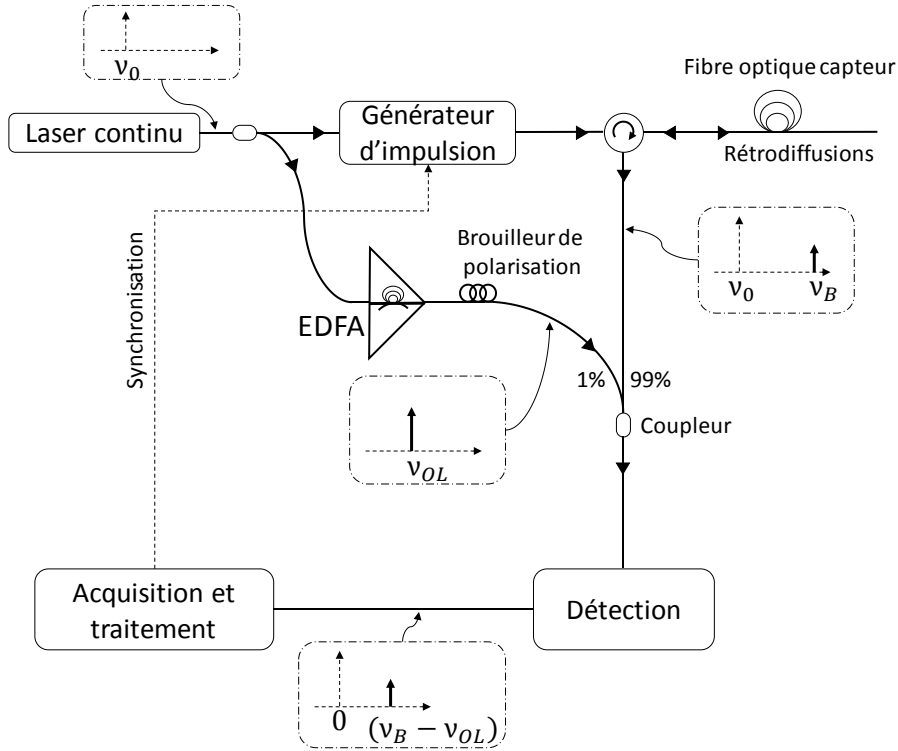


Figure III.2 Schéma électro-optique d'un système de mesure permettant l'analyse des rétrodiffusions Brillouin spontanées grâce à une détection cohérente.

Les signaux optiques de l'oscillateur local $OL_{opt}(t, \nu_{OL})$ et de rétrodiffusion Brillouin spontanée $B_{spt}(t, \nu_B)$ sont définis par :

$$\begin{aligned}
 OL_{opt}(t, \nu_{OL}) &= A_{OL} \cdot e^{j(\nu_{OL}t + \Phi_{OL})} \\
 B_{spt}(t, \nu_B) &= A_{spt} \cdot e^{j(\nu_B t + \Phi_B)}
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

avec A_{opt} et A_{spt} leur amplitude, ν_{OL} et ν_B leur fréquence optique et Φ_{OL} et Φ_B leur phase.

La conversion optique-électrique est réalisée avec un photo-détecteur quadratique, la phase des signaux optiques n'est alors pas prise en compte. De plus, étant dans un régime de rétrodiffusion spontanée (onde acoustique générée par le bruit thermique), les ondes optiques Brillouin ont une relation de phase aléatoire avec l'onde incidente.

L'effet Brillouin, qu'il soit étudié dans un régime spontané [72] ou stimulé [132], est un phénomène dépendant de la polarisation de l'onde optique incidente. Dans les systèmes Brillouin-OTDR, en

raison de la détection cohérente, l'alignement des polarisations des deux ondes incidentes, sur le photo-détecteurs, doit être respecté afin d'obtenir un courant maximal de sortie. Les fibres optiques couramment utilisées pour réaliser des capteurs sur de longues distances, sont des fibres optiques (G.652 par exemple) théoriquement non-biréfringence en raison de leur coût faible. Cependant à cause de ces défauts de fabrication et des courbures subies lors de la pose, il est impossible de prévoir les variations de polarisation des ondes Brillouin lors d'une mesure. Dès lors, un **brouilleur de polarisation** est inséré dans le montage (voir Figure III.2) ; il est placé arbitrairement sur le bras de l'oscillateur local qui change de manière aléatoire sa polarisation. Il pourrait être également inséré juste après la génération des impulsions optiques. Grâce au moyennage des acquisitions, le montage sera indépendant de cette variable [133].

Le signal optique incident, juste avant sa détection par le photo-détecteur, est la somme des signaux OL_{opt} et B_{spt} . Par conséquent, le signal électrique en sortie du photo-détecteur $S(t, \nu)$ à l'instant t est leur multiplication et vaut :

$$S(t, \nu) = A_{OL} \cdot A_{spt} \cdot \underbrace{\{e^{jt(\nu_{OL}-\nu_B)} + e^{jt(\nu_{OL}+\nu_B)}\}}_{\text{Signal de battement}} \quad \text{III.2}$$

En dehors de la bande
passante de la photodiode

Le second élément de cette équation est en dehors de la bande passante de la photodiode et ne sera pas pris en compte ; $S(t, \nu)$, après filtrage, devient :

$$S_{filtré}(t, f) = 2 \sqrt{A_{OL}^2 \cdot A_{spt}^2} \cdot \cos[t(\nu_{OL} - \nu_B)] \quad \text{III.3}$$

Le signal résultant $S_{filtré}(t, f)$ a donc une fréquence électrique f égale à la différence des deux fréquences optiques $f_B = |\nu_{OL} - \nu_B|$; elle sera appelée **fréquence de battement**. Si la fréquence optique ν_{OL} est, par exemple, égale à celle du laser ν_0 , la valeur de la fréquence de battement f_B est de l'ordre de 11 GHz.

Grâce à la détection cohérente, l'amplitude du signal de battement vaut $2 \cdot A_{OL} \cdot A_{spt}$. Il est alors judicieux de maximiser au moins l'un des deux signaux optiques avant leur détection. Dans le système réalisé, un photo-détecteur simple (non-équilibré) est utilisé ; un coupleur 99/1 est alors employé pour garder la puissance maximale des rétrodiffusions Brillouin spontanées. En raison de l'atténuation engendrée par le coupleur, le signal de l'oscillateur local est amplifié avec un EDFA jusqu'à 1 mW avant le coupleur (valeur définie par la puissance maximale continue acceptée par le détecteur). Il serait toutefois possible d'amplifier optiquement le signal $B_{spt}(t, \nu_B)$ au risque d'augmenter l'émission spontanée dans l'EDFA et la composante Rayleigh. Cela ajouterait du bruit lors de la détection de l'onde Brillouin et un

filtre optique très fin (un réseau de Bragg réglé en température, par exemple) devrait alors être mis en place pour ne sélectionner que la composante Brillouin d'intérêt. Pour simplifier le système, nous n'implémenterons pas cette solution.

III.B.2 Analyse par balayage électrique du spectre de gain Brillouin

Le processus de traitement et le schéma de détection électronique du système de mesure, donnés à la Figure I.28 (chapitre I), sont analysés dans cette sous-section. Le schéma électronique de détection, ainsi que le processus de traitement sont donnés à la Figure III.3. Dans ce système, la transposition du signal Brillouin à 11 GHz vers des fréquences plus basses est réalisée par battement électrique, avec un synthétiseur de fréquence f_{s_n} et d'un mixeur haute fréquence (encadré A). En faisant varier la fréquence f_{s_n} , le balayage du spectre de gain Brillouin est possible (encadré B). Le nouveau signal, à basse fréquence, est appelé signal intermédiaire S_i , sa fréquence centrale est f_i .

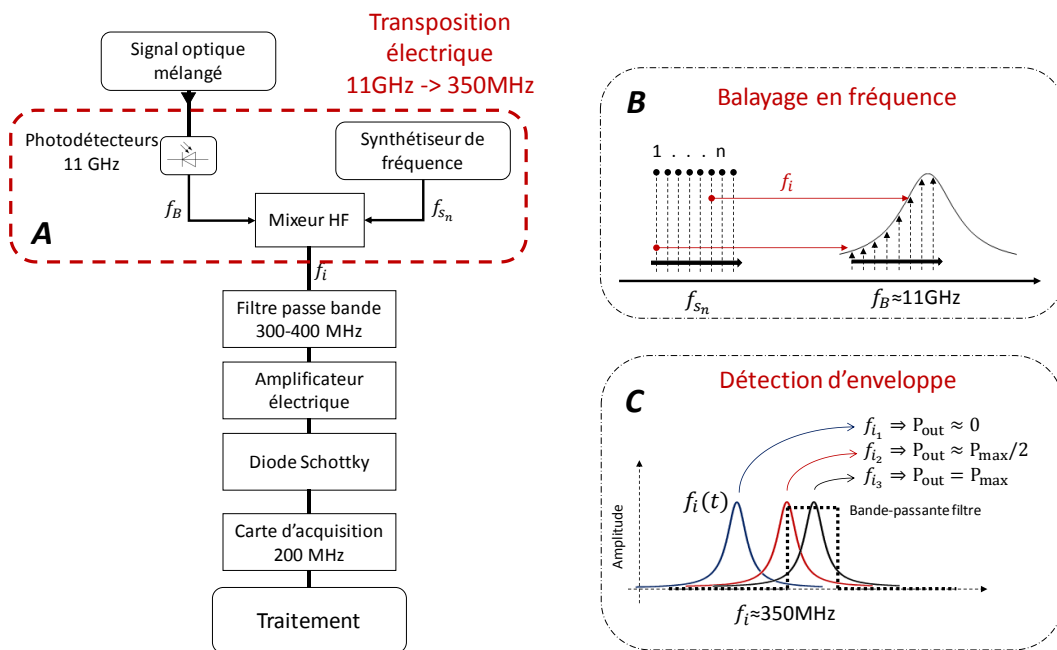


Figure III.3 Schéma électronique de détection pour une acquisition par balayage d'un système Brillouin-OTDR.

Une détection d'enveloppe est implémentée de manière à mesurer l'alignement entre le signal intermédiaire S_i et un filtre électrique passe-bande centré sur 350 MHz (encadré C). En cas d'alignement, la puissance de sortie est maximale (et inversement). La largeur du filtre électrique est déterminée de manière à respecter la résolution spatiale initialement définie par la durée des impulsions optiques ; un filtre de largeur 100 MHz est choisi car adapté à une résolution spatiale de 1 m [72]. Ce type de détection est réalisé grâce à une diode Schottky, qui est un composant électronique couramment employé pour ce

type de fonction analogique ; sa tension de sortie est directement dépendante de la puissance des signaux électriques hautes fréquences en entrée. Ce signal est ensuite numérisé par une carte d'acquisition à 200 MHz et avec une résolution verticale de 12 bits dont toute la plage dynamique est utilisée.

Le principe de l'OTDR est utilisé afin d'étendre la mesure à chacune des positions de la fibre optique capteur. Cela se fait par l'analyse temporelle de la fréquence f_B du signal $S_{filtré}(t, f_B)$ qui donnera alors l'information du décalage de la fréquence Brillouin, correspondant aux variations locales de déformation et de température le long de la fibre optique. La Figure III.4 représente le spectre expérimental de gain Brillouin d'un moyen d'essai (réalisé par Vincent Lanticq) ; il s'agit d'une fibre optique (LEAF) enroulée, avec différentes tensions de serrage, autour d'un cylindre métallique [72]. La figure centrale (surface) est acquise par analyse temporelle et balayage sur une large plage de fréquence. Dans la partie gauche de la figure, un exemple de trace de gain Brillouin, sur toute la fibre, est donné pour la fréquence à +11 MHz par rapport à la fréquence centrale moyenne. Par correspondance avec une fonction lorentzienne $F_{lorentzienne}(v)$, la fréquence centrale ν_B est estimée pour chacune des positions d de la fibre optique ; un exemple est donné sur la partie supérieure de la figure pour la position 230 m. La fonction lorentzienne est alors définie par :

$$F_{lorentzienne}(d, \nu) = a * \left(\frac{2}{\pi * FWHM} \right) * \frac{1}{1 + \left(\frac{(\nu - \nu_B(d))}{FWHM/2} \right)^2} + DC \quad \text{III.4}$$

avec a son amplitude, $FWHM$ sa largeur à mi-hauteur et DC une composante continue.

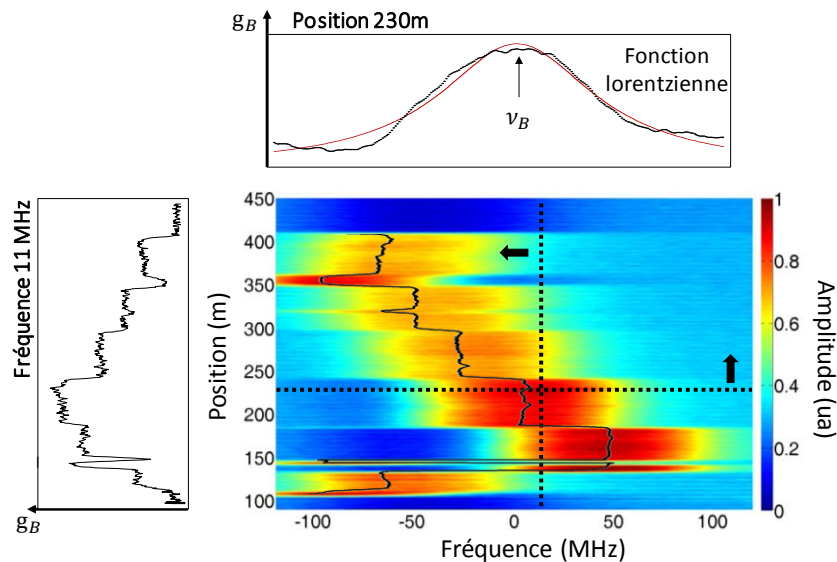


Figure III.4 Spectre expérimental de gain Brillouin réparti représenté par la surface. La courbe noire est la courbe de fréquence centrale ν_{B0} . Le graphique de gauche représente une trace temporelle pour une fréquence d'analyse à +11 MHz et le graphique du

haut représente la forme de la courbe de gain Brillouin à une position donnée (position 230 m).

III.B.3 Génération des impulsions optiques

Lorsque l'analyse est faite dans le domaine temporel, il est nécessaire d'injecter une impulsion optique dans la fibre optique. Cette dernière se propage et la position de l'interaction Brillouin est localisée par la mesure du temps aller-retour de la lumière (voir chapitre I). Le système de génération d'impulsion, développé durant cette thèse et illustré à la Figure III.5, est composé des trois équipements électro-optiques suivants :

- Un **Modulateur Electro-Optique (MEO)** dont la bande passante électrique en entrée est supérieure à 1 GHz.
- Un amplificateur de signaux optiques de type **Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)** dont la puissance moyenne de sortie maximum est de 100 mW.
- Un **Modulateur Acousto-Optique (MAO)** dont la bande passante électrique en entrée est d'environ 0.1 GHz - il induit par ailleurs un décalage en fréquence de $\nu_{a^+} = 110$ MHz.

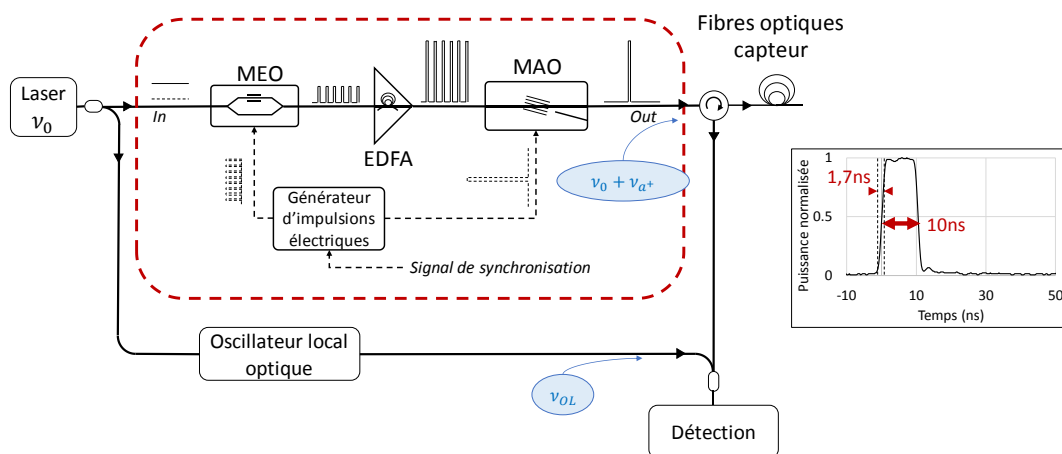


Figure III.5 Système de génération d'impulsions courtes et de fortes puissances grâce à un Modulateur Electro-Optique (MEO), un Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) et un Modulateur Acousto-Optique (MAO).

A partir d'une onde optique continue de puissance P_{in} (inférieure à 30 mW), le MEO génère des impulsions optiques de courte durée (comprise entre 4 ns et 100 ns) mais de fréquence de répétition de quelques centaines de KHz ou de quelques MHz. Ensuite, l'EDFA, en raison de son principe de fonctionnement, amplifie la valeur moyenne du signal optique de son entrée et augmente ainsi la puissance crête de ces impulsions. Enfin, le MAO isole une seule impulsion optique parmi N et assure un taux d'extinction

supérieur à 60 dB. Le temps entre deux impulsions en sortie du système est défini en fonction de la longueur totale de fibre optique. Le MAO induit un décalage en fréquence de $\nu_{A^+} = +110 \text{ MHz}$, qui devra être pris en compte pour l'analyse de la fréquence de battement lors de l'acquisition. Ces impulsions sont ensuite injectées dans la fibre optique capteur via un circulateur.

L'encadré de la Figure III.5 est un exemple de forme d'impulsion générée par notre système ; sa puissance crête peut atteindre plusieurs Watts sur une durée d'environ 10 ns avec un temps de montée inférieur à 2 ns. Cependant, elle sera limitée à 1 W afin de rester dans un régime de rétrodiffusion spontanée et de limiter l'effet Kerr, responsable de l'auto-modulation de phase, réduisant les performances du système à longue portée [134]. Cet effet dépend de la variation temporelle de puissance lors de la propagation de l'impulsion dans la fibre optique et a pour conséquence de modifier la fréquence optique de l'onde incidente.

La Figure III.6 montre l'évolution de la puissance crête des impulsions en fonction de la période de répétition et la durée des impulsions optiques générées par le MEO. La courbe de gauche est obtenue en fixant la période de répétition à 1 μs et celle de droite en fixant la largeur d'impulsion à 10 ns. Dans les deux cas, la puissance maximale atteint 40 dBm, soit 10,6 W. Le gain d'amplification de l'EDFA pourrait être aussi ajusté mais, afin de rester dans un régime de fonctionnement saturé, quels que soient les paramètres d'entrée du MEO, il est paramétré sur son gain maximal. En régime continu, cet EDFA peut fournir une puissance de 21 dBm.

Garder l'amplificateur dans un régime saturé lui permet de ne pas distordre la forme de l'impulsion. La durée de l'impulsion doit être inférieure à 100 ns [135] ; dans le cas contraire, le début de l'impulsion verra sa puissance augmentée au profit de la fin de celle-ci.

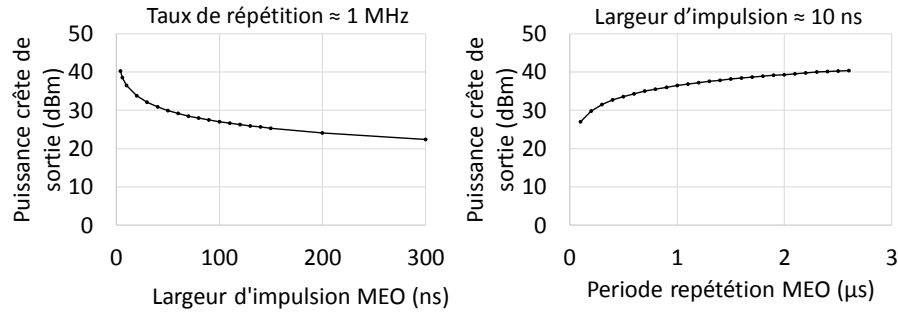


Figure III.6 Evolution de la puissance crête des impulsions optiques selon leur durée avec un taux de répétition fixé à 1 MHz (gauche) et selon leur période de répétition pour une durée d’impulsion fixé à 10 ns (droite).

III.C Méthode d’analyse avec oscillateur local adaptatif

Dans la section précédente, la fréquence de l’oscillateur local du système Brillouin est à la même longueur d’onde que le laser (ν_0). La détection cohérente réalisée fournit donc un signal f_B haute fréquence, de l’ordre de 11GHz. Un photo-détecteur de large bande passante est alors indispensable. De même, un générateur de signaux électriques f_s hautes fréquences est nécessaire pour ramener le signal en bande de base f_i et permettre le balayage.

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons une méthode optique de réduction de la bande passante du photo-détecteur et de simplification du schéma de détection. Dans un premier temps, l’intérêt de l’emploi de cette gamme de photo-détecteur est expliqué en termes de rapport signal à bruit. Ensuite, nous détaillerons la méthode optique d’analyse du spectre de gain Brillouin mise en place. Celle-ci comprend deux étapes : la mise en place d’une fibre optique de référence et la modulation de la fréquence optique de l’oscillateur local pour l’analyse du spectre de gain Brillouin. Enfin, le schéma de détection adapté est présenté.

III.C.1 Avantage de la réduction de la bande passante

En plus de l’aspect financier, la réduction de la bande passante du photo-détecteur s’accompagne d’un faible niveau de bruit thermique B_{th} défini par [136]:

$$B_{th} = 4k_B T \frac{B_e}{R_{ch}} \tag{III.5}$$

avec k_B la constante de Boltzmann, T la température et R_{ch} la résistance de charge.

Deux types de bruit altèrent la qualité de réception des signaux optiques : le bruit quantique (*shot noise* en anglais) et le bruit thermique (*thermal noise* en anglais). Le premier est un bruit proportionnel à la puissance reçue par la surface sensible du photo-détecteur ; le second provient de l’agitation thermique

des électrons dans les composants électriques et dépend de la résistance de charge. Le bruit thermique est souvent supérieur au bruit quantique et cela est d'autant plus vrai que la puissance incidente est faible et que la résistance de charge est faible. Pour une détection cohérente, l'objectif est de maximiser la puissance optique afin de minimiser le bruit thermique (de valeur constante quel que soit le signal incident).

Deux détecteurs ont été testés au cours des expérimentations. Le premier possède une bande passante de 12 GHz et un gain de détection à 1550 nm de 400V/W. Le second possède une bande passante de 1,5 GHz et un gain de détection à 1550 nm de 1100V/W. A puissance optique maximale d'entrée de la photodiode (la puissance de l'oscillateur local est adaptée), le gain d'utilisation de la seconde photodiode par rapport à la première, exprimé en rapport signal à bruit et mesuré expérimentalement, est de +10 dB pour l'analyse d'un même signal dont la fréquence est comprise entre 300 et 400 MHz (correspondant à la bande passante du filtre de détection).

Dans le cas où un coupleur 50/50 est utilisé pour mélanger deux ondes optiques, l'emploi d'un photo-détecteur équilibré permet de réduire le bruit d'intensité de l'oscillateur local optique et de supprimer également la composante continue du signal électrique de sortie [136]. Ce type de détecteur utilise toute la puissance disponible des signaux (en évitant l'atténuation intrinsèque de 3 dB sur chacune des sorties du coupleur). Malgré ces avantages, par soucis de simplicité et de disponibilité, un détecteur simple sera employé.

III.C.2 Fibre optique de référence

Afin d'obtenir une fréquence de battement dont l'analyse nécessite des équipements électriques de bande passante faible, un amplificateur optique, un circulateur et une fibre optique, appelée **fibre optique de référence**, sont insérés dans le bras de l'oscillateur local. Le nouveau schéma optique est donné à la Figure III.7. Cette architecture opto-électronique a déjà été utilisée sous différentes manières dans plusieurs publications scientifiques [81, 137-139].

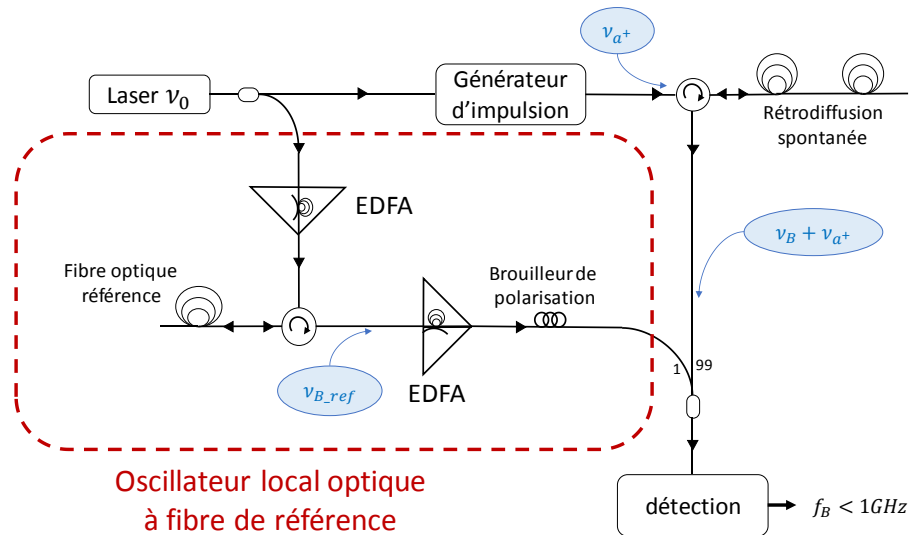


Figure III.7 Montage optique pour l'oscillateur local adaptatif incluant la fibre optique de référence et le système de modulation de la fréquence optique permettant une mesure répartie et dynamique par flanc de frange des rétrodiffusions Brillouin spontanée.

Grâce à l'amplificateur optique, la puissance optique injectée dans la fibre de référence est supérieure à la puissance seuil Brillouin. Par conséquent, la puissance rétrodiffusée est essentiellement portée par la composante Stokes, dont la fréquence de décalage est de l'ordre de 11 GHz, en raison du régime stimulé établi. Un exemple de résultat expérimental est donné à la Figure III.8 : celle de gauche est enregistrée avec un analyseur de spectre optique (OSA-APEX) et celle de droite avec un analyseur de spectre électrique. Le taux d'extinction entre les composantes Brillouin Stokes et Rayleigh est de 38 dB et la composante Brillouin Anti-Stokes est absente. La composante Stokes, récupérée par la troisième branche du circulateur, a une forme gaussienne et sa largeur à mi-hauteur est de 7.5 MHz. Ces caractéristiques proviennent de la forte puissance optique injectée, qui est largement supérieure au seuil de gain Brillouin, dans la fibre optique [140]. Elles ont été mesurées expérimentalement grâce à un montage classique de mesure de gain Brillouin par détection cohérente. Les caractéristiques de la fibre optique choisie sont les suivantes :

- Nom : fibre optique monomode G.652 – SMF-28 Ultra-Low [141]
- Longueur physique : 10 km
- Indice de réfraction ($\lambda_0 = 1550\text{ nm}$) : 1.46
- Atténuation ($\lambda_0 = 1550\text{ nm}$) : $\leq 0.17\text{ dB/km}$
- Fréquence de décalage Brillouin ν_B pour $\lambda_0 = 1560\text{ nm}$: 10.920 GHz
- Seuil Brillouin de puissance : 10.5 mW

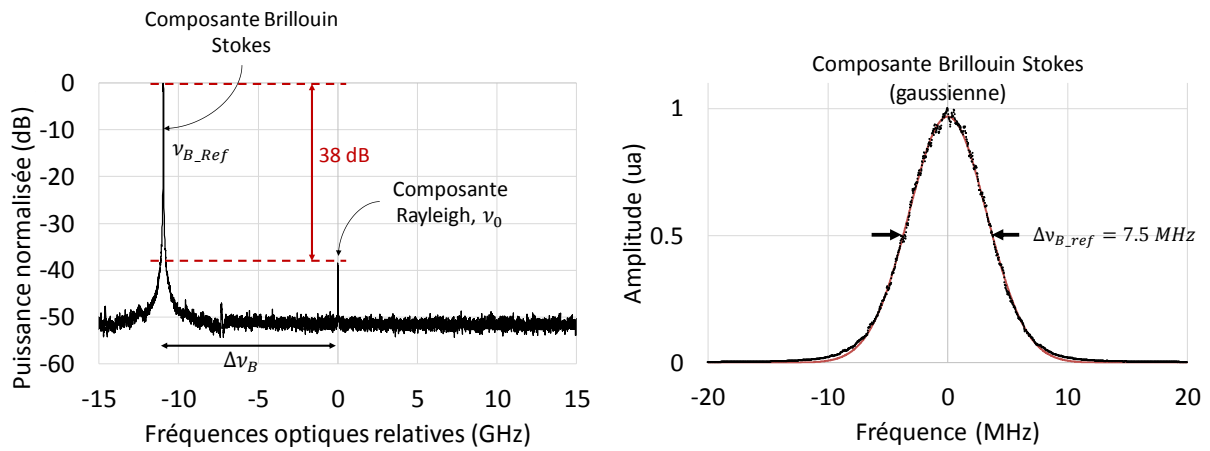


Figure III.8 **Gauche** : spectre de rétrodiffusion stimulé de la fibre de référence pour une puissance optique continue de 20 dBm à son entrée. La mesure est réalisée avec un analyseur de spectre optique (APEX) dont la résolution est de 20 MHz. La fréquence de décalage Brillouin $\Delta\nu_B$ est de 10.920 GHz. **Droite** : spectre de gain Brillouin expérimental (pointillés noirs) de largeur de raie (7.5 MHz) estimée via une correspondance avec une fonction gaussienne (courbe rouge).

La Figure III.9 récapitule les interactions entre les différents signaux résultant d'une telle modification. La détection cohérente entre des rétrodiffusions Brillouin et le nouvel oscillateur local optique (dont la fréquence est $\Delta\nu_{B_ref}$), induit une réduction directe de la fréquence de battement f_B , dont la valeur dépend des caractéristiques des fibres de référence et capteur.

Dans notre cas, la valeur de la fréquence de décalage Brillouin $\Delta\nu_B$ est égale à 10,920 GHz ; elle est considérée comme fixe en raison de la stabilité des conditions de température et de déformation de la fibre de référence (régulation de la température de la pièce, fibre enroulée sans touret et dans une boîte).

L'analyse du spectre de gain Brillouin peut désormais se faire via l'emploi de composants électriques dont la bande passante est inférieure à 1 GHz (selon le choix des fibres optiques capteur et référence). De manière générale, les fibres optiques couramment employées, en instrumentation ou dans les télécommunications (norme G.652), ont une fréquence de décalage Brillouin comprise entre 10 GHz et 11 GHz. Un schéma de détection, similaire à celui présenté à la section III.B.2, est utilisé pour l'analyse du spectre de gain Brillouin tout au long de la fibre optique ; ensuite, la fréquence Brillouin centrale est extraite par correspondance avec une fonction lorentzienne.

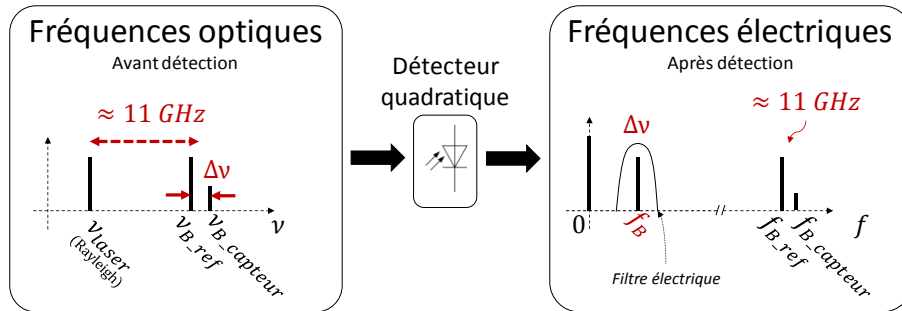


Figure III.9 Schéma de spectre optique et électrique avant et après détection cohérente, illustrant la méthode d'analyse de l'intensité du gain Brillouin par détection d'enveloppe.

III.C.3 Oscillateur local adaptatif

L'ajout d'une fibre optique de référence permet de réduire de manière optique la fréquence de battement f_B obtenue par détection cohérente ; mais le balayage du spectre de gain Brillouin reste électrique. Dans cette section, l'implémentation d'une méthode tout optique pour effectuer ce balayage est détaillée. La Figure III.10 montre la modification supplémentaire implémentée sur le bras de l'oscillateur local : ajout d'un système d'ajustement arbitraire de la fréquence optique du signal issu de la fibre de référence. Il permet de faire varier la fréquence d'analyse au cours du temps et de placer notre point de détection à l'endroit souhaité sur le spectre de gain Brillouin en fonction de la distance dans la fibre. Ce montage sera appelé **oscillateur local adaptatif**.

La technique se base sur l'emploi d'un modulateur I&Q optique : c'est un composant électro-optique couramment utilisé dans le domaine des télécommunications pour moduler en phase et en amplitude des signaux optiques selon deux fonctions de modulation, nommées I et Q . La modulation en quadrature de ces dernières permet alors le contrôle de la fréquence optique de sortie du composant optique. En sortie du modulateur I&Q, la fréquence du signal optique est donc décalée d'une valeur correspondant à la fréquence des signaux I et Q . Ce type de modulation est appelé modulation à bande latérale unique (*Single Side Band Modulation, SSBM* en anglais) en raison de l'absence théorique, dans le signal de sortie, de la fréquence porteuse et d'une des deux bandes latérales. Leur taux d'extinction, en pratique, est de 30 dB.

Dans le système proposé, le modulateur I&Q est contrôlé par un oscillateur contrôlé en tension (*Voltage Control Oscillator, VCO* en anglais), lui-même commandé par un générateur de signal arbitraire (*Arbitrary Waveform Generator, AWG* en anglais). Un oscillateur contrôlé en tension est un composant électronique qui permet de générer un signal électrique d'amplitude constante mais dont la fréquence est contrôlée par la valeur de sa tension d'entrée ; un générateur de signal arbitraire est un équipement électronique capable de générer un signal électrique dont les caractéristiques (amplitude, fréquence, phase, etc.) ont été choisies par son utilisateur.

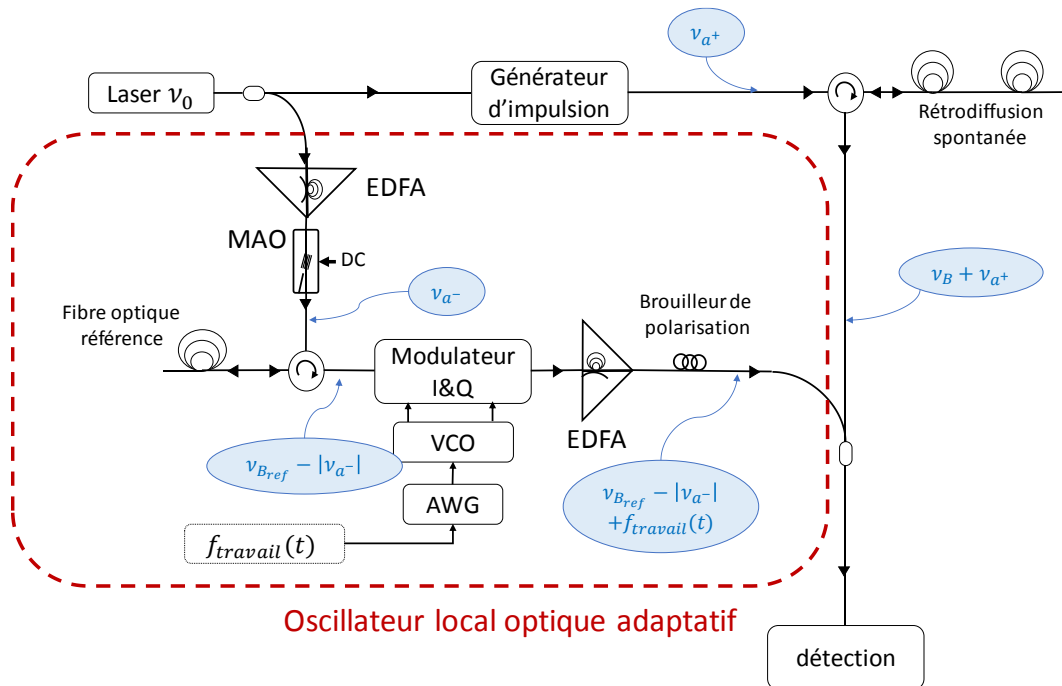


Figure III.10 Schéma opto-électronique pour la mesure Brillouin par flanc de frange avec oscillateur local adaptatif.

Ainsi, pour chaque valeur de tension, à un instant t donné, en entrée du VCO (soit en sortie de l'AWG), son signal de sortie contient une seule composante fréquentielle ; elle est appelée $f_{travail}(t)$. Cette dernière est ensuite injectée dans un coupleur électrique hybride 90° permettant de générer les deux fonctions I et Q dont le déphasage relatif doit être de 90° . Par ailleurs, pour limiter l'apparition d'harmonique sur la modulation optique en raison de l'amplificateur électrique contrôlant l'entrée du modulateur I&Q, la sortie du VCO et l'entrée du modulateur I&Q sont filtrées. Ces deux filtres passe-bandes ne sont pas notés sur le schéma de la Figure III.10.

La forme du spectre optique obtenue, après mélange avec les rétrodiffusions Brillouin spontanée, est montrée à la Figure III.11. L'amplitude de ces dernières a volontairement été amplifiée en allongeant à plusieurs microsecondes la durée des impulsions optiques afin de les distinguer vis-à-vis des autres signaux. La courbe est centrée sur la fréquence optique issue de la fibre de référence, soit la composante Brillouin Stokes, comme expliqué à la section précédente. En raison de la présence d'un modulateur acousto-optique avant le circulateur, la fréquence absolue de la rétrodiffusion, avant modulation I&Q, est $v_{Bref} + v_{a^-}$.

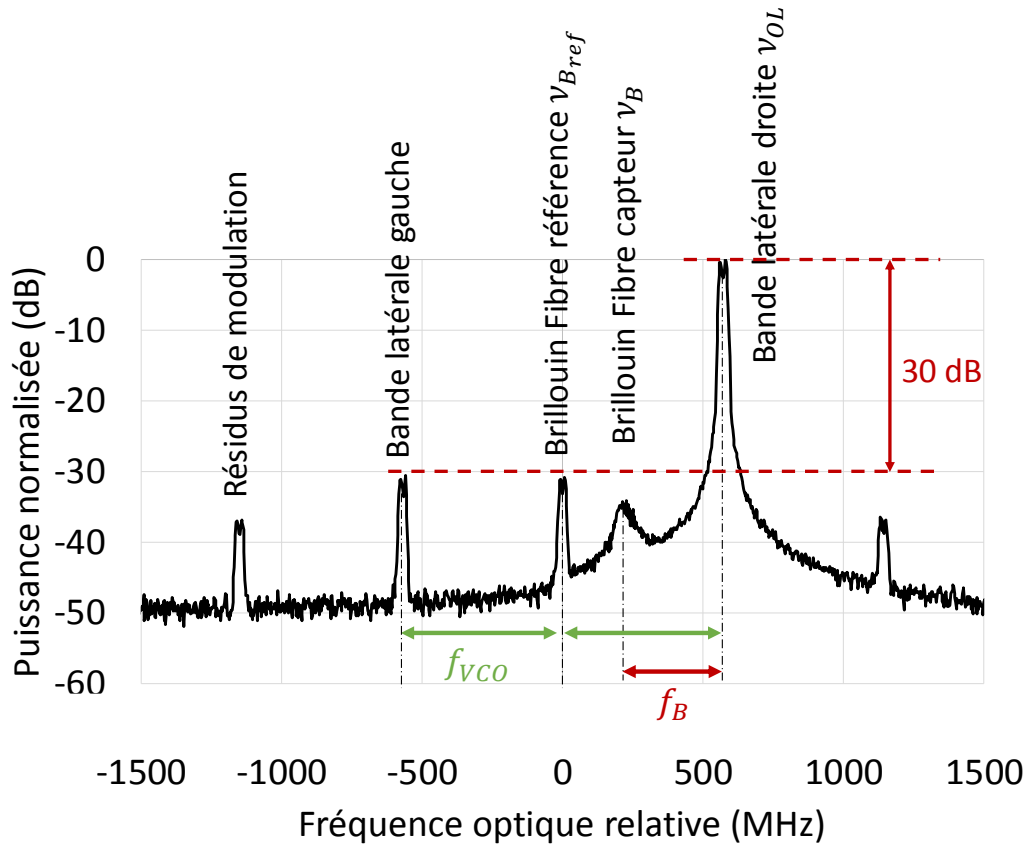


Figure III.11 Spectre optique expérimental (Analyseur de spectre optique Apex) montrant, après mélange, l'oscillateur local et la rétrodiffusion Brillouin issue de la fibre capteur. Le signal Brillouin a été volontairement amplifié pour sa distinction sur la figure.

L'écart de fréquence entre la composante centrale $\nu_{B_{ref}}$ et la rétrodiffusion Brillouin ν_B vaut 220 MHz. Cette valeur s'explique par la présence de deux modulateurs acousto-optiques dans le montage : un sur le bras de la fibre capteur pour générer les impulsions et l'autre sur celui de la fibre de référence (Figure III.10). Les décalages fréquentiels induits entre les rétrodiffusions Brillouin de chacune des fibres sont de $|\nu_{A^+} - \nu_{A^-}|$.

Pour conclure, la fréquence optique absolue de la composante principale de ce nouvel oscillateur local ν_{OL} est définie par :

$$\nu_{OL}(t) = \nu_0 - \nu_{B_{ref}} + \nu_{A^-} + f_{travail}(t) \quad \text{III.1}$$

III.C.4 Schéma de détection adapté

Tout d’abord, en raison des équipements et des fibres optiques disponibles à Cementys et à Télécom Paristech, le même type de fibre est utilisé pour la fibre capteur et pour la fibre de référence. Ce choix permet de faciliter l’ajustement des fréquences optiques qui correspond à notre système de détection. Dans ce cas, et grâce au principe de détection cohérente employé, la fréquence électrique de battement ne dépend que de l’écart de fréquence optique entre les rétrodiffusions de la fibre capteur et l’oscillateur local. Par conséquent, la valeur de la fréquence de décalage de la fibre optique employée n’est pas un paramètre important pour notre montage. Néanmoins, tous types de fibre optique (norme G.652) pourraient être utilisés dans notre système tant que sa réponse Brillouin ne contient qu’un seul pic principal de gain Brillouin. Dans le cas contraire et si l’amplitude de ces modes acoustiques est de même ordre de grandeur, il pourrait se trouver un cas où la fréquence de battement entre un des pics secondaires et un résidu de modulation I&Q tombe dans la bande passante du filtre. Cela entraînerait alors une distorsion du spectre de gain Brillouin lors des analyses par balayage ou par flanc de frange.

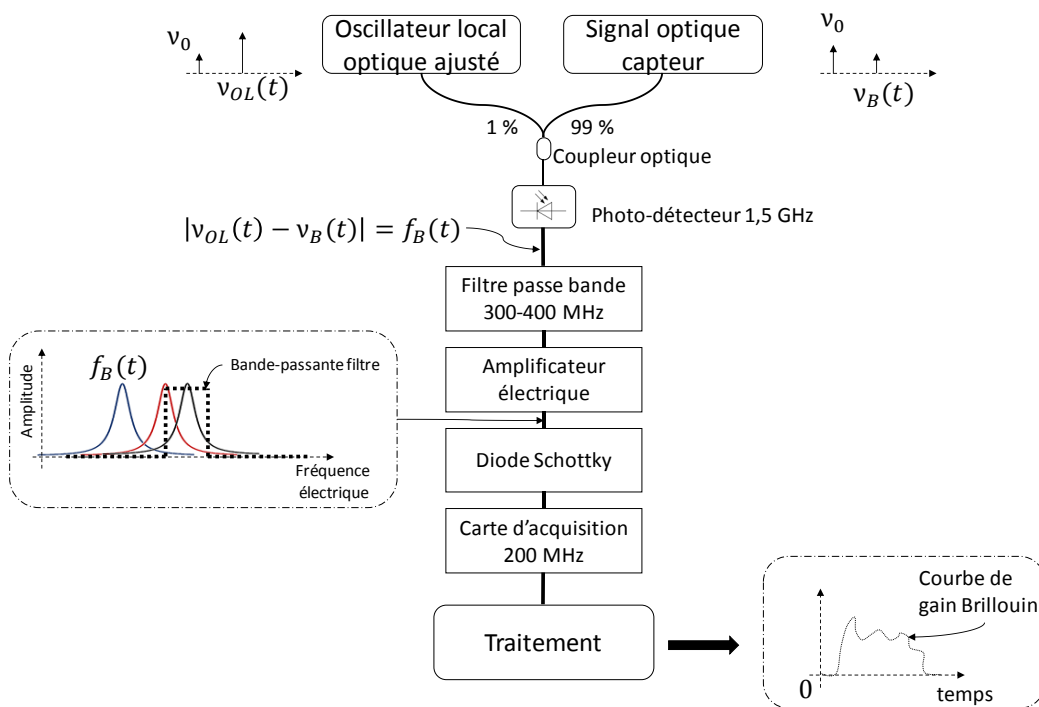


Figure III.12 Montage opto-électronique de détection pour la mesure OTDR du gain Brillouin. L’encadré de gauche illustre la détection selon l’alignement du pic de gain Brillouin avec un filtre électrique dont la bande passante est fixe.

Grâce aux modifications effectuées, et détaillées dans les deux sections précédentes, le système de mesure se différencie des systèmes classiques (vu à la section III.B) par l’ajustement de la fréquence optique de l’oscillateur local. Cela lui permet alors de balayer de manière arbitraire le spectre de gain Brillouin en fonction de la distance.

La Figure III.12 est le schéma de détection employé par le nouveau système de mesure. Il est similaire au schéma de la Figure III.3 (p.117), hormis le choix de la fréquence analysée qui est fait en amont du photo-détecteur. Après mélange et détection des signaux optiques (oscillateur local ajusté et rétrodiffusion Brillouin), le signal électrique est filtré et amplifié. La détection d'enveloppe est toujours réalisée grâce à une diode Schottky et son signal de sortie est simplement numérisé avec une carte d'acquisition.

III.C.5 Synthèse des signaux de détection

Dans cette section, nous faisons un rappel sur l'ensemble des signaux optiques mis en jeu dans l'analyse optique du système expliqué dans les sections précédentes. Ces signaux sont tous issus de la même source laser, à la fréquence ν_0 :

- Le signal optique allant vers **la fibre capteur** passe via un modulateur acousto-optique, dont le décalage en fréquence est de +110 MHz, pour générer les impulsions (voir section III.B.3). Le décalage de la fréquence Brillouin des rétrodiffusions spontanées aura alors une valeur de $10,920 + 0,110 = 11,03$ GHz (pour un état de déformation sans contrainte et à température ambiante).
- **L'oscillateur local optique** est décalé de manière constante via un modulateur acousto-optique et par l'utilisation d'une fibre optique de référence (voir section III.C.2), soit un décalage de $10,920 - 0,110 = 10,81$ GHz. Il est aussi ajusté en fréquence par le modulateur I&Q dont la plage de modulation est comprise entre +0.400 GHz et +0.800 GHz (voir section III.C.3).

Par conséquent, pour une fibre optique capteur libre de toute contrainte et à température ambiante (environ 20°C), après la détection cohérente, la fréquence de battement f_B est comprise, à l'instant t , entre

$$\begin{aligned}
 f_B(t) &= \left| \underbrace{\left(\Delta\nu_{B_{Ref}} + \nu_{A^-} + f_{travail}(t) \right)}_{\text{Oscillateur local optique}} - \underbrace{\left(\Delta\nu_B + \nu_{A^+} + \Delta\nu_{déf}(t) \right)}_{\text{Rétrodiffusion Brillouin capteur}} \right| & \text{III.2} \\
 &= \left| (10,920 - 0,11 + [0,400 \rightarrow 0,800]) - (10,920 + 0,11 + \Delta\nu_{déf}(t)) \right| \\
 &= [0,180 \rightarrow 0,580] \text{ MHz} + \Delta\nu_{déf}(t)
 \end{aligned}$$

avec $f_{travail}(t)$ le décalage de la composante droite de la modulation I&Q, $\Delta\nu_B$ la composante Stokes de la rétrodiffusion Brillouin de la fibre capteur (mesure statique) et $\Delta\nu_{déf}(t)$ les déformations (positives ou négatives) apparues après la mesure statique (mesure dynamique).

En considérant le spectre optique de la Figure III.11, où la fréquence de modulation I&Q est de 0,570 GHz, la fréquence de battement f_B vaut $350 \text{ MHz} + \Delta\nu_{déf}(t)$. Dans ce cas, étant donné l'alignement avec le filtre de détection dans cette configuration, le signal numérisé est maximal. Cela est démontré à

la Figure III.13, obtenue avec un analyseur de spectre électrique. Il s'agit du spectre électrique de battement. Le filtre électrique est représenté en pointillés – sa largeur est de 100 MHz et est centré sur 350 MHz. Ainsi, si les fibres de référence et capteur sont identiques (même fréquence de décalage Brillouin $\Delta\nu_B$ dans les mêmes conditions), la plage de spectre Brillouin, que le système SA-BOTDR est capable d'analyser, est comprise entre $[\Delta\nu_B - 170 ; \Delta\nu_B + 230]$ MHz.

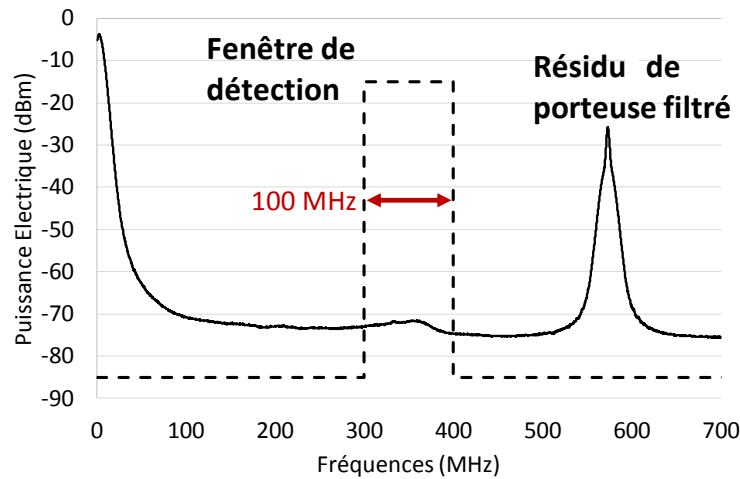


Figure III.13 Spectre électrique de battement après détection quadratique, obtenu avec un analyseur de spectre électrique. La fenêtre de détection correspond au filtre passe-bande centré sur 350 MHz.

La composante électrique sur la droite du spectre ($f = 570 \text{ MHz}$) est un résidu de battement en raison du taux d'extinction non infini de la modulation SSB (voir Figure III.11) ; celle-ci est peu gênante en raison de son filtrage par le filtre passe-bande de détection.

III.D Mesure expérimentale sur un démonstrateur

III.D.1 Présentation du démonstrateur

Dans le cadre de nos recherches et développement du système de mesure SA-BOTDR, un moyen d'essai instrumenté a été réalisé au sein du laboratoire d'optique de Télécom ParisTech (Figure III.14). Il consiste en un tube en acier avec les dimensions du tube suivantes :

- Longueur totale : 10,40 m
- Diamètre extérieur : 4,83 cm \pm 0,5 mm
- Epaisseur : 2,90 mm \pm 0,2 mm

L'analyse mécanique de la structure se fera, comme pour les expérimentations du chapitre II, grâce à une méthode de flexion 4 points.

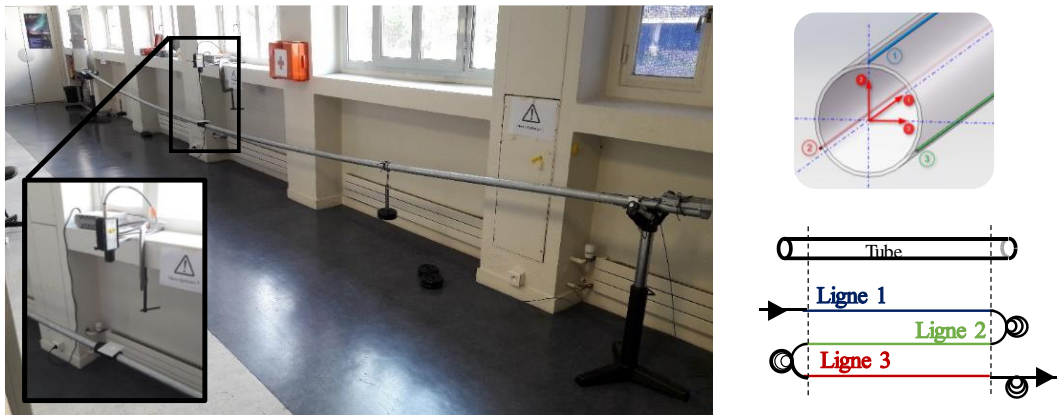


Figure III.14 Gauche : photo du démonstrateur mis en place dans le laboratoire d'optique et du capteur de distance laser permettant de valider nos résultats. Droite : Schéma représentant la position des fibres optiques sur à la surface du tube.

Les fibres optiques sont directement collées, dans une configuration longitudinale, à la surface du tube avec une protection minimale (couche d'acrylate seulement). La longueur de fibre optique analysée est de 100 m, comprenant les trois lignes de mesures à 120° autour du tube. Un déport de la zone de mesure est cependant possible jusqu'à plusieurs kilomètres sans baisse importante de la qualité des mesures (grâce aux faibles pertes linéaires de la fibre de 0.18 dB/km) que ce soit en termes d'incertitude de mesure ou de résolution spatiale. Seule la rapidité des mesures pourrait varier en raison du temps aller-retour de la lumière, inévitablement plus long. La Figure III.14 (gauche) montre une photo du démonstrateur réalisé. Il est directement relié par fibre optique au montage électro-optique conçu pour la mesure de déformation dynamique par effet Brillouin spontané.

Un capteur industriel de distance laser (en espace libre) sera utilisé pour mesurer la flèche de ce tube lors de l'application de charges. Avec sa fréquence d'acquisition de 10 Hz, il validera nos résultats de mesure dynamique.

III.D.2 Caractéristiques de gain Brillouin

III.D.2.1 Spectre de gain Brillouin réparti

La Figure III.15 est le spectre de gain Brillouin réparti expérimental obtenu avec notre système de mesure, dans une configuration d'analyse classique par balayage, sur le démonstrateur mis en place dans

le laboratoire. Comme dans le chapitre II avec les tubes en acier installés à Cementys, trois zones (correspondant aux trois lignes collées à 120°) sont identifiables en raison du collage manuel et de la déformation subie par les fibres optiques disposées en configuration longitudinale, lorsque le tube est sous son poids propre. Une longueur d’au moins 10 à 15 m a été laissée entre les lignes afin de les distinguer plus facilement sur les mesures.

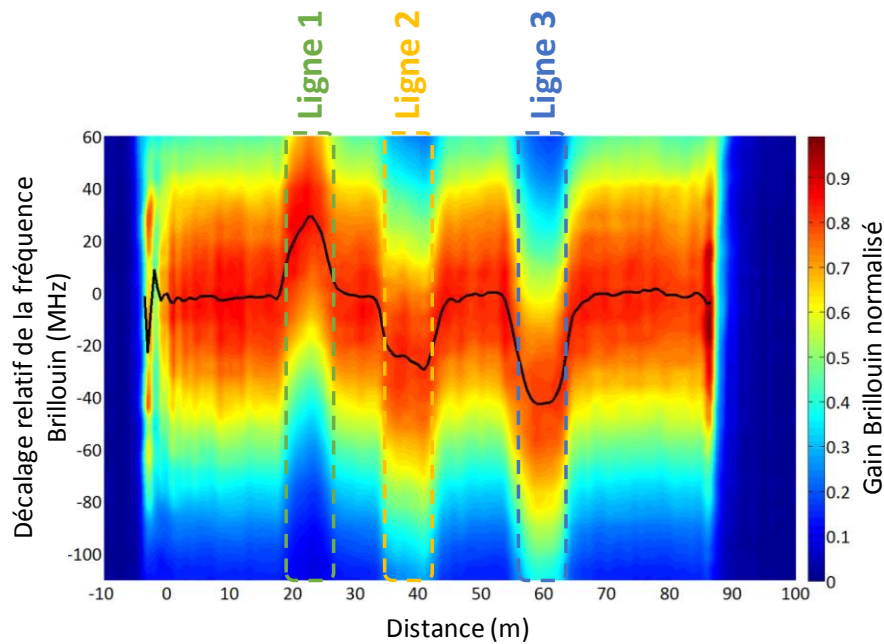


Figure III.15 Spectre réparti expérimental de gain Brillouin (surface) sur la fibre optique collée sur un tube en acier supporté par deux trépieds sous son poids propre. La courbe noire représente la fréquence Brillouin centrale $\Delta\nu_{B0}$.

Le système SA-BOTDR est configuré de la manière suivante :

- Résolution spatiale : 1 m (soit une durée d’impulsion de 10 ns)
- Echantillonnage spatial : 0,5 m
- Plage de fréquence analysée : 180 MHz¹ (par pas de 5 MHz)
- Résolution fréquentielle : 4 MHz
- Temps total d’acquisition : 15 secondes
- Incertitude : inférieure à 1 MHz (soit inférieure à 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ en termes de déformation)

¹ La plage de fréquence de balayage de notre système est actuellement limitée par la plage de tension de sortie du générateur de fonction arbitraire comprise entre 0 V et 2,5 V, limitant alors l’excursion du VCO.

Une correspondance avec une fonction lorentzienne pour chacun des points de la ligne optique est réalisée afin d’obtenir la fréquence centrale du décalage Brillouin ν_0 en fonction de la distance de la fibre ; elle est présentée sur la Figure III.15 par la courbe noire.

III.D.2.2 Etude de la largeur à mi-hauteur

La largeur à mi-hauteur du signal dépend des différents signaux optiques et composants électriques mis en jeu dans notre système. Elle résulte du produit de convolution entre la largeur de raie Brillouin sous un régime spontané de rétrodiffusion (lorentzienne de 30 MHz de largeur), la largeur de raie de l’oscillateur local (gaussienne de 7.5 MHz), l’étalement spectral de 100 MHz (lorentzienne) en raison de la durée de 10 ns de l’impulsion optique et de la largeur de raie du laser de 5 MHz (lorentzienne). De plus, le schéma de détection contient un filtre électrique de largeur de bande passante de 100 MHz (rectangle). Sur les simulations de la Figure III.16, le résultat de convolution (à droite) des fonctions précédemment citées (à gauche) donne une largeur à mi-hauteur de 169 MHz.

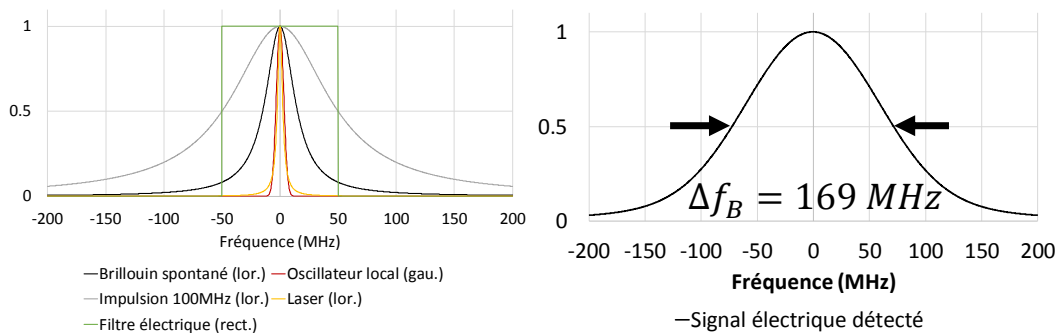


Figure III.16 **Gauche** : simulation des fonctions intermédiaires pour notre système (*gau.* : gaussienne, *lor.* : lorentzienne et *rect.* : rectangle). **Droite** : résultat de convolution.

La Figure III.17 montre la largeur à mi-hauteur obtenue expérimentalement. Elle est, en moyenne, égale à 169 MHz sur toute la fibre optique ; cette valeur est en parfait accord avec les résultats de simulation précédent. La correspondance avec une fonction lorentzienne (équation III.4) est une bonne approximation, l’erreur maximale est de 2% et l’incertitude sur la détermination de la fréquence centrale est inférieure à 0.1 MHz (soit inférieur à 2 $\mu\text{m/m}$ en termes de déformation).

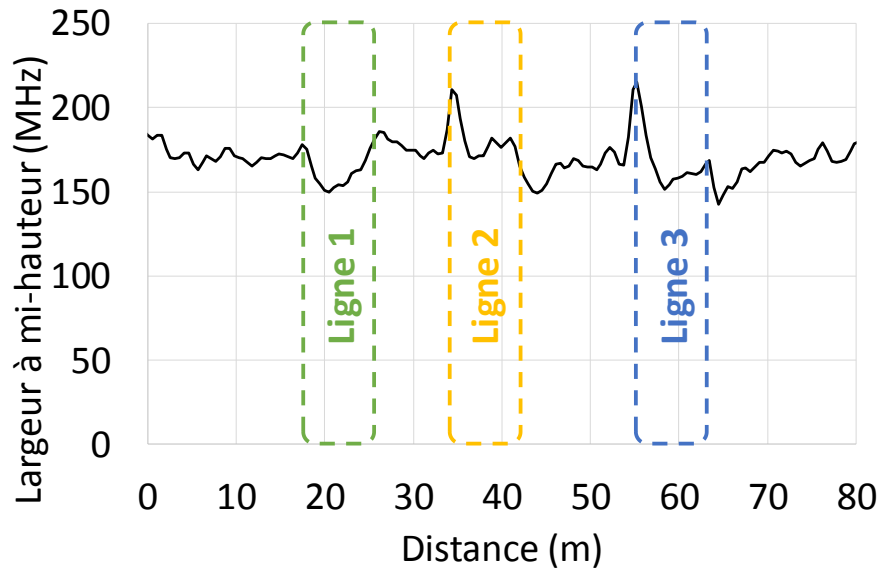


Figure III.17 Largueur à mi-hauteur expérimentale FWHM (équation III.4 p.118) tout au long de la ligne optique, dont la moyenne est de 169 MHz.

A certaines positions, cette largeur de raie s'écarte de la valeur moyenne à cause de la distorsion du spectre de gain Brillouin due à des déformations dont la longueur caractéristique est trop faible vis-à-vis de la résolution spatiale de l'analyse OTDR. Cela apparaît, en particulier, aux points où la fibre optique passe d'un état collé (contraint par la déformation du tube) à un état libre (dans les boîtiers de rangement des sur-longueurs). Lorsque la résolution spatiale est trop faible vis-à-vis des variations spatiales de déformation, le spectre de gain Brillouin se déforme – ce n'est plus une simple lorentzienne, mais une superposition de lorentzienne d'amplitude et de fréquence centrale différente [130].

III.E Nouvelle approche : mesure Brillouin par analyse en flanc de frange

Dans la section précédente, un nouveau système de mesure Brillouin est conçu et validé. Le balayage de son spectre de gain est fait de manière optique et arbitraire avec la modulation en fréquence de l'oscillateur local. Son mode d'analyse peut néanmoins être modifié afin de réaliser une mesure par flanc de frange. La possibilité d'une mesure dynamique est alors démontrée.

III.E.1.1 Méthode du Flanc de frange

Comme vu au début de ce chapitre, la mesure de déformation par effet Brillouin est effectuée par une analyse complète du spectre de gain Brillouin par balayage sur une large bande de fréquence optique (habituellement comprise entre 9 GHz et 12 GHz) en tout point de la fibre optique. De cette analyse, la

fréquence Brillouin centrale est estimée par correspondance avec une fonction lorentzienne. Cette méthode, très coûteuse en temps, doit être répétée à chaque nouvelle mesure dans le but de calculer les variations de fréquence Brillouin, correspondant alors à une déformation locale de la fibre optique.

L'acquisition par **flanc de frange** (*Slope-Assisted* en anglais) est une méthode d'analyse qui permet de réduire le temps d'analyse en s'affranchissant de l'analyse détaillée du spectre Brillouin. Pour chaque point de la fibre optique, les variations de décalage de la fréquence Brillouin $\Delta\nu_B$ sont déduites de l'analyse des variations de l'intensité du gain Brillouin Δg_B à une fréquence précise de son spectre, appelé **fréquence de travail** (*working frequency* en anglais). Une seule acquisition est alors nécessaire, ce qui réduit considérablement le temps d'acquisition par rapport à une analyse par balayage. La durée d'acquisition ne dépend alors que de la longueur de la fibre optique et du nombre de traces acquises qui sont moyennées afin de réduire le bruit électronique.

Les fréquences de travail local du système sont définies de telle manière à ce qu'elles correspondent à la pente maximale de la courbe de gain Brillouin. La sensibilité de mesure K_{ff} , lors des variations de fréquence Brillouin, est alors maximale. Il est possible de travailler sur la pente croissante ou décroissante de la courbe Brillouin ; la valeur de la sensibilité K_{ff} est alors de signe opposé.

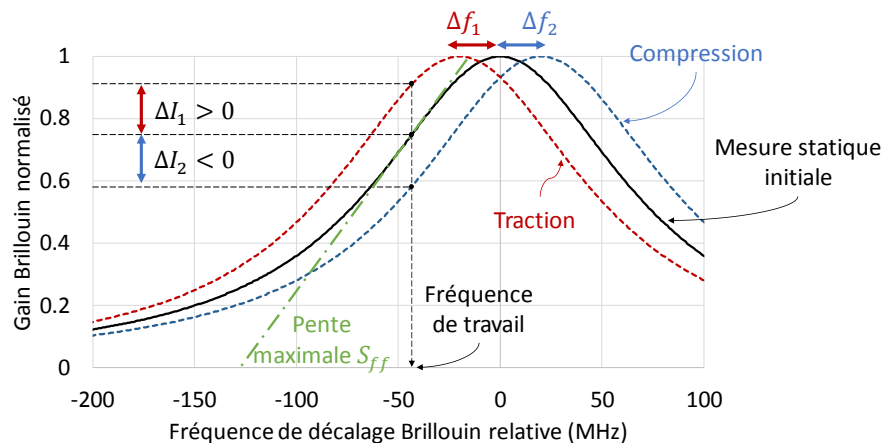


Figure III.18 Schéma explicatif de la mesure par flanc de frange. Une variation de fréquence Brillouin induit une variation d'intensité du gain à la fréquence de travail

La Figure III.18 illustre le principe de cette analyse pour un point de la fibre optique dont la courbe de gain Brillouin initiale (ou statique) est représentée en noir. La fréquence de travail et la sensibilité K_{ff} sont déduites de la recherche de sa pente maximale (droite affine verte pointillée). La variation Δf de la fréquence de la composante Brillouin induit un changement ΔI de l'intensité du gain Brillouin à la fréquence de travail. Pour une analyse sur le flanc gauche de la courbe de gain Brillouin par exemple, ΔI est positif pour une compression ou une baisse de la température locale (et inversement). Le coefficient de conversion entre ΔI et Δf est défini par la pente de la courbe lorentzienne K_{ff} , sur la mesure statique à la fréquence de travail considérée.

Cette méthode nécessite deux étapes pour réaliser une analyse complète et répartie de déformation sur toute la fibre optique :

- **Etape 1 : Mesure Brillouin statique par une méthode classique de balayage**

Le spectre de gain Brillouin statique est analysé sur toute la longueur de fibre optique ; avec la méthode de balayage en fréquence vue au début de ce chapitre. Ensuite, et par correspondance avec une fonction lorentzienne, la fréquence de décalage Brillouin en fonction de la longueur est estimée ; elle dépend généralement des conditions de pose de la fibre optique et des variations statiques de déformation et température.

Par l'étude du spectre de gain Brillouin à chacun des points de la fibre optique, la fréquence de travail optimale est alors calculée : elle correspond à la fréquence où la pente de la courbe de gain Brillouin locale est maximale. La Figure III.19 est un exemple de mesure expérimentale et traitement numérique. Cette analyse est réalisée à chacun des points de la fibre. La courbe des fréquences de travail est nommée $f_{travail}(t)$, où t représente l'espace temporel, similaire à la position sur la fibre optique capteur.

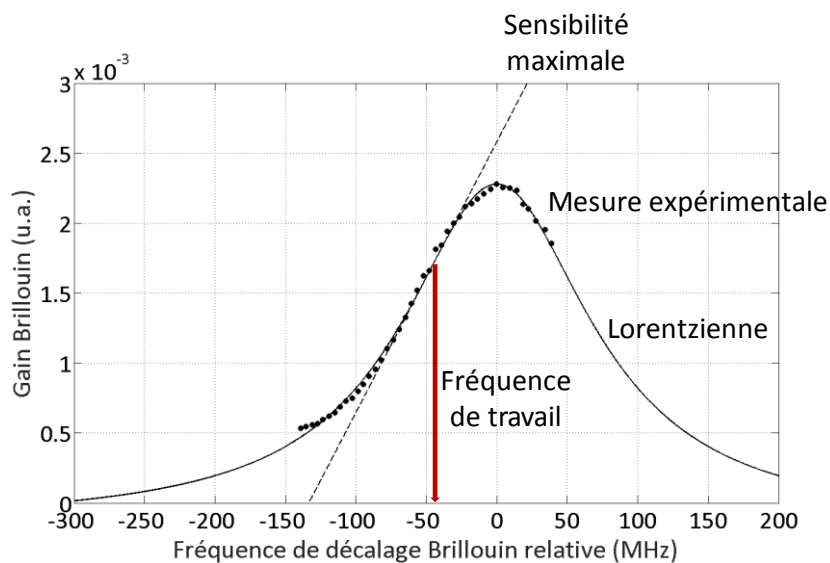


Figure III.19 Traitement numérique de correspondance avec une fonction lorentzienne : détermination de la fréquence de travail locale et de la sensibilité nécessaire à l'analyse par flanc de frange.

Au cours de nos expérimentations, nous admettrons que les variations de déformation sont négligeables lors de l'analyse par balayage. Des expérimentations de Y. Peled - section 6.4 dans sa thèse [115] - montrent que, dans le cas contraire, la forme du spectre de gain Brillouin est distordue (élargisse-

ment spectral et perte d'amplitude) ; la détermination – par correspondance avec une fonction lorentzienne - de la fréquence centrale et de travail devient délicate au-delà d'une variation sinusoïdale d'amplitude de 30 MHz (soit 600 $\mu\text{m}/\text{m}$) de la fréquence centrale Brillouin au cours de l'acquisition.

En cas de dérive dans le temps liée à un fluage mécanique ou thermique, tel qu'un effet journalier ou saisonnier, une actualisation régulière de la courbe de fréquence de travail doit être effectuée afin de maintenir les caractéristiques de détection à des niveaux optimaux.

- **Etape 2 : Mesure par flanc de frange des variations de la fréquence Brillouin**

La seconde étape consiste en la mesure du gain Brillouin local (en tout point de la fibre optique) uniquement aux fréquences de travail précédemment calculées et dont les variations reflètent les variations de la fréquence Brillouin (liées à un changement de température ou de déformation).

Expérimentalement, il est nécessaire d'adapter le montage opto-électronique pour contrôler finement la fréquence de travail au point de mesure considéré sur la fibre optique. En effet, si une seule et même fréquence de travail est utilisée pour toute la fibre optique, et que la courbe de fréquence de décalage Brillouin (statique) s'étale sur une grande plage de fréquence, alors la sensibilité de variation de fréquence Brillouin pourrait être faible ou même amener à une mauvaise interprétation des résultats.

Le temps d'analyse avec ce mode d'acquisition est drastiquement réduit : une mesure répartie et dynamique de déformation est alors possible.

III.E.1.2 Modes d'opération du SA-BOTDR

La composante optique issue de la fibre de référence possède un décalage constant en fréquence $\nu_{B_{ref}} + \nu_{a^-}$, par rapport à la fréquence laser ν_0 . Grâce à la modulation I&Q, elle est adaptée à nos besoins de suivi de la pente maximale du spectre de gain Brillouin grâce à la fonction $f_{travail}(t)$, définie lors d'une première analyse classique par balayage.

La Figure III.20 (d'après la Figure III.11, p.127) illustre le principe de l'oscillateur local adaptatif pour une acquisition en mode flanc de frange pour un système Brillouin-OTDR : **le signal optique de référence est modulé (par f_{VCO}) de manière à garder constant l'écart (f_B) entre le signal Brillouin et la bande latérale droite.**

Les variations de la fréquence de battement f_B dépendent donc uniquement des variations de fréquence de décalage Brillouin tout au long de la fibre capteur. Ainsi, si aucune variation dynamique ou statique ne vient perturber la fibre optique capteur, l'intensité électrique des signaux compris entre 300 MHz et 400 MHz - correspondant à la bande passante du filtre de détection - restera constante.

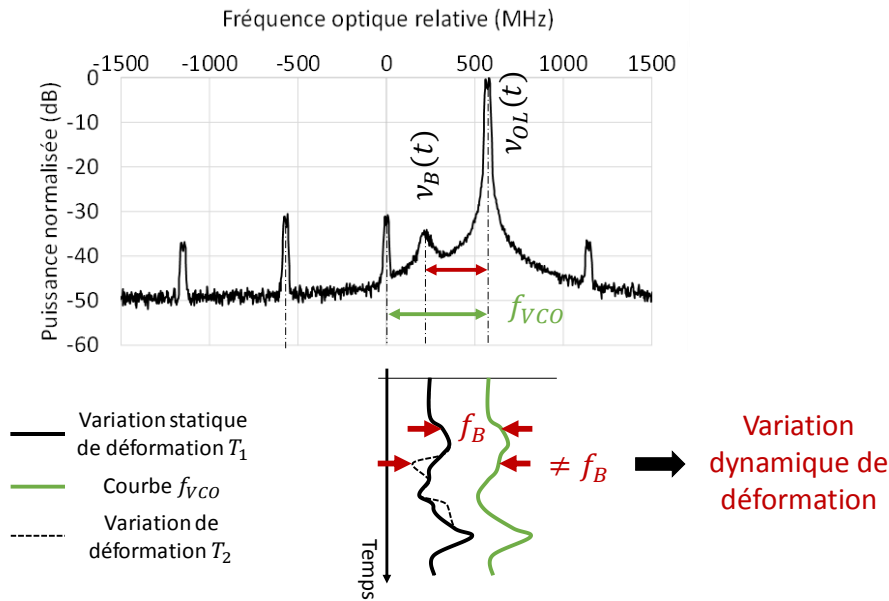


Figure III.20 Schéma pour le suivi de la fréquence de travail Grâce à l'oscillateur optique adaptatif, la fréquence de battement reste stable si aucune variation de déformation n'apparaît.

Deux étapes sont nécessaires à l'analyse par flanc de frange, pour obtenir une mesure dynamique de déformation : la mesure statique par balayage et la mesure dynamique en flanc de frange. Ces deux étapes sont réalisées avec le même système de mesure expérimental ; seul son mode de fonctionnement est différent. Pour l'étape 1, l'oscillateur local optique est contrôlé de manière à ce que sa fréquence optique scanne tout le spectre Brillouin. Expérimentalement, la tension de sortie du générateur de tension arbitraire est augmentée par paliers, modifiant par conséquent la fréquence de sortie du VCO ainsi que la fréquence optique de l'oscillateur local. A l'étape 2, sa tension de sortie varie en fonction de la courbe de fréquence de travail, grâce à l'agilité de la tension de sortie de l'AWG.

III.F Système de mesure dynamique de déformation par flanc de frange

III.F.1 Paramètres SA-BOTDR expérimentaux de flanc de frange

A partir du spectre de gain Brillouin obtenu, les deux paramètres d'analyse suivants sont déterminés par traitement numérique, et de manière indépendante pour chacun des points de la ligne optique :

- **Les fréquences de travail locales** : elles sont obtenues par la recherche de la pente maximale sur la courbe de gain Brillouin théorique ; ce résultat est ensuite utilisé pour ajuster l'oscillateur local. Elles peuvent être calculées pour travailler sur la pente positive ou négative. L'écart entre les fréquences de travail locales et les fréquences Brillouin ν_{B0} est d'environ 50 MHz.
- **Les sensibilités locales à la variation de fréquence** : elles serviront à convertir les variations d'intensité du gain Brillouin en variation de décalage de fréquence. Elles correspondent à la valeur de la pente et est, en moyenne, égale à $20 \mu V/MHz$ pour notre système de mesure (sur le flanc gauche).

Les résultats de cette analyse sur l'ensemble de la ligne optique sont donnés à la Figure III.21 pour chacun des deux flancs d'analyses : flanc droit (courbes rouges) ou flanc gauche (courbes bleues). Par la suite, seul le flanc gauche sera considéré, en raison de la plage de tension limitée du générateur de fonction arbitraire (courbes rouges sur les graphiques).

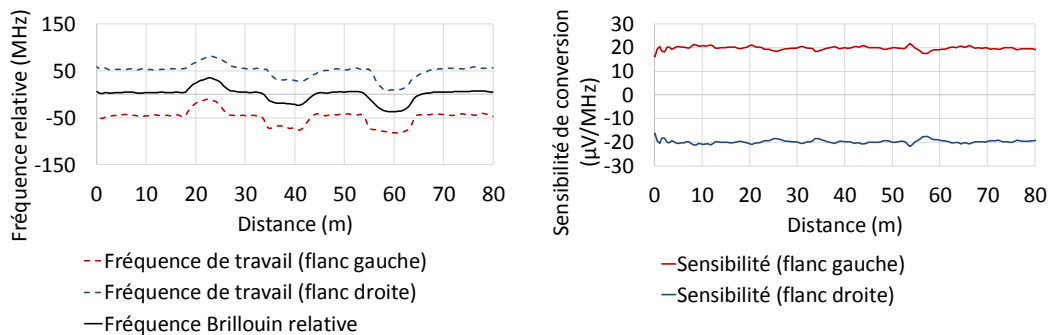


Figure III.21 Résultat de l'analyse de la correspondance avec une fonction lorentzienne et détermination des fréquences de travail (gauche) et des sensibilités K_{ff} (droite) pour chacun des points de la fibre optique.

Ces résultats sont ensuite adaptés et envoyés aux équipements opto-électroniques, notamment à l'AWG qui générera la courbe $f_{travail}(t)$. Une attention particulière est donnée à la synchronisation des équipements, en particulier entre l'AWG et l'injection des impulsions dans la fibre optique capteur, étant donné que chaque point de la fibre optique possède sa propre fréquence de travail.

Sur la Figure III.22, les courbes noires, qui représentent le mode flanc de frange, sont comparées avec les courbes rouges en pointillés obtenues avec un oscillateur local fixe à une fréquence égale à la moyenne des fréquences de travail, soit environ un écart de 50 MHz par rapport à la fréquence de décalage Brillouin moyenne sur toute la fibre optique.

Sur le graphique de droite, la courbe rouge varie de manière importante sur chacune des trois lignes optiques collées sur le tube ; ces trois bosses sont dues aux déformations du tube sous son poids propre. A ces endroits-là, la fréquence de travail est, soit proche (pour la ligne 2 et 3), soit éloignée (pour la ligne 1), de la fréquence centrale ν_B à la position considérée. Cela réduit alors la sensibilité de détection à des valeurs comprises entre $5 \mu V/MHz$ et $15 \mu V/MHz$.

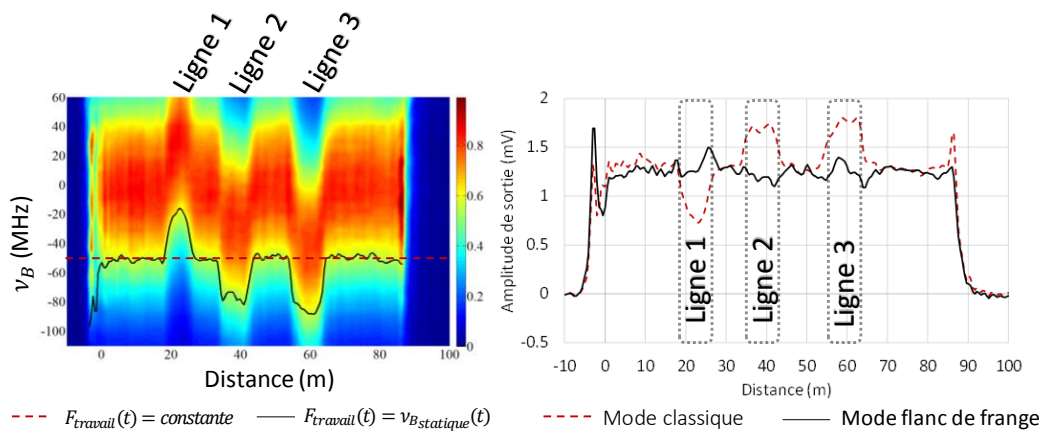


Figure III.22 Comparaison des courbes expérimentales de gain Brillouin pour deux modes de fonctionnement de notre système de mesure. La courbe en pointillés rouges est obtenue avec une fréquence d’oscillateur local fixe et la courbe noire, avec un ajustement de celle-ci en fonction de la fréquence de travail.

En comparaison, la courbe noire est constante, même si des variations peuvent être notées : elles proviennent de la limite en résolution spatiale du système (configurée à 1 m). Ces variations apparaissent notamment en début et fin de tube lors du passage de la fibre collée à la fibre enroulée et sans contrainte.

Dans la section suivante, nous présentons les résultats expérimentaux de déformation. Le système SA-BOTDR est maintenant dans un mode flanc de frange où une seule et unique acquisition est nécessaire pour déterminer les variations de décalage de la fréquence Brillouin. La durée d’acquisition est alors déterminée par le nombre de traces acquises, qui sont moyennées afin d’extraire les signaux utiles des bruits optiques et électroniques présents lors de l’échantillonnage.

III.F.2 Mesures de déformation en mode flanc de frange

III.F.2.1 Mesure répartie de déformation

Les résultats de déformation, obtenus grâce à notre système en mode flanc de frange sur le tube en flexion 4 points, sont présentés dans cette section. La Figure III.23 est un exemple de résultat de mesure répartie de déformation sur les trois lignes à fibre optique dont la durée d’acquisition est de 0.5 s après enlèvement des charges (24 kg en flexion 4 points). Comme expliqué au chapitre II, les rotations involontaires du tube selon son axe longitudinal ont été corrigées et l’incertitude de mesure est inférieure à $\pm 20 \mu\text{m}/\text{m}$.

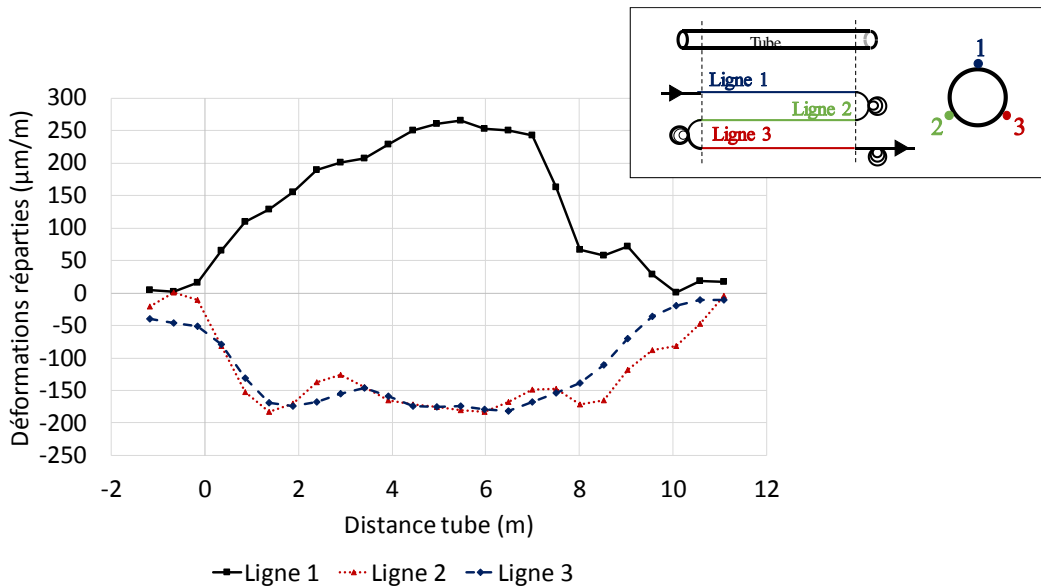


Figure III.23 Courbes de déformation pour chacune des trois lignes optiques collées en configuration longitudinale sur le démonstrateur. La charge appliquée sur le tube est de -24 kg en flexion 4 points. La durée d’acquisition est de 0,5 secondes.

La distorsion des courbes de déformation par rapport aux résultats de simulation typiques de flexion 4 points (présentés au chapitre II) montre les défauts de comportement de ce tube. Ils sont dus à la présence de manchons filetés en acier au niveau des points d’application des charges. De plus, le tube ayant un diamètre faible, les erreurs de positionnement de la fibre engendrent des erreurs de déformation plus importantes. Un millimètre de décalage par rapport à la ligne de déformation correspond à une erreur de 2.4° par rapport à la ligne théorique, soit, en termes de déformation mesurée, un écart de 0.5 %, 11.6 % et 5 % sur les lignes 1, 2 et 3 respectivement.

La Figure III.24 montre les caractéristiques de déformation maximale (i.e. au centre du tube) en fonction des charges appliquées sur le tube entre 0 kg et 24 kg pour les analyses en flanc de frange et classique (balayage en fréquence), ainsi que pour la simulation ; les durées d’acquisition pour les courbes expérimentales sont 0.5 s et 80 s respectivement. Les résultats expérimentaux, dans les deux modes de fonctionnement, suivent bien le modèle mécanique développé et montrent une évolution linéaire entre la charge et la déformation, confirmant alors que l’acier, constituant le tube, reste dans le domaine élastique de déformation.

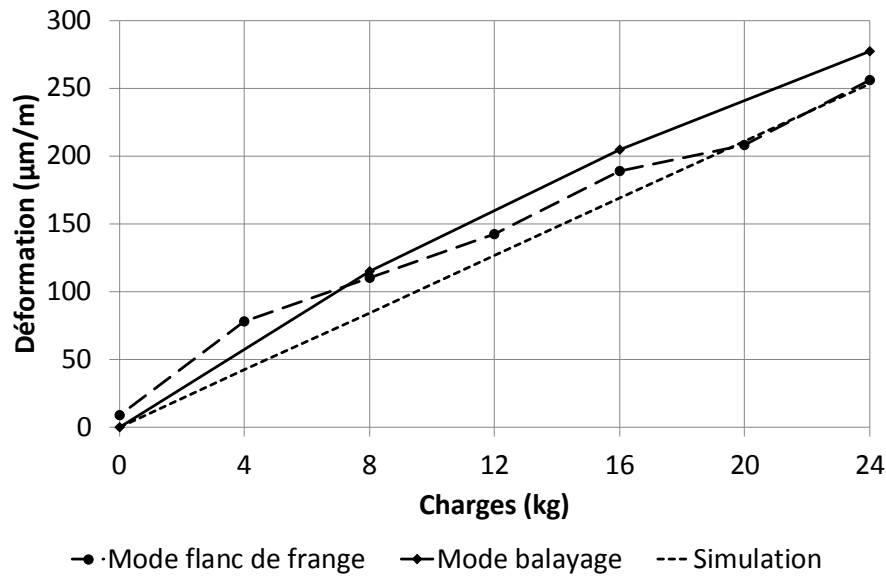


Figure III.24 Caractéristiques expérimentales et théoriques de déformation maximale en fonction de la charge appliquée sur le tube en flexion 4 points. Les durées totales d'acquisition pour les modes par flanc de frange et par balayage sont respectivement de 0.5 s et 80 s.

III.F.2.1 Excursion de mesure de déformation

Pour les systèmes de mesures Brillouin qui utilisent une analyse par balayage en fréquence, la plage de mesure est l'excursion maximale en fréquence que le système peut analyser ; pour des systèmes commerciaux, elle est généralement de 2 à 4 GHz, et l'analyse d'une gamme très large de fibre optique est alors possible.

L'analyse par flanc de frange n'est valable que sur une certaine plage de variation qui correspond à la zone où la fonction lorentzienne peut être approximée à une droite. La largeur de cette zone est définie selon des critères de performance (incertitude de mesure) et dépend aussi de la largeur de raie de la composante Brillouin [115].

La Figure III.25, calculée à partir d'une fonction lorentzienne de largeur de raie 150 MHz, représente l'erreur de conversion faite lors de l'estimation de la variation de la fréquence Brillouin Δf en fonction de l'amplitude de sa variation réelle. La plage de mesure est donc tout d'abord limitée selon le taux d'erreur maximal accepté pour la mesure. Selon les caractéristiques du système SA-BOTDR réalisé, l'excursion maximale (choisie arbitrairement) est de 30 MHz, soit une amplitude de déformation d'environ 600 $\mu\text{m/m}$. L'erreur maximale de conversion obtenue est alors de 10 $\mu\text{m/m}$. De plus, au-delà, en raison de la forme de la fonction lorentzienne, le taux d'erreur augmente rapidement (erreur maximale de 40 $\mu\text{m/m}$ pour un décalage de 40 MHz).

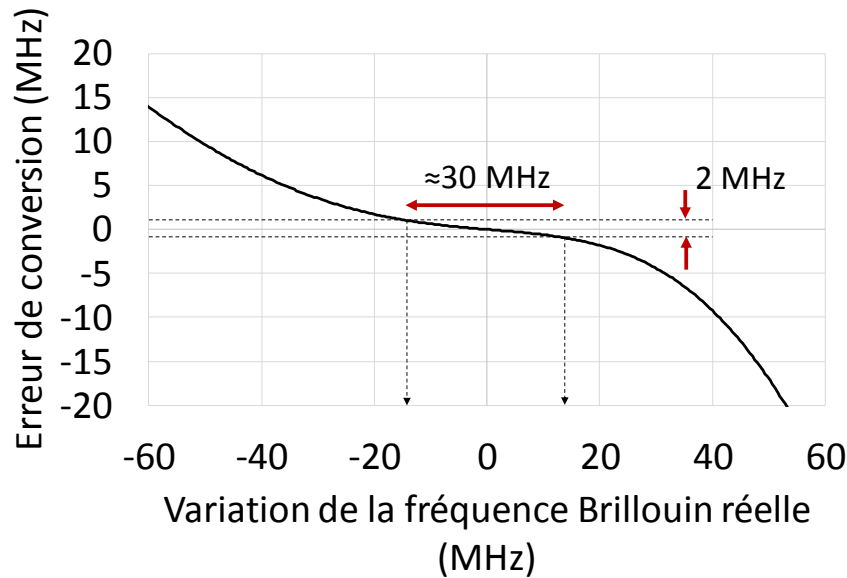


Figure III.25 Courbe théorique d'erreur de conversion en mode flanc de frange en raison de la non linéarité de la pente de la courbe de gain Brillouin (lorentzienne).

De plus, comme déjà expliqué plus haut, en s'écartant de cette zone « linéaire », la pente de la courbe de gain Brillouin diminue, impliquant une diminution de la sensibilité de mesure de l'instrument.

Selon la pente de travail (à droite ou gauche du pic de gain Brillouin), en cas de très forte variation de déformation, une erreur d'interprétation pourrait apparaître si le pic de gain Brillouin dépasse la fréquence de travail. La largeur du signal de sortie est d'environ 170 MHz et la fréquence de travail est décalée d'environ 50 MHz par rapport à la fréquence Brillouin centrale. Par conséquent, pour notre système fonctionnant sur la pente gauche par exemple, en cas de variations supérieures à - 50 MHz (équivalent à - 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$), l'intensité détectée commencera à diminuer alors que le sens de variation des déformations n'aura pas changé.

Le suivi en temps réel de la fréquence de travail serait alors un avantage important pour ce type de système. En cas de variations importantes (qu'elles soient dynamiques ou statiques), le système doit pouvoir s'adapter. Un ajustement régulier de la fréquence de travail permettrait alors de garder la même sensibilité de conversion entre intensité mesurée et décalage de fréquence Brillouin et ainsi d'éviter toute erreur d'interprétation ou baisse de performance.

III.F.3 Mesure de déplacement dynamique d'une canalisation

Dans cette section, les équations de déplacement vues au chapitre précédent (équations II.10, p.89) sont appliquées sur les résultats de mesure de déformation répartie obtenue en mode flanc de frange. Les courbes de déplacement correspondant à un état de charge du tube en flexion 4 points sont calculées. Les résultats sont présentés à la Figure III.26. Le graphique de gauche donne les courbes de

déplacement $y_{exp}(z)$ pour différentes charges (avec z la distance du tube) ; celles-ci sont positives du fait que la mesure de référence a été prise lorsque le tube est chargé avec 24 kg ; elles représentent son déplacement relatif. Le graphique de droite donne la flèche relative du tube (i.e. le déplacement du point à mi-longueur) et est comparé avec des résultats de simulation. La durée d'acquisition est de 0,5 s.

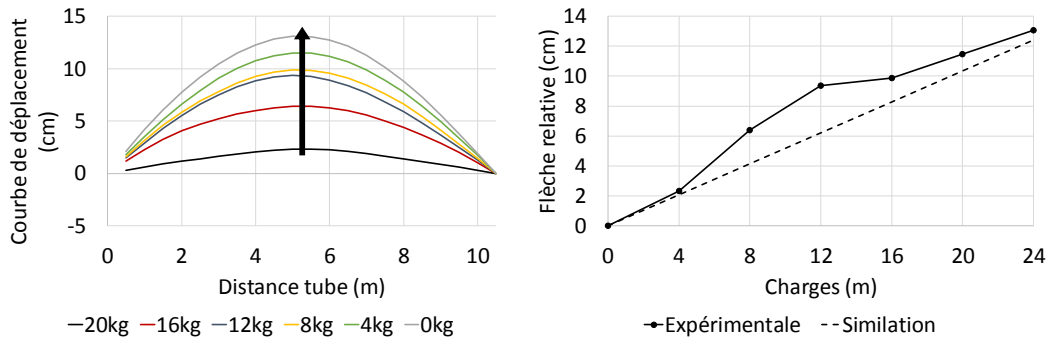


Figure III.26 Courbe de déplacement $y(z)$ (gauche) et mesure de flèche (droite).

L'allure des courbes de mesure de flèche est similaire malgré un écart moyen de 20 % sur l'ensemble de l'étude. Ces écarts sont probablement dus aux frottements du tube sur les supports.

III.F.3.1 Mesure dynamique de déplacement

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus avec notre système de mesure répartie et dynamique (à 7,2 Hz) de déformation et avec le modèle mécanique mis en place au chapitre 2. Le déplacement de notre démonstrateur en $z = L/2$ est étudié lors de son oscillation libre. Nous donnons ci-dessous les principales étapes de la procédure de mesure :

- Acquisition de la courbe de référence statique via une mesure du spectre de gain Brillouin par balayage en fréquence lorsque le tube est immobile et chargé avec 8 kg (voir Figure III.15) et calcul des fréquences de travail (voir Figure III.21).
- Lancement de l'acquisition dynamique et répartie et conversion en déformation (voir Figure III.23) avec **un taux d'acquisition à 7,2 Hz**.
- Mise en mouvement du tube par relâchement manuel de celui-ci à une hauteur de +20 cm par rapport à sa position d'équilibre à $t = 0$ s.
- Calcul de la courbe de déplacement du tube $y(z)$ (voir équations au chapitre 2) et extraction de sa flèche en $z = L/2$.

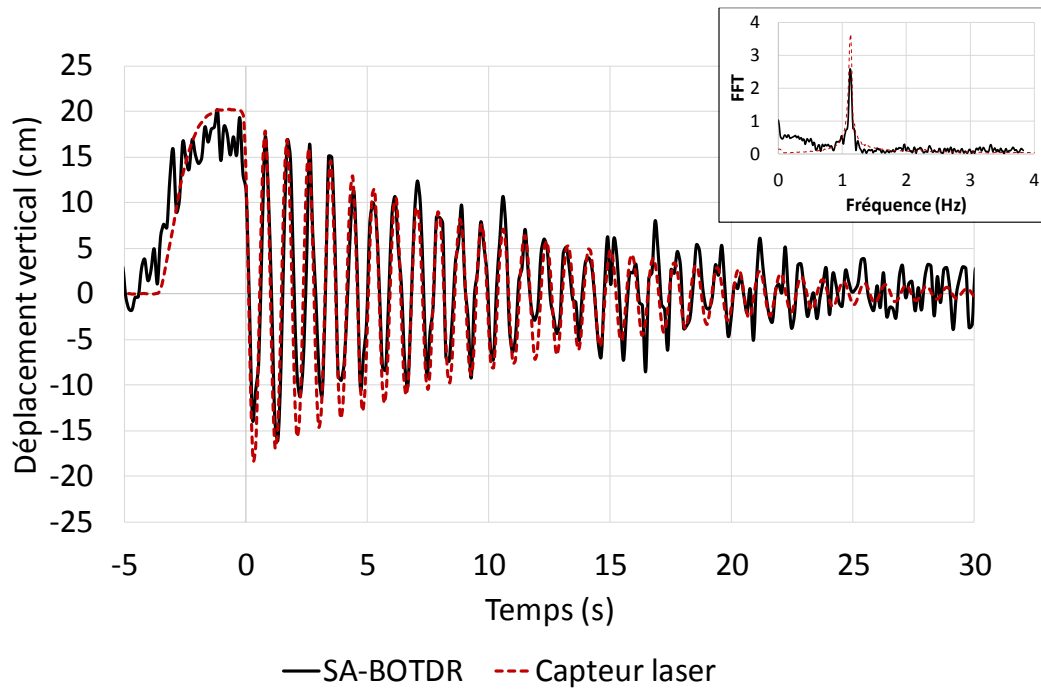


Figure III.27 Mesure expérimentale de déplacement maximal et vertical au centre du tube, chargé avec 8 kg en flexion 4 points. La fréquence d’acquisition pour notre système Brillouin est de 7.2 Hz.

La Figure III.27 montre une mesure dynamique du déplacement relatif du tube lors d’oscillation libre. Celle-ci est comparée avec la mesure d’un capteur industriel de distance laser (courbe rouge en pointillés). Un calcul de transformée de Fourier des résultats fournit une fréquence propre d’oscillation du tube à 1,1 Hz. Cette valeur est confirmée par une correspondance avec la fonction sinusoidale amortie de la forme suivante :

$$f_{oscillation}(t) = a * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) * \sin(2\pi f t + \phi) + D \quad \text{III.3}$$

avec τ le taux d’amortissement de l’oscillation et f sa fréquence. Une concordance est observée avec la fréquence d’oscillation du tube $f_{oscillation} = 1,1 \text{ Hz}$ ainsi que le temps d’amortissement $\tau = 10,2 \text{ s}$.

La vitesse de déplacement maximale atteinte est de 115 cm/s, correspondant en termes de déformation à une vitesse de déformation de 3000 $\mu\text{m/m}$ par seconde (soit 0,3 % $\cdot\text{s}^{-1}$) ; le régime de déformation mécanique est alors intermédiaire [129].

La Figure III.28 montre l’incertitude locale de déplacement horizontal et vertical pour une série de 100 mesures réalisées à 7,2 Hz. L’incertitude selon l’axe vertical Y (égale à 2 cm) est plus grande que celle de l’axe horizontal X (égale à 1,8 cm) en raison de sa dépendance à trois mesures de déformation (correspondant aux trois lignes de déformation mesurées pour Y) contre deux seulement pour X (voir chapitre 2, équations II.10 – p.89). L’incertitude sur les déformations est d’environ 45 $\mu\text{m/m}$.

Par ailleurs, les erreurs maximales de déplacement obtenues sur notre démonstrateur atteignent 0,2 cm, 11,5 cm et de 10 cm selon les axes longitudinal, vertical et horizontal respectivement. Ces valeurs sont calculées d'après les équations du chapitre II (équations II.11 – p.90) par intégration des incertitudes de déformation, égales à 40 $\mu\text{m}/\text{m}$, sur toute la distance de tube instrumenté ($\approx 10,4$ m).

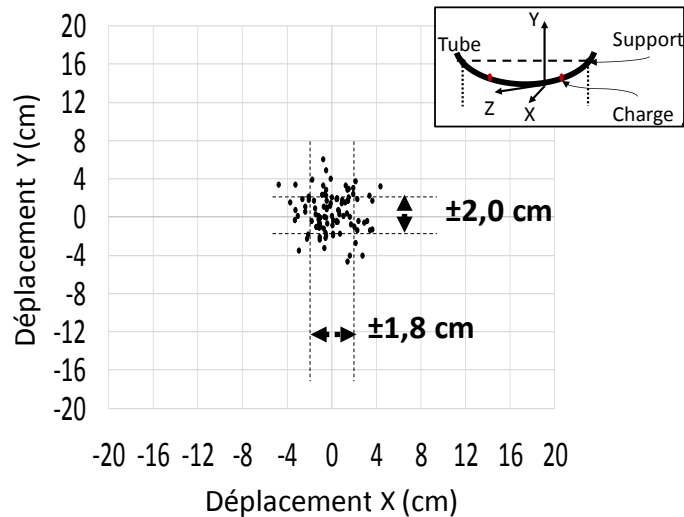


Figure III.28 Mesure de l'incertitude locale de déplacement (répétabilité) selon les axes Y et X, du déplacement maximal au centre du tube. L'encadré représente le tube en flexion et le référentiel de déplacement.

III.F.3.2 Limites actuelles des matériels

Les performances de notre système pourraient être facilement améliorées par quelques modifications d'équipements :

- Dynamique de modulation I&Q de l'oscillateur local :

Pour une mesure de déformation par balayage en fréquence avec notre système, le VCO commandé en tension par le l'AWG permet de faire varier la fréquence du spectre Brillouin analysée. La plage de fréquence maximale est alors limitée par les caractéristiques électroniques de ces deux composants. La gamme de fréquence de sortie du VCO employé est comprise entre 400 et 800 MHz, pour une tension d'entrée comprise entre 0 et 12 Vdc. Or le générateur de signal arbitraire ne permet pas de couvrir cette plage de tension. Il est limité à des valeurs de sortie comprises entre 0 et 5 Vdc, correspondant alors à une plage de fréquence s'étalant sur 180 MHz environ pour le VCO. Le changement de ces composants permettrait alors l'analyse d'une plage de fréquence plus grande ; la détermination de la fréquence Brillouin par correspondance avec la fonction lorentzienne aurait une incertitude plus faible. De plus, une gamme plus large de fibres optiques pourrait être également analysée et notamment celles dont la fréquence Brillouin est différente de celle utilisée comme fibre de référence sur le bras de l'oscillateur local.

- Suivi des grandes variations de déformation :

En cas de dépassement de la zone linéaire de la courbe de gain Brillouin, c'est-à-dire en cas de déformation trop importante (supérieure à 600 $\mu\text{m}/\text{m}$), le système n'étant pas capable de s'adapter, l'erreur de conversion est plus importante et la sensibilité de mesure diminue. Un ajustement de la fréquence de travail du mode flanc de frange est alors nécessaire ; cela demande une communication rapide entre l'ordinateur de calcul et l'AWG. Aujourd'hui, un AWG de laboratoire est utilisé et son contrôle ne peut se faire que par une communication Ethernet. Le temps de transfert des données est alors supérieur à une seconde.

- Mémoire de la carte d'acquisition :

Les capacités de notre carte d'acquisition limitent aussi les performances du système de mesure. Une augmentation de sa quantité de mémoire interne pourrait permettre une amélioration de la résolution de mesure ou une portée de mesure accrue.

III.G Comparaison des performances de mesure

Le montage électro-optique développé permet la mesure répartie de déformation tout au long d'une fibre optique dans chacun des deux modes de fonctionnement (balayage en fréquence et flanc de frange). Les performances de chacun des modes en termes de résolution de mesure sont comparées dans cette section. Une étude concernant la répétabilité de mesure du système a été effectuée pour différentes durées d'acquisition, en ne modifiant que le nombre de trace acquise. Les paramètres, tels que la longueur de fibre optique analysée, la résolution spatiale ou l'amplitude des impulsions optiques, restent inchangés tout au long de l'expérience.

A propos du mode par balayage, le pas en fréquence pour l'analyse du spectre Brillouin est de 6 MHz sur une plage totale de 180 MHz. Afin de négliger le temps de commutation en fréquence de l'oscillateur local optique pour le mode par balayage, ces mesures sont réalisées sur 2 km de fibre optique. Ainsi, le temps de propagation d'une impulsion optique (20 μs) et celui d'enregistrement de ces données brutes (100 m de fibre optique) par la carte d'acquisition (160 μs par impulsion) sont prédominants lorsque le nombre de traces acquises est supérieur à 1000. Le temps de commutation de l'AWG est estimé à 40 ms (correspondant principalement au temps d'envoi de la nouvelle valeur). Le temps de traitement de correspondance avec une fonction lorentzienne n'est pas pris en compte dans le temps total d'acquisition.

Les résultats de cette étude sur notre système sont donnés à la Figure III.29. Un seuil concernant la rapidité du système et pour lequel l'emploi du mode flanc de frange permet d'obtenir une résolution en fréquence égale ou supérieure à celle obtenue par le mode en balayage est aisément identifiable. Ce seuil vaut 0.24 Hz, soit 4.16 secondes. Pour toute durée d'acquisition inférieure, le mode flanc de frange

donne de meilleure résolution. Le temps nécessaire de changement de la fréquence analysée qui est constant quels que soient les autres paramètres du système ou de la ligne optique explique la performance modérée du mode par balayage pour de hautes fréquences d'acquisition.

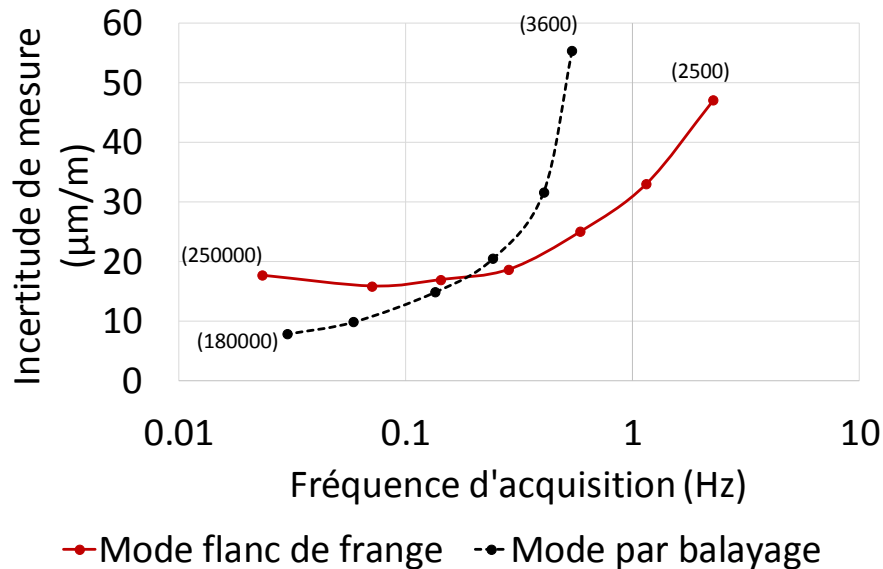


Figure III.29 Comparaison de performance entre le mode flanc de frange et le balayage en fréquence en termes d'incertitude de déformation selon la durée totale d'acquisition. Le nombre entre parenthèse indique le nombre de traces acquises.

Une méthode pour accélérer ce temps de commutation est d'utiliser le générateur de signal arbitraire avec une fonction en escalier ; chaque marche correspond alors à une fréquence d'analyse Brillouin [142]. Le temps de commutation (inférieure à 3 ns) de ce type d'instrument est plus rapide que le temps de parcours aller-retour de l'impulsion tout au long de la fibre optique. Cette fonctionnalité pourrait être implémentée sur notre système de mesure.

Une valeur limite basse d'incertitude pour chacun des deux systèmes est obtenue grâce à une approximation exponentielle. Elle est de 16 µm/m pour le mode flanc de frange et de 8 µm/m pour le mode par balayage.

Pour augmenter la rapidité, le seul moyen est de réduire le nombre de traces acquises et il existe deux possibilités :

- Réduire le nombre de fréquence d'analyse (pour le mode par balayage en fréquence uniquement)
- Réduire le nombre de traces acquises par fréquence analysée

Le choix entre ces deux possibilités est arbitraire. La Figure III.30 montre la relation entre le nombre total d'impulsions injectées dans la fibre afin de réaliser une mesure complète par balayage et

l'incertitude sur la résolution fréquentielle du décalage de la fréquence Brillouin. Pour trois valeurs de pas fréquentiel d'analyse, les courbes se superposent, indiquant alors que le pas en fréquence d'une analyse classique est aussi important que le nombre de traces acquises par fréquence analysée.

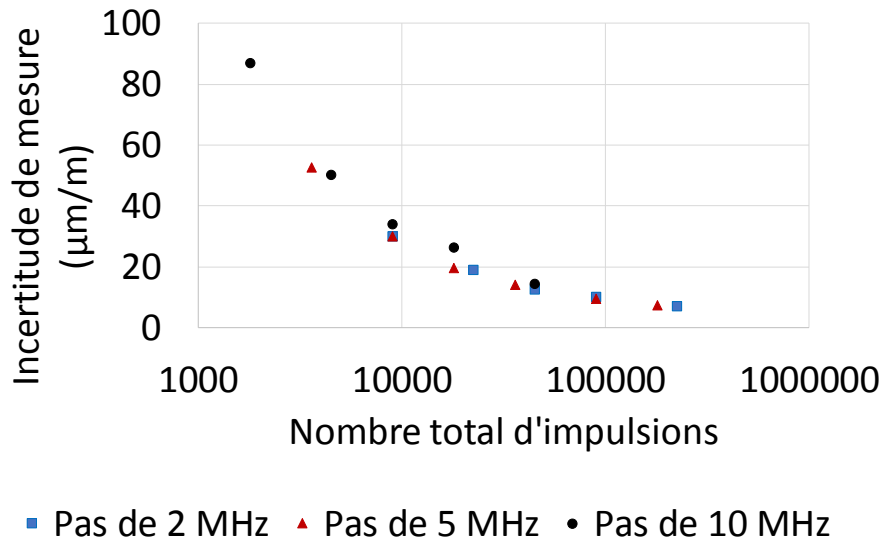


Figure III.30 Mesure d'incertitude de déformation en fonction du nombre total d'impulsions injectées dans la fibre optique pour différentes valeurs de pas d'analyse en fréquence (mode d'analyse classique par balayage).

III.H Sensibilité aux pertes en ligne

Dans un système à analyse par flanc de frange, les pertes optiques peuvent entraîner de fausses interprétations quant à la mesure de déformation. En effet, la mesure se faisant alors par une mesure d'intensité, la moindre variation d'amplitude du signal de rétrodiffusion sera convertie en variation de déformation. Or, dans un cas réel, des pertes optiques pourraient apparaître, par exemple, en raison l'apparition de courbures trop fortes. Dès lors, le système enregistrera une déformation d'amplitude équivalente à la perte locale sur toute la suite de la fibre. L'étape préliminaire de l'analyse par flanc de frange, nécessaire à la détermination des fréquences de travail et des valeurs de sensibilités locales, permet seulement de prendre en compte l'état initial de la fibre optique. Les pertes statiques locales ou réparties sont alors compensées même si une baisse de la sensibilité, à ces endroits, peut entraîner une réduction de performance.

L'analyse par balayage du spectre de rétrodiffusion n'est pas soumise à ces effets étant donné que la variable recherchée est la fréquence centrale et non son amplitude – c'est ce point qui permet aux systèmes Brillouin de pouvoir analyser des longueurs de fibres optiques supérieures à 80 km.

La double analyse par flanc de frange de chacune des deux pentes (positive et négative) du spectre de gain Brillouin rendrait le système insensible aux pertes en lignes. En cas de déformation, le signal mesuré à chacune des deux fréquences de travail verrait alors son intensité varier de manière opposée. La différence d'intensité serait alors représentative de l'amplitude de la déformation subie. A la fin du chapitre 1 (section I.F.5), quelques systèmes de mesures dont le principe d'analyse permet de s'affranchir des pertes en ligne ont déjà été présentés.

III.1 Conclusion du chapitre 3

Les systèmes de mesure répartie et dynamique de déformation par fibre optique nécessitent certains ajustements par rapport à la méthode traditionnelle du balayage du spectre de gain Brillouin. Nous avons vu, en fin de chapitre 1, que plusieurs prototypes ont dépassé certaines barrières et permettent des mesures rapides, supérieures à quelques Hz ou dizaines de Hz. Cependant, ils sont souvent implémentés sur des architectures de type Brillouin-OTDA.

Grâce à l'utilisation d'un générateur de signaux arbitraires et un modulateur I&Q, l'ajustement, arbitraire et local, de la fréquence analysée est possible. Cette architecture d'analyse proposée et conçue en laboratoire, couplée à la méthode d'acquisition par flanc de frange, est alors capable de mesurer des variations rapides du décalage de la fréquence Brillouin. Cette mesure est réalisée par l'acquisition du niveau de gain Brillouin à une seule et unique fréquence de son spectre de manière indépendante sur chacun des points de la fibre optique. En évitant la phase de balayage historiquement et actuellement réalisée pour l'estimation de la fréquence de décalage centrale, la mesure est alors beaucoup plus rapide. Les performances obtenues sur notre système de mesure sont de l'ordre de $40 \mu\text{m}/\text{m}$ d'incertitude de mesure pour une résolution spatiale de 1 m et une fréquence d'acquisition de 7,2 Hz. De nombreux ajustements purement matériels pourraient être réalisés afin d'améliorer la qualité ou la quantité des mesures.

Le gain de performance, entre les méthodes d'analyse par balayage du spectre de gain Brillouin et par flanc de frange, dépend fortement de l'architecture opto-électronique du système. En effet, pour de courtes lignes et dans un mode par balayage, le temps de commutation de la fréquence d'analyse est grand vis-à-vis du temps de parcours de la lumière dans la fibre. Il réduit donc fortement les performances temporelles. Cet impact est cependant moins important pour les lignes de plusieurs kilomètres.

Conclusion générale

La surveillance de l'état de santé des infrastructures en industrie ou en génie civil est aujourd'hui mise en œuvre durant les différentes étapes de leur vie : lors de leur construction, de leur mise en service et de leur maintenance. Il y a quelques dizaines d'années, le choix de la technologie se limitait aux capteurs ponctuels tels que les capteurs piézoélectriques ou à corde vibrante. Le développement des technologies photoniques et des fibres optiques est venu bouleverser la manière dont l'instrumentation est pensée en amenant de nouvelles architectures de réseau de capteurs. Les capteurs répartis à fibre optique ont été une véritable rupture vis-à-vis des technologies traditionnelles par leur principe de mesure avec absence de zone morte tout au long de la structure.

Cette thèse a pour premier objectif l'étude de cette technologie et la comparaison des systèmes de mesure actuels. Au premier chapitre, un état de l'art des avancées de la recherche concernant ces instruments est fait : les trois moyens de mesure par l'analyse des rétrodiffusions optiques dans les fibres (Rayleigh, Raman et Brillouin) sont complémentaires. Ils apportent, chacun, des informations importantes quant à la santé de l'ouvrage. Les capteurs à effet Raman détectent généralement les prémices d'un dysfonctionnement grâce à l'étude de la température ; les capteurs à effet Brillouin sont capables de détecter les déformations liées, par exemple, à un environnement extrême ; enfin, les capteurs à effet Rayleigh fournissent une analyse vibratoire poussée tout au long de la vie de la structure, reflétant son état de fonctionnement. La connaissance de ces signatures thermique, mécanique et vibratoire offre une gestion de la structure à tous niveaux, en partant de sa conception pour finir à sa maintenance, en passant par l'optimisation des phases de construction et de production.

Dans ce document, nous nous sommes focalisés sur les systèmes par effet Brillouin. La plupart des technologies actuellement utilisées en industrie sont très performantes en termes de portée et de résolution de mesure ou spatiale ; néanmoins, elles sont limitées sur deux aspects : la nécessité de l'accès aux deux extrémités et la rapidité d'acquisition. De manière pratique, le premier point concerne la maintenance et la fiabilité de la ligne optique, le second bloque cette technologie à une simple analyse statique. C'est le second objectif de cette thèse : la conception d'un système fonctionnant en réflectométrie, où une seule extrémité de la fibre est nécessaire, et dont la rapidité d'acquisition est élevée. L'étude de ces systèmes montre une grande variété de méthodes d'analyse ayant chacune des avantages et des inconvénients quant à leur performance (portée et résolution de mesure, résolution spatiale ou rapidité d'acquisition).

Au second chapitre, nous portons l'accent sur les capteurs répartis à fibre optique par effet Brillouin pour la mesure de déformation (ou de température) sur des structures linéaires telles que des ca-

nalisations. Pour celles-ci, l'emploi de la fibre optique est un avantage incontestable et aujourd'hui reconnu par tous les acteurs industriels des domaines de l'énergie et du transport. Un moyen de calcul de la déformation et du déplacement de tube est développé grâce à une ou plusieurs fibres optiques collées sur leur surface externe, limitant ainsi l'intrusion de la mesure. Pour cela, un modèle mécanique est développé et adapté à cette instrumentation. Deux projets industriels sont présentés sur cette thématique et démontrent alors les possibilités et performances des systèmes de mesure par effet Raman et Brillouin. Les caractéristiques et conclusions de ces deux projets ont justifié notre choix quant à la conception d'un système Brillouin fonctionnant en réflectométrie et capable de réaliser des mesures dynamiques.

Dans le troisième chapitre, ce nouveau système par réflectométrie est conçu. Nous avons cherché, à la fois, à réduire les coûts d'un tel système et à implémenter l'analyse cohérente des rétrodiffusions Brillouin par flanc de frange en réflectométrie. Pour cela, une fibre de référence, dont les rétrodiffusions Brillouin stimulées sont utilisées en tant qu'oscillateur local, permet de transférer le signal électrique de battement Brillouin en basse fréquence (inférieure à 1 GHz). Cette particularité donne la possibilité d'utiliser des photo-détecteurs plus sensibles. Par ailleurs, la fréquence optique de cet oscillateur local est ajustée afin de réaliser une détection d'intensité du gain Brillouin en mode flanc de frange. Malgré une première et inévitable étape dont la durée d'analyse est de l'ordre de grandeur de la dizaine de seconde ou de la minute (durée habituelle pour les systèmes commerciaux actuels mais pouvant être réduite), le suivi des événements dynamiques (environ 10 Hz) est démontré pour une résolution de mesure de $40 \mu\text{m}/\text{m}$ avec une résolution spatiale de 1 m. La démarche et l'ensemble du fonctionnement du système de mesure réalisé sont détaillés. Les performances de ce dernier sont démontrées lors de l'analyse de déformation et de déplacement d'un tube, supporté en deux points, en oscillations libres.

L'emploi de matériel de laboratoire (générateur de signaux arbitraires, par exemple) pour certaines fonctionnalités limite la rapidité, la résolution de mesure et la dynamique de mesure à $600 \mu\text{m}/\text{m}$. Dans le but de compenser les grandes variations de fréquence Brillouin en cas de déformation ou de température importante, une étape d'étalonnage régulière est conseillée pour les systèmes de mesure par flanc de frange afin de garder une sensibilité maximale. Les limites de notre système pourraient être surpassées par quelques améliorations matérielles (emploi de cartes électroniques dédiées et intégrées) ou logicielles (traitement numérique).

Nous finissons le document par une comparaison de performance entre le mode flanc de frange et le mode par balayage de notre système. Pour chacun, les limites basses de résolution de mesure pour des longues durées de mesure sont, respectivement, $16 \mu\text{m}/\text{m}$ et $8 \mu\text{m}/\text{m}$. Néanmoins, leur courbe de résolution se croise à 0,24 Hz, avantageant alors le mode flanc de frange pour des mesures dynamiques. Ce comportement est dû aux principes d'acquisition par balayage et à l'architecture de notre système nécessitant un temps « long » pour le changement de la fréquence d'analyse.

La méthode d'analyse par flanc de frange fait perdre à l'analyse Brillouin par balayage un avantage majeur : la mesure en fréquence. Celle-ci est moins sensible aux pertes de la fibre optique ; c'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles les systèmes Brillouin sont parfois privilégiés vis-à-vis des systèmes Raman

Chapitre III

pour la mesure de température. Cela peut être compensé par une double analyse en flanc de frange de part et d'autre du pic de gain Brillouin.

Annexes

A. Définition des courbes des moments de flexion $M(z)$

Dans cette section, les calculs des courbes des moments de flexion d'un tube de longueur L supporté en deux appuis simples, notés A et B , sont présentés. Ces courbes des moments de flexion sont utiles lors de la simulation des courbes de déformation et de flexion ; elles permettent d'appréhender la manière dont le tube est fléchi et sont utilisées pour valider l'instrumentation par fibre optique mise en place sur les tubes (voir chapitre II). La théorie de la résistance des matériaux et de la flexion des poutres de Euler-Bernoulli et de Timoshenko sont utilisées pour ces démonstrations [127]. Tout d'abord, quatre hypothèses, qui permettent de construire ce raisonnement, sont émises :

- 1- **La section de la poutre reste plane** (pas de gauchissement),
- 2- **La section de la poutre reste perpendiculaire à l'axe neutre** (pas de cisaillement),
- 3- **Les déformations sont petites** (le matériau reste dans la zone linéaire et élastique de déformation),
- 4- **Les déplacements sont petits** (la direction et le sens des forces s'appliquant sur le système restent identiques).

Deux cas sont étudiés : premièrement, le tube est son poids propre uniquement et, deuxièmement, deux forces de même amplitude et de même sens sont appliquées afin de générer une flexion 4 points. La Figure A.1 illustre ces deux cas.

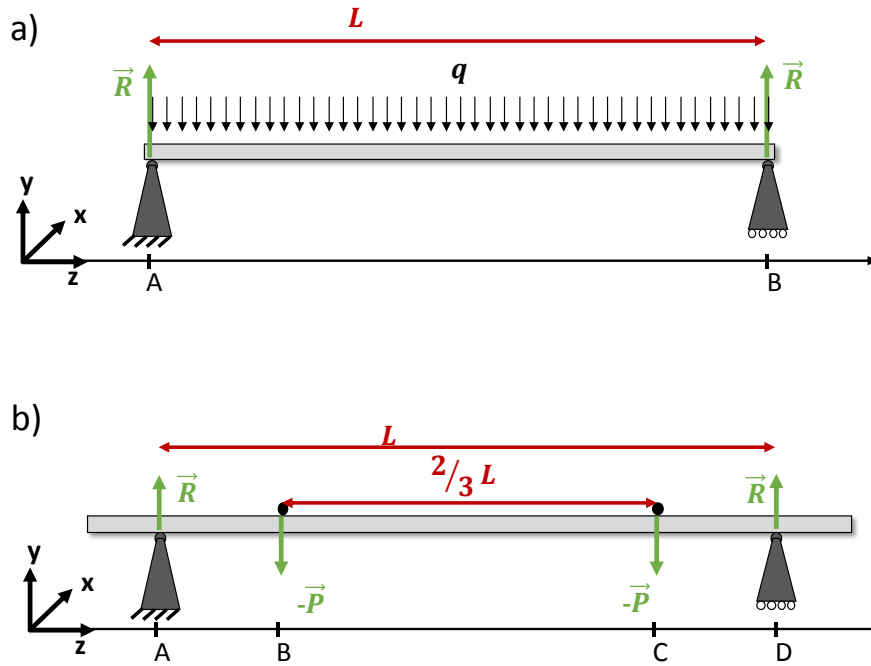


Figure A.1 Schéma d’application des forces pour le calcul des moments de flexion. a) sous son poids propre et b) en flexion 4 points.

La force de réaction R des appuis est définie afin de respecter son équilibre mécanique (i.e. la somme des forces extérieures s’appliquant sur le système est nulle), elle dépend donc de toutes les charges P_i appliquées au système et sont définies par :

$$R = \frac{1}{n} * \sum P_i \tag{eq.1}$$

La théorie des poutres donne le diagramme des moments de flexion pour chacune des deux charges suivantes : le poids propre du tube et les forces F (appliquée en flexion 4 points). Ces diagrammes permettent ensuite de calculer les déformations et les courbes de déplacements du tube en fonction de chacune de ces sollicitations de manière indépendante. Par le principe de superposition, la somme des deux réactions mécaniques permet de définir la réaction globale de la structure. Pour les essais réalisés au cours de cette thèse, le poids propre du tube est considéré comme nul en raison de l’instrumentation par capteur réparti à fibre optique fondée sur l’effet Brillouin.

a. Sous son poids propre

La poutre possède une charge linéique propre q . Cela équivaut à une poutre chargée de manière uniforme. Le schéma de ce système est présenté ci-dessus.

La réaction des supports dépend du poids total de la poutre qui est calculé avec sa charge linéique q et sa longueur total L :

$$R = \frac{qL}{2} \quad \text{eq.2}$$

Le diagramme des moments de flexion obtenu est de la forme suivante :

$$M(z) = \frac{qz}{2} * (L - z) \quad \text{eq.3}$$

Sa représentation graphique est donnée à la figure ci-dessous. Elle a la forme d'une parabole inversée. Les contraintes et les déformations (reliées par la loi de Hooke) sont maximales au centre du tube sur les lignes inférieure et supérieure.

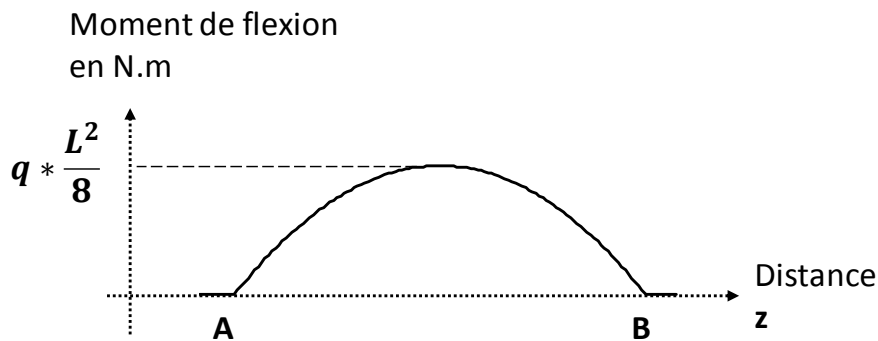


Figure A.2 Diagramme des moments de flexion pour une poutre sous son poids propre

b. Pour une flexion 4 points

Deux charges P_1 et P_2 sont appliquées symétriquement par rapport au centre de la poutre comme illustré sur le schéma de la Figure II.10. Pour ne tenir compte que de l'influence des charges sur la flexion du tube, son poids linéique q est considéré comme nul. La réaction à chaque support, dépendant des forces P_1 et P_2 , est :

$$R = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad \text{eq.4}$$

La résolution du diagramme des moments de flexion donne le résultat suivant :

$$\begin{aligned} M(z) &= Pz && \text{pour } z \leq a \\ M(z) &= Pa && \text{pour } a \leq z \leq L - a \\ M(z) &= P(L - z) && \text{pour } z \geq L - a \end{aligned} \quad \text{eq.5}$$

avec a la distance des charges par rapport aux supports.

La valeur maximale du moment de flexion est atteinte pour $a \leq z \leq L - a$ et vaut $M_{max} = Pa$. Sa représentation graphique est donnée à la Figure A.3. D'après la forme de cette courbe, le tube est fléchi de manière uniforme entre les deux charges ; la flexion est dite circulaire ou pure.

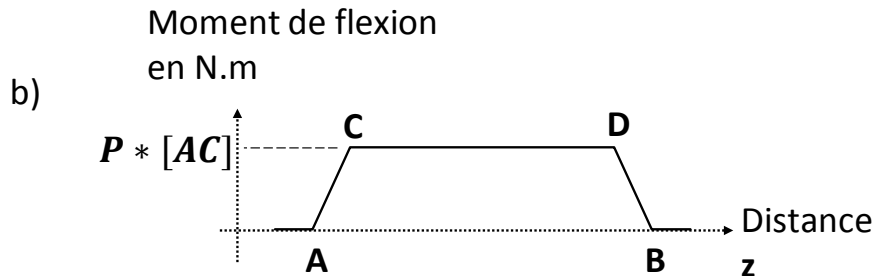


Figure A.3 Diagramme des moments de flexion pour les flexions 4 points d'une poutre en appui simple. A et B représentent les supports et C et D représentent les points d'application des charges.

B. Modèle théorique de la courbe de déplacement $y(z)$

A la section II.B.2.2.1, la manière dont la structure et ses éléments unitaires se déforment et se déplacent selon une force extérieure est expliquée. Cela a permis d'introduire les notions de déformation, déplacements, moments de flexion et rayon de courbure pour une structure composée d'éléments unitaires. Dans cette annexe, le raisonnement mécanique permettant de passer de la connaissance de la déformation de chacun de ces éléments unitaires au déplacement global du tube est expliqué. Les quatre hypothèses définies au début de la section précédente sont toujours valables.

La Figure A.4 représente un élément de notre structure (voir Figure II.9, p.89). Lors d'une flexion pure, celui-ci se déforme de telle sorte que ces deux surfaces se croisent alors au point O (hypothèses 1 et 2) – le même que celui défini précédemment comme étant le centre du cercle représentant la courbure de la structure. Grâce à l'hypothèse 3, les contraintes σ et les moments de flexion M sont reliés par la relation linéaire suivante :

$$\sigma(y) = \frac{M}{I_z} y \quad \text{eq.6}$$

avec y la distance entre le point considéré et l'axe neutre et I_z le moment d'inertie.

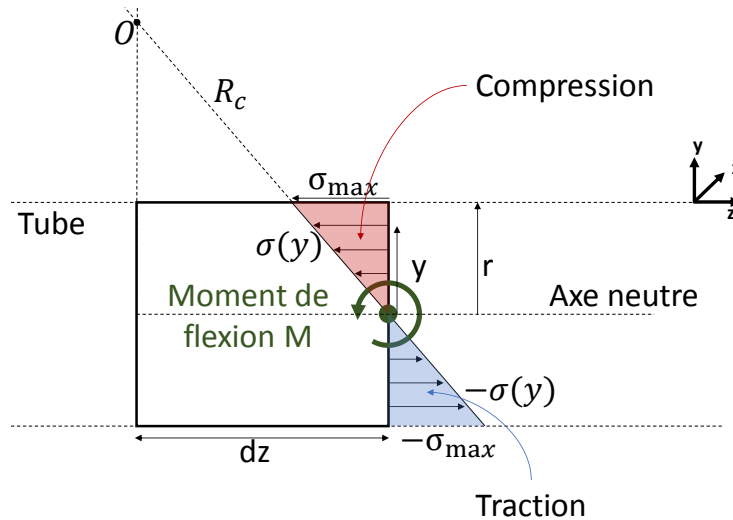


Figure A.4 Schéma montrant les effets d'une flexion pure d'une poutre de rayon r

Le moment d'inertie I_z est une valeur uniquement dépendante de la géométrie de la structure, qui caractérise la répartition de la matière autour de l'axe neutre de cette structure. Il est défini par la relation suivante pour une poutre de section circulaire creuse avec D le diamètre externe et d le diamètre interne :

$$I_z = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{64} \tag{eq.7}$$

Etant donné la section circulaire de nos tubes, les contraintes maximales σ_{max} pour $y = r$ (rayon externe) sont égales à $E \cdot \epsilon_{max}$. Par une analyse géométrique de la section et en admettant que $R_c \gg r$, les déformations maximales $\epsilon_{max} = \sigma_{max}/E$, le rayon du tube r et le rayon de courbure R_c sont reliés par l'équation suivante :

$$\frac{1}{R_c} = \frac{\epsilon_{max}}{r} \tag{eq.8}$$

D'après les équations eq.6, eq.8 et la loi de Hooke, la relation entre les moments de flexion M et le rayon de courbure R_c est définie par :

$$\frac{1}{R_c} = - \frac{M}{EI_z} \tag{eq.9}$$

La présence du signe « - » permet de respecter l'orientation des axes. Les moments de flexion étant proportionnels aux déformations, l'équation eq.9 devient :

$$\frac{M}{EI_z} = -\frac{\varepsilon_{\max}}{r} \quad \text{eq.10}$$

De ces dernières équations, lors de l'application de charges, les déformations $\varepsilon(z)$, les contraintes $\sigma(z)$ et les moments de flexion $M(z)$ sont proportionnels (équation eq.6). Les moments de flexion sont aussi inversement proportionnels au rayon de courbure $R_c(z)$ (équation eq.9).

Lors de l'instrumentation d'une structure, les contraintes soumises à la structure sont inconnues, seule la déformation ε de chaque élément est mesurée. Celle-ci étant reliée aux contraintes et aux moments de flexion, les déplacements engendrés via le calcul du rayon de courbure du tube est possible.

Sur la Figure A.5, le tube est divisé en éléments d_z de longueur unitaire. Lors d'une flexion, en considérant que la poutre est soumise à différentes forces dans le plan YZ, les points suivants sont déduits :

- Les surfaces latérales des éléments d_z ne sont plus parallèles et leur intersection au point O forme un angle $d\alpha$ et le rayon de courbure R_c .
- La partie inférieure du segment prend alors une longueur $d_s = dz + \varepsilon_{bas}$. De même, la partie supérieure du segment prend alors une longueur $d_s = dz + \varepsilon_{haut}$.
- L'angle formé, entre l'horizontal (position initiale du tube) et l'axe neutre du segment d_z , est noté θ et y représente le déplacement de ce segment par rapport à la position initiale du tube.

En raison des compressions ε_{haut} en partie supérieure et des tractions ε_{bas} en partie inférieure du tube, d'après l'équation eq.8 et en tout point z du tube, le rayon de courbure R_c se définit par :

$$R_c(z) = \frac{2r}{\varepsilon_{haut}(z) + \varepsilon_{bas}(z)} \quad \text{eq.11}$$

Cette équation servira, par la suite, à déterminer le déplacement de la structure avec les mesures de déformation expérimentale de nos tubes.

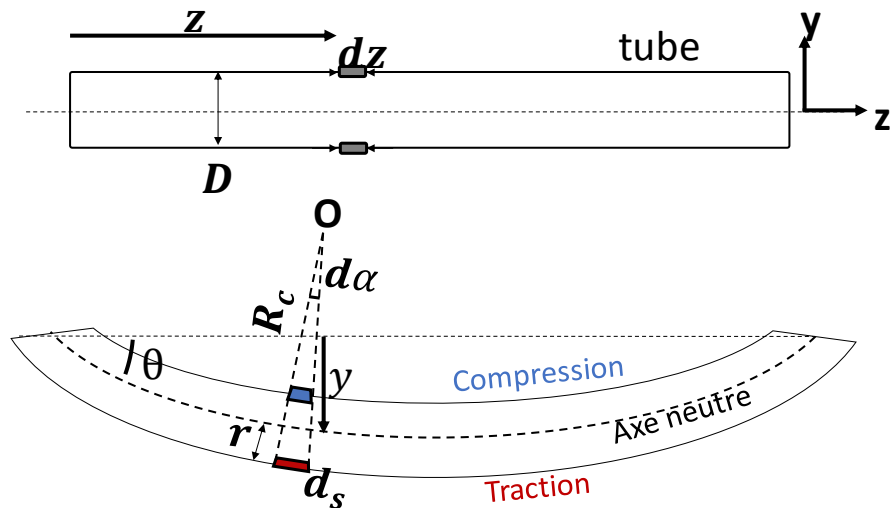


Figure A.5 Schéma de principe pour une flexion d'une poutre montrant la rotation des éléments unitaires d'une poutre

Lors d'applications pratiques, les flèches mesurées restent faibles devant les dimensions du système, c'est-à-dire que les matériaux ne dépassent pas leur état d'élasticité linéaire. Sur la Figure A.5, grâce aux hypothèses 3 et 4, les approximations de longueurs suivantes sont établies comme suit :

- $dz \approx ds$: les variations de longueur d'un élément sont faibles.
- $\tan(\theta) = \frac{y}{z} \approx \theta$ et $d\alpha \approx \tan(d\alpha) = \frac{dy}{dz}$: les rotations mises en jeu et l'élongation du tube sont faibles. Avec dy la distance entre l'axe neutre et le point de mesure selon l'axe vertical de cette portion unitaire, qui représente la variation de déplacement vertical pour chaque élément.

D'après les notations de la Figure A.5 et par analyse des dimensions de la structure, les relations suivantes sont définies :

$$ds = R_c d\alpha \Rightarrow \frac{1}{R_c} = \frac{d\alpha}{ds}$$

$$d\alpha = d\theta \tag{eq.12}$$

Avec les deux hypothèses précédemment émises, l'équation eq.12 devient alors :

$$\frac{1}{R_c} \approx \frac{d}{dz} \left(\frac{dy}{dz} \right) \tag{eq.13}$$

D'après les relations de l'équation eq.12 dans le cas d'un tube, l'équation eq.13 s'écrit alors [127]:

$$\frac{d^2y(z)}{dz^2} = -\frac{M(z)}{EI_z} \quad \text{eq.14}$$

avec $R_c(z)$ le rayon de courbure, $M(z)$ le moment s'exerçant sur la poutre, I_z le moment d'inertie de la poutre et E le module de Young du matériaux.

C. Détermination de la courbe de déplacement théorique

La double intégration des courbes des moments de flexion (calculées à l'annexe A) permet d'obtenir **la courbe de déplacement** $y_{th}(z)$. La détermination des constantes d'intégration se fait alors grâce à des hypothèses concernant le comportement du tube au niveau des appuis ou des points d'application des charges.

Dans le cadre de nos expérimentations, les forces ne s'appliquent que dans le plan YZ ; seuls les déplacements $y(z)$ sont considérés. Les résultats obtenus pour les deux types de flexion et la méthode de détermination des constantes d'intégration sont donnés ci-dessous.

a) Poids propre

Type de flexion	Portion du tube concernée	Moment de flexion $M(z)$	Courbe de déplacement $EI_z \cdot y_{th}(z)$	Constantes d'intégration
Poids propre	$0 < z < L$	$\frac{qlz}{2} - \frac{qz^2}{2}$	$-\frac{q}{12}z^4 + \frac{qL}{12}z^3 + C_0z + C_1$	$C_0 = \frac{ql^3}{24}$ $C_1 = 0$

Table Annexe.1 Calcul du déplacement pour un tube sous son propre poids

Le calcul des constantes d'intégration pour le cas de la flexion d'un tube sous son poids propre se fait grâce à l'hypothèse que le tube ne se déplace pas au niveau des appuis - les supports ne permettent seulement qu'un déplacement et une rotation autour de l'axe x. Grâce à cela, C_0 et C_1 sont déterminés en prenant $y_{th}(z) = 0$ lorsque $z = L$ et $z = 0$.

b) Flexion 4 points

Type de flexion	Portion du tube concernée	Moment de flexion $M(z)$	Courbe de déplacement $EI_z \cdot y_{th}(z)$	Constantes d'intégration
Flexion 4 points	$0 < z < a$	Pz	$\frac{P}{3}z^3 + F_0z + F_1$	$F_0 = \frac{Pa(a+L)}{2}$ $F_1 = 0$
	$a < z < b$	Pa	$\frac{Pa}{2}z^2 + G_0z + G_1$	$G_0 = \frac{PLa}{2}$ $G_1 = \frac{Pa^3}{2}$
	$b < z < L$	$P(L-z)$	$-\frac{P}{6}z^3 + \frac{PL}{2}z^2 + H_0z + H_1$	$H_0 = -\frac{P(a^2 - La - L^2)}{2}$ $H_1 = \frac{PL(a^2 - La + \frac{L^2}{3})}{2}$

Table Annexe.2 Calcul du déplacement pour un tube en flexion 4 points

Dans le cas d'une flexion 4 points, trois considérations sont nécessaires pour déterminer les six constantes d'intégrations :

- Les déplacements sont nuls au niveau des deux supports en $z = 0$ et $z = L$.
- La flexion 4 points imposée au tube via les charges est symétrique. Les déplacements engendrés aux points d'application des charges sont identiques, soit $y_{th}(z = a) = y_{th}(z = L - a)$.
- Egalement en raison de la symétrie du système, la flèche maximale est atteinte à l'abscisse $z = L/2$. Un changement de sens de variation s'opère. Soit, d'un point de vue mathématique, une dérivée de la courbe de déplacement $\frac{dy_{th}}{dz}$ nulle en $z = L/2$.

D'après les deux tableaux précédents, la flèche maximale du tube est atteinte à la position $z = L/2$ lors de la considération du poids propre et de l'application de charge. Elle vaut :

$$y_{th,max} = \frac{1}{EI_z} * \left(\frac{5 * q * L^4}{384} + \frac{P * a * (3L^2 - 4a^2)}{24} \right) \quad \text{eq.15}$$

La première partie de l'équation correspond à la flèche du tube sous son poids propre (q représente sa masse linéique) et la seconde partie est la flèche induite en raison de l'application des charges représentées par la force P .

Annexes

L'application numérique de cette équation, pour deux charges de masse $P = 75 \text{ kg}$ et $q = 6.76 \text{ kg/m}$, donne $y_{th,max} = 30.2 \text{ cm}$. Cependant, les résultats des mesures expérimentales par capteur réparti par effet Brillouin sont référencés par rapport aux déplacements du tube sous son poids propre ; il convient alors de donner la flèche du tube pour $q = 0$; la flèche obtenue est $y_{th,max} = 17,6 \text{ cm}$.

Références

- [1] B. Glisic and D. Inaudi, "Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring," *Livre*, 2007.
- [2] J. M. Brownjohn, "Structural health monitoring of civil infrastructure," *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, vol. 365, pp. 589-622, Feb 15 2007.
- [3] "Vocabulaire international de métrologie," *Bureau international des poids et mesures*, 2012.
- [4] dunnicliff, "Geotechnical instrumentation for monitoring field performance," *Livre*, 1993.
- [5] L. M. Smith, G. L., and B. S. MEng, "Performance Assessment and Reinstatement of Vibrating Wire Strain Gauges in nuclear power plant structures," *SMiRT 16*, vol. 1886, 2001.
- [6] R. Gabet, "Cours Optique," *Télécom parisTech*, 2016.
- [7] M. Born and E. Wolf, "Principles of optics," *Livre*, vol. 7th expanded edition.
- [8] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, "Fundamentals of photonics," *Livre*, 1991.
- [9] H. Y. h. John Downes, "DTS worldwide power circuit monitoring applications," *Power system technology*, 2004.
- [10] D. Inaudi, D. Inaudi, B. Glisic, W. Ecke, B. Culshaw, K. J. Peters, *et al.*, "Reliability and field testing of distributed strain and temperature sensors," vol. 6167, p. 61671D, 2006.
- [11] J.-M. Henault, "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*, 2014.
- [12] V. Lanticq, M. Quiertant, E. Merliot, and S. Delepine-Lesoille, "Brillouin sensing cable design and experimental validation," *Sensors*, vol. 8, p. 1192, 2008.
- [13] J. L. Santos and f. Farahi, "Handbook of optical sensors," *Livre*, 2014.
- [14] S. Girard, J. Kuhnenn, A. Gusarov, B. Brichard, M. V. Uffelen, Y. Ouerdane, *et al.*, "Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers recent advances and future challenges," *Transactions on nuclear science*, vol. 60, 2013.
- [15] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. B. Eom, M. J. Kim, B. S. Rho, *et al.*, "Interferometric fiber optic sensors," *Sensors*, vol. 12, pp. 2467-86, 2012.
- [16] A. R. Bahrapour, S. Tofighi, M. Bathaee, and F. Farman, "Optical Fiber Interferometers and their applications," *Intech*, 2012.
- [17] K. O. Hill and G. Metltz, "Fiber Bragg grating technology Fundamentals and Overview," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, p. 1263, 1997.
- [18] Y.-J. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol*, vol. 8, pp. 355-375, 1997.

- [19] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh, and T. Ose, "Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and Its sensor applications," *Transactions on microwave theory and techniques*, vol. MTT-30, 1982.
- [20] E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkov, O. I. Medvedkov, and V. N. Protopopov, "In fiber mach zender interferometer on a pair of long period grating," *European Conference on Optical Communication*, vol. MoB 3.6, 1996.
- [21] B. Culshaw, "The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, pp. R1-R16, 2006.
- [22] X. Liu, B. Jin, Q. Bai, Y. Wang, D. Wang, and Y. Wang, "Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection," *Sensors*, vol. 16, Jul 26 2016.
- [23] X. Bao and L. Chen, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," *Sensors*, vol. 12, pp. 8601-39, 2012.
- [24] K. D. S. P.C. Wait, T.P. Newson, "A theoretical comparison of spontaneous raman and brillouin based fiber optic DTS," *Optics Communications*, vol. 144, pp. 17-23, 1997.
- [25] L. Thévenaz, "Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives," *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, pp. 13-21, 2010.
- [26] Y. Sikali, "Capteurs à fibres optiques réparties par effet Brillouin," 2012
- [27] W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "Investigation of Strain- and Temperature Dependences of BFS in GeO₂ doped optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, 2008.
- [28] K. Porsezian and V. C. Kuriakose, "Optical Solitons Theoretical and experimental challenges," *Livre*.
- [29] G. P. Agrawal, "Non Linear Optic Fiber," *Livre, 3ème édition*, 2001.
- [30] A. H. Hartog and M. P. Gold, "On the theory of backscattering in single mode optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-2, 1984.
- [31] Boyd, "Nonlinear Optics," *Livre, 3ème édition*.
- [32] M. Barnoski and S. Jensen, "Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics," *Applied Optics*, vol. 15, 1976.
- [33] W. Eickhoff and R. Ulrich, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber," *Applied Physics Letters*, vol. 39, p. 693, 1981.
- [34] A. Barrias, J. R. Casas, and S. Villalba, "A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications," *Sensors*, vol. 16, 2016.
- [35] F. Ito, X. Fan, and Y. Koshikiya, "Long-Range Coherent OFDR With Light Source phase noise compensation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, p. 1015, 2012.
- [36] L. Maurin, S. Rougeault, V. Dewynter-Marty, J. Périsset, D. Villani, J.-R. Macé, *et al.*, "OFDR distributed temperature and strain measurements with optical fiber sensing cables applications to drain pipeline monitoring in a nuclear power plant," *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2014.
- [37] Luna, "Instrument OBR 4600," www.lunainc.com.

- [38] J. P. v. d. Weid, R. Passy, G. Mussi, and N. Gisin, "On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, p. 1131, 1997.
- [39] B. J. Soller, D. K. Gifford, M. S. Wolfe, M. E., and F. M. E., "High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies," *Optics Express*, vol. 13, p. 666, 2005.
- [40] S. Kieekbusch, C. Knathe, and E. Bri&meyer, "Fast and accurate characterization of fiber Bragg gratings with high spatial resolution and spectral resolution," *OFC 2003*, 2003.
- [41] G. D. VmWiggeren, Mi R. Motamedi, B. Szafraniec, R. S. Tucker, and D. M. Baney, "Single-scan polarization resolved heterodyne optical network analyzer," *OFC 2002*, 2002.
- [42] S. H. Yun, G. J. Tearney, J. F. d. Boer, N. Iftimia, and B. E. Bouma, "High-speed optical frequency-domain imaging," *Optics Letters*, vol. 11, p. 2953, 2003.
- [43] R. Jugkaitis, A. M. Mamedov, V. T. Potapov, and S. V. Shatalin, "Distributed interferometric fiber sensor system," *Optics Letters*, vol. 17, p. 1623, 1992.
- [44] K. D. Souza, "Significance of coherent Rayleigh noise in fibre-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, pp. 1065-1069, 2006.
- [45] J. M. López-Higuera, J. D. C. Jones, M. López-Amo, J. L. Santos, L. Shi, T. Zhu, *et al.*, "Effect of laser linewidth on phase-OTDR based distributed vibration sensing regime," vol. 9157, p. 91576H, 2014.
- [46] B. Rajavel and M. G. Prasad, "Acoustics of Corrugated Pipes: A Review," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 65, p. 050000, 2013.
- [47] R. P. Jr., G. A. Johnson, and S. T. Vohra, "Strain sensing based on coherent rayleigh scattering in an optical fiber," *Electronic Letters*, vol. 36, p. 1688, 2000.
- [48] K. P. Koo, A. B. Tveten, and A. Dandridge, "Passive stabilization scheme for fiber interferometers using (3 X 3) fiber directionnal couplers," *Applied Physics Letters*, vol. 41, 1982.
- [49] R. Pinchen, H. Wu, and David Swift-Hoadley, "Congestion and Incident Management Applications For Distributed Acoustic Sending Technology NZTA Case Study," *Case Study*.
- [50] A. Owen, G. Duckworth, and J. Worsley, "OptaSense: Fibre Optic Distributed Acoustic Sensing for Border Monitoring," pp. 362-364, 2012.
- [51] M. M. M. al., "First downhole applications of DAS for hydrolic fracturing monitoring and diagnostics," *SPE Drilling and Completion*, 2012.
- [52] P. i. Panhuis, "Flow monitoring and production profiling using DAS," *SPE international*, 2014.
- [53] A. Mateeva, J. Lopez, H. Potters, J. Mestayer, B. Cox, D. Kiyashchenko, *et al.*, "Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling," *Geophysical Prospecting*, vol. 62, pp. 679-692, 2014.
- [54] T. Parker, S. Shatalin, and M. Farhadiroushan, "DAS a new tool for seismic applications," *first break*, vol. 32, 2014.

- [55] M. Li, H. Wang, and G. Tao, "Current and Future Applications of Distributed Acoustic Sensing as a New reservoir geophysics tool," *The Open Petroleum Engineering Journal*, vol. 8, pp. 272-281, 2015.
- [56] C. Raman, "A new radiation," *Indian Journal of Physics*, vol. 2 387-398, 1928.
- [57] J. P. Dakin and D. J. Pratt, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector," *Electronic Letters*, vol. Vol 21, No 13, 1985.
- [58] S. F. A. Signorini, M.A. Soto, G. Sacchi, F. Baronti, R. Barsacchi, A. Lazzeri, R. Roncella, G. Bolognini, F. Di Pasquale, "40 km long-range Raman-based distributed temperature sensor with meter scale spatial resolution," *OSA/OFC/NFOEC 2010*, 2010.
- [59] N. van de Giesen, S. C. Steele-Dunne, J. Jansen, O. Hoes, M. B. Hausner, S. Tyler, *et al.*, "Double-ended calibration of fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data," *Sensors*, vol. 12, pp. 5471-85, 2012.
- [60] M. G. Tanner, S. D. Dyer, B. Baek, R. H. Hadfield, and S. Woo Nam, "High-resolution single-mode fiber-optic distributed Raman sensor for absolute temperature measurement using superconducting nanowire single-photon detectors," *Applied Physics Letters*, vol. 99, p. 201110, 2011.
- [61] Z. Liu and A. K. Kim, "Review of recent developments in fire detection technologies," *Fire Protection Engineering*, vol. 13, 2013.
- [62] A. A. Khan, V. Vrabie, J. I. Mars, A. Girard, and G. D'Urso, "Automatic Monitoring System for Singularity detection in dikes by DTS data measurement," *Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 58, p. 2167, 2010.
- [63] A. Mishra and A. Soni, "Leakage Detection using Fibre Optics Distributed Temperature Sensing," *Pipeline Technology Conference*, 2011.
- [64] D. Inaudi, R. Belli, and R. Walder, "Detection and localization of micro leakage using distributed fibre optic sensing," *International pipeline conference*, 2008.
- [65] A. F. Fernandez, P. Rodeghiero, B. Brichard, F. Berghmans, A. H. Hartog, P. Hughes, *et al.*, "Radiation-Tolerant Raman Distributed Temperature monitoring system for large nuclear infrastructures," *Transactions on nuclear science*, vol. 52, p. 2689, 2005.
- [66] A. Ukil, H. Braendle, and P. Krippner, "Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications," *Sensors*, vol. 12, 2012.
- [67] J. J. Smolen and A. v. d. Spek, "Distributed Temperature Sensing," *A DTS Primer for Oil&Gas production*, 2003.
- [68] C. E. Campanella, G. Ai, and A. Ukil, "Distributed Fiber Optics Techniques for gas network monitoring," *Industrial Technology 2016*.
- [69] M. Tatin, V. Lamour, S. Bonelli, and A. Garandet, "Leak detection in earth dams and levees using optical fiber distributed temperature sensor," 2017.
- [70] K. Radzicki and S. Bonelli, "Thermal Seepage Monitoring in the Earth Dams with Impulse Response Function Analysis Model," *ICOLD*, pp. 624-629, 2010.
- [71] A. Kobayakov, M. Sauer, and D. Chowdhury, "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers," *Advances in Optics and Photonics*, vol. 2, p. 1, 2009.

- [72] V. Lanticq, "Mesure répartie de température de de déformations par diffusion Brillouin," *Thesis*, 2009
- [73] R. Parmentier and M. Lequime, "Substrate-strain-induced tunability of dense wave length division multiplexing thin film fibers," *Optics Letters*, vol. 28, p. 728, 2003.
- [74] L. Thevenaz, S. F. Mafang, and J. Lin, "Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system," *Opt Express*, vol. 21, pp. 14017-35, Jun 17 2013.
- [75] E. S. Z. Yan and L. S. Chyan, "Optimization of SBS Suppression for BOTDR fiber optic using Design of Experiment," 2009
- [76] M. Nikles, P. Robert, and L. Thevenaz, "Brillouin Gain Spectrum Characterisation in single mode optical fiber," *Journal of LightWave Technology*, vol. 15, 1997
- [77] J. M. Lopez-Higuera, M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson, and B. Culshaw, "Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous Raman and Brillouin scattering," vol. 5502, pp. 488-491, 2004.
- [78] A. Fellay, L. Thevenaz, M. Facchini, M. Nikles, and P. Robert, "Distributed sensing using stimulated Brillouin scattering towards ultimate resolution," *International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. OWD3-2, 1997.
- [79] O. Optics, "Datasheet DSTS combo module," www.ozoptics.com.
- [80] Omnisens, "Datasheet DSTS Dual vision," www.omnisens.com.
- [81] K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada, and T. Kurashima, "Coherent self heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in fiber optic," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, 1994.
- [82] L. Thevenaz, S. F. Mafang, and J. Lin, "Impact of pump depletion on the determination of the Brillouin gain frequency in distributed fiber sensors," *SPIE*, vol. 7753, pp. 775322-775322-4, 2011.
- [83] M. Dossou, "Les modes de résonance acoustiques dans les fibres optiques microstructurées - Applications aux capteurs répartis," *These*, 2011.
- [84] Bao, "32km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber," *Optics Express*, vol. Vol. 18, No. 18, 1993
- [85] X. Bao, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber," *Optics Letters*, vol. 18, p. 552, 1993.
- [86] V. Lanticq, S. Jiang, R. Gabet, Y. Jaouën, F. Taillade, G. Moreau, *et al.*, "Self-referenced and single-ended method to measure Brillouin gain in monomode optical fibers," *Optics Letters*, vol. 34, p. 1018, 2009.
- [87] K. Hotate, "Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques," *Optical Fiber Technology*, vol. 19, pp. 700-719, 2013.
- [88] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR)," *Optics Express*, vol. 16, p. 12148, 2008.
- [89] K. Hotate and M. Tanaka, "Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1cm spatial resolution by correlation based continuous wave technique," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, 2002.

- [90] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation domain reflectometry based on double modulation scheme," *Optics Express*, vol. 18, 2010.
- [91] D. Garus, K. Krebber, F. Schliep, and T. Gogolla, "Distributed sensing technique based on Brillouin optical fiber frequency domain analysis," *Optics Letters*, vol. 21, p. 1402, 1996.
- [92] R. Bernini, A. Minardo, and L. Zeni, "Distributed Sensing at Centimeter-Scale Spatial Resolution by BOFDA: Measurements and Signal Processing," *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, pp. 48-56, 2012.
- [93] T. Gogolla and K. Krebber, "Distributed Beat Length Measurement in SM FO using stimulated Brillouin scattering and frequency domain analysis," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, 2000.
- [94] C. Zhang, X. Bao, I. F. Ozkan, M. Mohareb, F. Ravet, M. Du, *et al.*, "Prediction of the pipe buckling by using broadening factor with distributed Brillouin fiber sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 14, pp. 109-113, 2008.
- [95] F. Ravet, L. Zoua, X. Bao, L. Chena, R. F. Huang, and H. A. Khoo, "Detection of buckling in steel pipeline and column by the distributed Brillouin sensor," *Optical Fiber Technology*, vol. 12, pp. 305-311, 2006.
- [96] X.-F. Zhao, L. Li, Q. Ba, and J.-P. Ou, "Scour monitoring system of subsea pipeline using distributed Brillouin optical sensors based on active thermometry," *Optics & Laser Technology*, vol. 44, pp. 2125-2129, 2012.
- [97] V. Lanticq, E. Bourgeois, P. Magnien, L. Dieleman, G. Vincelas, A. Sang, *et al.*, "Soil-embedded optical fiber sensing cable interrogated by Brillouin optical time-domain reflectometry (B-OTDR) and optical frequency-domain reflectometry (OFDR) for embedded cavity detection and sinkhole warning system," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, p. 034018, 2009.
- [98] M. Enckell, B. Glisic, F. Myrvoll, and B. Bergstrand, "Evaluation of a large-scale bridge strain, temperature and crack monitoring with distributed fibre optic sensors," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 1, pp. 37-46, 2011.
- [99] C. A. Galindez-Jamiy and J. M. López-Higuera, "Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications," *Journal of Sensors*, vol. 2012, pp. 1-17, 2012.
- [100] L. Bao, "Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing," *Optics Express*, vol. Vol. 16, No. 26, 2008
- [101] A. W. Brown, B. G. Colpitts, and K. Brown, "Distributed Sensor Based on Dark-Pulse Brillouin scattering," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, p. 1505, 2005.
- [102] L. Thevenaz and S. F. Mafang, "Distributed fiber sensing using Brillouin echoes."
- [103] S. F. Mafang, "Brillouin Echoes for Advanced Distributed Sensing in optical fibers," *Thèse*, 2011.
- [104] X. Angulo-Vinuesa, S. Martin-Lopez, J. Nuño, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, *et al.*, "Raman-Assisted Brillouin Distributed

- Temperature Sensor Over 100 km featuring 2m Resolution and 1.2°C Uncertainty," *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 30, 2012.
- [105] M. A. Soto, X. Angulo-Vinuesa, S. Martin-Lopez, S.-H. Chin, J. D. Ania-Castañon, P. Corredera, *et al.*, "Extending the Real Remoteness of Long-Range Brillouin optical time domain fiber analysers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, p. 152, 2014.
- [106] Y. Dong, L. Chen, and X. Bao, "Extending the Sensing Range of Brillouin Optical Time-Domain Analysis Combining Frequency Division Multiplexing and In-Line EDFAs," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, p. 1161, 2012.
- [107] M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, and T. P. Newson, "150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification," *Journal of optical society of america*, vol. 22, p. 1321, 2005.
- [108] Y. Dong, L. Chen, and X. Bao, "Time-division multiplexing-based BOTDA over 100 km sensing length," *Optics Letters*, vol. 36, p. 277, 2011.
- [109] M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, and T. P. Newson, "100 km distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, 2004.
- [110] P. Chaube, B. G. Colpitts, D. Jagannathan, and A. W. Brown, "Distributed fiber optic sensor dynamic strain measurement," *Sensors*, vol. 8, pp. 1067-1072, 2008.
- [111] A. Voskoboinik, J. Wang, B. Shamee, S. Nuccio, L. Zhang, A. Willner, *et al.*, "SBS based fiber optical sensing using frequency domain simultaneous tone interrogation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, 2011.
- [112] A. Voskoboinik, O. F. Yilmaz, A. W. Willner, and M. Tur, "Sweep free distributed Brillouin time domain analyser SF-BOTDA," *Opt. Express*, vol. 19, 2011.
- [113] R. Bernini, A. Minardo, and L. Zeni, "Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering," *Opt. Letters*, vol. 34, 2009.
- [114] A. Minardo, G. Porcaro, D. Giannetta, R. Bernini, and L. Zeni, "Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors," *Applied Optics*, vol. 52, pp. 3770-6, 2013.
- [115] Y. Peled, "Strain sensors and optical communication in optical fibers using the Brillouin effect," *Thesis*, 2014.
- [116] K. Tsuji, H. Nodan, and N. Onodera, "Sweep free Brillouin optical time domain analysis using two individual laser sources," *Optical review*, vol. 19, pp. 381-387, 2012.
- [117] D. Ba, B. Wang, D. Zhou, M. Yin, Y. Dong, H. Li, *et al.*, "Distributed measurement of dynamic strain based on multi-slope assisted fast BOTDA," *Opt Express*, vol. 24, pp. 9781-93, May 2 2016.
- [118] D. Zhou, Y. Dong, B. Wang, T. Jiang, D. Ba, P. Xu, *et al.*, "Slope-assisted BOTDA based on vector SBS and frequency-agile technique for wide-strain-range dynamic measurements," *Optics Express*, vol. 25, p. 1889, 2017.

- [119] A. Masoudi, M. Belal, and T. P. Newson, "Distributed dynamic large strain optical fiber sensor based on the detection of spontaneous Brillouin scattering," *Opt Lett*, vol. 38, pp. 3312-5, Sep 1 2013.
- [120] W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "Distributed Dynamic-Strain Sensing Based on Brillouin optical correlation domain analysis," *CLEO*, 2009.
- [121] M. K. Kwang Yong Song, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "High-repetition-rate distributed Brillouin sensor based on optical correlation domain analysis with differential frequency modulation," *Optics Letters*, vol. 36, 2011.
- [122] G. Tu, Y. Zhang, Z. Ying, X. Zhang, and L. Lv, "Strain variation measurement with short-time Fourier transform-based Brillouin optical time-domain reflectometry sensing system," *Electronics Letters*, vol. 50, pp. 1624-1626, 2014.
- [123] J. R. Thomson, "Management Systems to Prevent or Mitigate Accidents," pp. 155-174, 2015.
- [124] S. Girgin and E. Krausmann, "Historical analysis of U.S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 578-590, 2016.
- [125] M. Saghafi and M. B. Ghofrani, "Accident management support tools in nuclear power plants: A post-Fukushima review," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 92, pp. 1-14, 2016.
- [126] R. E. Sanders, "Maintenance-induced accidents and process piping problems," pp. 165-207, 2015.
- [127] Timoshenko, "Strength of Materials (Part I)."
- [128] L. Chevalier, "Mécanique des systèmes et des milieux déformables," *Livre*, 1996.
- [129] R. Fortunier, "Comportement mécanique des matériaux," *Cours Ecole Nationale Supérieure des Mines*.
- [130] E. Buchoud, "Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique," *Thèse*, 2014.
- [131] F. Lirola, F.-R. Pionetti, J. Agoumi, and A. Sundermann, "Development and qualification of an innovative and cost efficient heat traced flowline optimized for J Laying," *Offshore Technology Conference*, vol. OTC-27044-MS, 2016.
- [132] M. O. v. Deventer and A. J. Boot, "Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, p. 585, 1994.
- [133] X. Bao, "Polarization dependence of Brillouin linewidth and peak frequency due to fiber inhomogeneity in single mode fibers," *Optics Express*, vol. Vol. 20, No. 6, 2012
- [134] S. M. Foaleng, F. Rodríguez-Barrios, S. Martin-Lopez, M. González-Herráez, and L. Thévenaz, "Detrimental effect of self-phase modulation on the performance of Brillouin distributed fiber sensors," *Optics Letters*, vol. 36, 2011.
- [135] K. Sasahira, K. Kuroda, and Y. Yoshikuni, "Pulse amplification characteristics of a CW pumped EDFA," *OECC2010*, 2010.
- [136] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems," *Livre, 4ème édition*, 2010.

- [137] D. Iida and F. Ito, "Low-Bandwidth Cost-Effective Brillouin Frequency Sensing Using Reference Brillouin-Scattered Beam," *Photonics Technology Letters*, vol. 20, 2008.
- [138] H. Yunqi, Y. Qingl, P. Zheng-qing, C. Hai-wen, and Q. Rong-hui, "Analysis of bandwidth reduced local oscillator in Brillouin optical time domain reflectometry," *Optical Sensors and Biophotonics III*, vol. 8311 2011.
- [139] S. S. Jihong Geng, Mike Blake, and Shibin Jiang, "Distributed fiber temperature and strain sensor using coherent radio frequency detection of spontaneous Brillouin scattering," *appl Optics*, vol. 46, 2007.
- [140] R. W. Boyd, K. Rzazewski, and P. Narum, "Noise Initiation Of stimulated Brillouin scattering," *Physical review A*, 1990.
- [141] Corning, "Datasheet SMF-28 ULL," www.corning.com.
- [142] Y. Peled, A. Motil, and M. Tur, "Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing," *Optics Express*, vol. 20, 2012

Liste des publications et conférences

- [1] Damien Maraval, Christian Medrano, Vincent Lamour – Surveillance de canalisations par capteur à fibre optique répartie (Brillouin et Raman) : Etude de cas Canalisation SPMR – Conférence, Institut de soudure – 2015.

- [2] Damien Maraval, Vincent Lanticq, Vincent Lamour – Surveillance de canalisations par fibre optique répartie (Brillouin et Raman) – Conférence, Journée REX GESIP (Groupe d'Etude et de Sécurité des Industrie Pétrolières et CHimiques) – 2015.

- [3] Damien Maraval, Renaud Gabet, Yves Jaouen, Vincent Lamour - Dynamic Optical Fiber sensing with Brillouin Optical Time Domain Reflectometry: Application to pipeline vibration monitoring – Article, Journal of Lightwave Technology – 2016.

- [4] Damien Maraval, Renaud Gabet, Yves Jaouen, Vincent Lamour - Slope-Assisted BOTDR for pipeline vibration measurements – Poster, Optical Fiber Sensor – poster – 2017.

- [5] SAIPEM SA & CEMENTYS - Vincent Lamour, Damien Maraval – numéro de dépôts 16 50826, date de dépôts : 02 Février 2016

Dynamic strain measurement based on spontaneous Brillouin scattering B-OTDR

Optical fiber sensors are currently booming in the world of industry and are the subject of numerous research and innovations. Benefiting from technological advances in the field of telecommunications, the costs of manufacturing and implementing optical fibers and opto-electronic equipment have decreased, making these systems more acknowledged but also more accessible.

The area of choice for fiber optic sensors is the civil engineering, where increasingly complex structures require long-term monitoring. However, in recent years they have also attracted the interest of many actors in other fields such as energy, aeronautics, aerospace and security. Despite the powerful calculation codes and models used in infrastructure building, it is not possible to predict all events that may affect its integrity; monitoring its temperature or strain is sometimes necessary from its construction and throughout its lifetime. Fiber optic instrumentation is now recognized for its many advantages over more traditional technologies such as vibrating cords.

This thesis deals with the study of the different technologies of distributed optical fiber sensors capable of covering distances of several tens of kilometers. Several measurement techniques based on optical backscattered light analysis are now available. Since the 1990s, systems based on Raman effect measure the absolute temperature of optical fiber environment with still lower measurement resolutions (in the order of one hundredth of degrees Celsius); systems based on the Brillouin effect allow strain measurement over several tens of kilometers with spatial resolutions less than meters; and, more recently, systems based on the Rayleigh effect, capable of measuring the effect of acoustic wave pressure on the core of the optical fiber, offer new possibilities and applications. The industrial partners of Cementys made it possible to carry out numerous projects of instrumentation by sensors distributed to fiber; some results are detailed.

In parallel of this industrial aspect, the research work carried out during these three years of collaboration between Cementys and Télécom ParisTech aims to design a new distributed and dynamic strain measurement system based on the analysis of spontaneous Brillouin backscatter by reflectometry. Slope assisted technique is used to accelerate the measurement acquisition, currently limited today to static events because of their actual principle of acquisition of the Brillouin backscattering spectrum. A state of the art of the various techniques and systems of distributed and dynamic measurement by Brillouin effect is realized to show the current trend among the research laboratories.

The performance of our measurement system will be determined on the experimental analysis of strain and displacement of an instrumented steel tube by optical fiber. We will then demonstrate an acquisition rate of 10 Hz with a spatial resolution of 1m on a portion of optical fiber of 100m with the means and equipment made available.

Keywords : optical fiber sensors, distributed measurement, Rayleigh, Raman and Brillouin backscatter, dynamic temperature strain and displacement measurement, structural health monitoring (SHM), material mechanics.

Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR

Les systèmes de mesure par fibre optique sont actuellement en plein essor dans le monde de l'industrie et font l'objet de nombreuses recherches et innovations. Bénéficiant des avancées technologiques du domaine des télécommunications, les coûts de fabrication et de mise en œuvre des fibres optiques et des équipements opto-électroniques ont diminué, rendant ces systèmes plus connus mais aussi plus accessibles.

Le domaine de prédilection pour les capteurs à fibre optique est le génie civil, où les structures de plus en plus complexes nécessitent un suivi sur le long terme. Cependant, depuis quelques années, ils attirent également la curiosité de nombreux industriels dans d'autres domaines comme l'énergie, l'aéronautique, l'aérospatial et la sécurité. Malgré les puissants codes de calculs et modèles utilisés lors de la construction d'une infrastructure, il n'est pas possible de prévoir tous les événements pouvant affecter son intégrité ; un suivi de sa température ou de sa déformation est parfois nécessaire dès sa construction et pendant toute sa durée de vie. L'instrumentation par fibre optique est aujourd'hui reconnue pour ces nombreux avantages vis-à-vis des technologies plus traditionnelles telles que les cordes vibrantes.

Cette thèse porte sur l'étude des différentes technologies de capteurs répartis à fibre optique capables de couvrir des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Plusieurs techniques de mesure fondées sur l'analyse des rétrodiffusions optiques sont aujourd'hui disponibles. Depuis les années 1990, les systèmes utilisant l'effet Raman mesurent la température de son environnement proche avec des résolutions de mesure toujours plus basses (de l'ordre du centième de degré Celsius) ; les systèmes basés sur l'effet Brillouin permettent des mesures de déformation sur plusieurs dizaines de kilomètres avec des résolutions spatiales inférieures aux mètres ; et enfin, plus récemment, les systèmes basés sur l'effet Rayleigh, capables de mesurer l'effet de la pression des ondes acoustiques sur le cœur de la fibre optique, offrent encore de nouvelles possibilités et applications. Les partenaires industriels de Cementys ont permis de réaliser de nombreux projets d'instrumentation par capteurs répartis à fibre dont les résultats de certains d'entre eux sont détaillés dans cette thèse.

En parallèle de cet aspect industriel, le travail de recherche effectué au cours de ces trois années de collaboration entre Cementys et Télécom ParisTech vise à concevoir un nouveau système de mesure répartie et dynamique de déformation fondé sur l'analyse en réflectométrie des rétrodiffusions Brillouin spontanées. Il utilisera la technique du flanc de frange afin d'accélérer les mesures actuellement limitées à des événements statiques en raison de leur principe d'acquisition du spectre de rétrodiffusion Brillouin. Un état de l'art des différentes techniques et systèmes de mesure répartie et dynamique par effet Brillouin est réalisé pour montrer la tendance actuelle parmi les laboratoires de recherches du monde entier.

Les performances de notre système de mesure seront déterminées par l'analyse expérimentale de la déformation et du déplacement d'un tube instrumenté par fibre optique mis en mouvement. Un taux d'acquisition de 10 Hz est démontré avec une résolution spatiale de 1m sur une portion de fibre optique de 100 m avec les moyens et équipements mis à disposition.

Mots clés : Capteurs à fibre optique, mesure répartie, rétrodiffusions Rayleigh, Raman et Brillouin, mesure dynamique de température, déformation et déplacement, surveillance de l'état de santé d'une structure (*SHM*), mécanique des matériaux.