



HAL
open science

Solutions aux limites des interrogateurs B-OTDR pour la surveillance d'infrastructures : augmentation de la portée de mesure et décorrélation des paramètres de température et de déformation

Pierre Clement

► To cite this version:

Pierre Clement. Solutions aux limites des interrogateurs B-OTDR pour la surveillance d'infrastructures : augmentation de la portée de mesure et décorrélation des paramètres de température et de déformation. Optique / photonique. Institut Polytechnique de Paris, 2020. Français. NNT : 2020IPPAT042 . tel-03200750

HAL Id: tel-03200750

<https://theses.hal.science/tel-03200750>

Submitted on 16 Apr 2021

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.

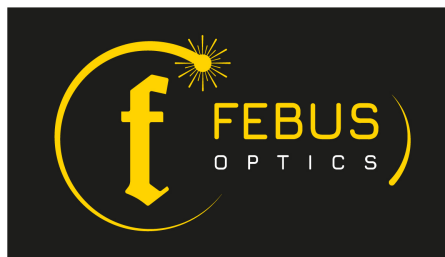
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INSTITUT
POLYTECHNIQUE
DE PARIS

NNT : 2020IPPAT042

Thèse de doctorat



Solutions aux limites des interrogateurs B-OTDR pour la surveillance d'infrastructures : augmentation de la portée de mesure et décorrélation des paramètres de température et de déformation

Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris
préparée à Télécom Paris

École doctorale n°626 École doctorale de l'Institut Polytechnique de Paris (ED IP
Paris)

Spécialité de doctorat : Electronique et Optoélectronique

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 15 décembre 2020, par

PIERRE CLÉMENT

Composition du Jury :

Marc-André GUTSCHER Directeur de recherche CNRS, UBO, Brest	Président
Thibaut SYLVESTRE Directeur de recherche CNRS, Institut FEMTO-ST, Besançon	Rapporteur
Nicolas DUBREUIL Professeur, IOGS, Palaiseau	Rapporteur
Moshe TUR Professeur, Univ, Tel-Aviv	Examineur
Anne-Laure BILLABERT Maître de Conférence, CNAM, Paris	Examineur
Renaud GABET Maître de Conférence, Télécom ParisTech	Directeur de thèse
Yves JAOUEN Professeur, Télécom ParisTech	Co-directeur de thèse
Cyril GUIDOUX Ingénieur de recherche, Geophyconsult, Chambéry	Invité
Vincent LANTICQ Président et Directeur Technique, FEBUS Optics, Pau	Invité
Oleg VALISHIN Business Innovation Manager, Sercel, Carquefou	Invité

Remerciements

Je remercie dans un premier temps Vincent Lanticq et Etienne Almorici pour m'avoir fait confiance et donné l'opportunité de réaliser cette thèse au sein de l'entreprise FEBUS Optics. Merci Vincent pour m'avoir enseigné tous les "tricks" de la fibre optique et pour m'avoir si bien conseillé dans mes pistes de recherche. FEBUS Optics, que j'ai intégré peu après sa création, m'a apporté énormément à la fois professionnellement et personnellement et j'en profite pour saluer son développement rapide et lui souhaite le meilleur par la suite.

Je souhaite également remercier sincèrement Renaud Gabet et Yves Jaouen, mes deux directeurs de thèse qui m'ont accompagné durant tout ce travail. Leur implication constante sur ce projet, malgré l'éloignement géographique, leurs conseils avisés, leurs connaissances et compétences scientifiques m'ont été précieuses pour mener à bien cette thèse. Cela a été un vrai plaisir de travailler ces années avec vous, autant professionnellement qu'humainement, et j'espère que l'on aura l'occasion de continuer notre collaboration. Renaud, mon seul regret aura été de ne pas avoir eu l'occasion de t'affronter au tennis sur ton terrain attitré de la rue Barrault.

Je remercie aussi l'ensemble des membres du jury pour avoir évalué cette thèse et pour toutes leurs questions et remarques pertinentes apportées sur ce travail. Thibaut Sylvestre et Nicolas Dubreuil pour avoir pris le temps nécessaire pour lire et évaluer avec attention ce long manuscrit. Marc-André Gutscher, Moshe Tur et Anne-Laure Billabert qui ont accepté d'être examinateurs et pour ces discussions pertinentes durant la soutenance. Enfin Cyril Guidoux et Oleg Valishin, membres du jury invités, qui ont apporté avec intérêt leur vision industrielle sur mon travail.

Merci également à toute l'équipe de recherche du département COMELEC de Télécom ParisTech et notamment Ali Kabalan pour ces longues discussions passionnantes que nous avons eu sur toutes les techniques de mesure par fibre optiques possibles et inimaginables.

Je remercie bien évidemment l'ensemble de l'équipe de FEBUS Optics, particulièrement Gaëtan Calbris et Simon Richard pour leur précieuse aide et les réflexions qui en ont découlé sur la science de la mesure par fibre optique. Merci également à Clément Coussirat, dont j'aurais sûrement dû suivre les conseils et travailler sur l'accélération de la vitesse de la lumière pour résoudre la majorité de mes problèmes. Merci à Julien Juyon que j'ai souvent accusé à tort lorsqu'un composant électronique ne marchait pas dans mes expérimentations, je m'en excuse... Et merci à tous les autres dont je n'ai pas cité les prénoms (cela ferait maintenant une trop grande liste), pour votre soutien jusqu'à la dernière minute de cette thèse et de la soutenance.

Finalement je souhaite remercier mes proches, mes parents, ma sœur, mes amis, pour m'avoir toujours soutenu tout au long de mes études et ce, jusqu'au point final qui a constitué la soutenance qui s'est déroulée dans le contexte si particulier de cette crise sanitaire. Merci également de m'avoir poussé à faire les bons choix dans ma vie. Merci Chloé, pour ta patience et tes encouragements durant toute cette période où j'ai bien évidemment connu des hauts et des bas. Je pense qu'il n'en a rien à faire, mais merci quand même à ton lapin, Petrus, que j'ai souvent embêté lorsque je subissais le syndrome de la feuille blanche.

Enfin j'ai une pensée émue pour mes grands-parents qui ont toujours eu beaucoup de fierté et d'admiration pour ce que je faisais, bien que la science soit un sujet très abstrait pour eux. Il ne pourrons malheureusement pas voir la concrétisation de ce projet, mais je suis sûr qu'ils en auraient été très heureux et fiers. ...

Table des matières

Remerciements	iii
Introduction générale	1
I L'instrumentation optique pour la surveillance des infrastructures de l'énergie	5
I.A La surveillance des infrastructures de l'énergie	5
I.B Les capteurs de mesure distribuée par fibre optique	6
I.B.1 Les caractéristiques d'une fibre optique et son intégration pour la surveillance de structures industrielles	6
I.B.1.a Principe général d'une fibre optique	7
I.B.1.b Propagation de la lumière dans une fibre optique	7
I.B.1.c Les différents types de fibres optiques	9
I.B.1.d Fabrication d'un câble à fibres optiques	12
I.B.1.d.i Les étapes de fabrication d'un câble	12
I.B.1.d.ii Surveillance en temps réel de l'intégrité d'un câble à fibres optiques durant sa production	14
I.B.2 Le phénomène de diffusion de la lumière appliqué à la mesure répartie par fibre optique	16
I.B.2.a La diffusion Rayleigh dans une fibre optique	17
I.B.2.b La diffusion Brillouin dans une fibre optique	17
I.B.2.c La diffusion Raman dans une fibre optique	18
I.B.3 Les capteurs de mesure répartie par fibre optique	19
I.B.3.a La réflectométrie optique dans le domaine temporel	20
I.B.3.b Définitions métrologiques des paramètres d'acquisition de la mesure distribuée par fibre optique	22
I.C Conclusion du chapitre	25
II Caractérisation et optimisation d'un système B-OTDR	29
II.A La diffusion Brillouin dans les fibres optiques	29
II.A.1 La diffusion Brillouin spontanée	29
II.A.2 La diffusion Brillouin stimulée	31
II.A.3 Les notions principales de la diffusion Brillouin	32
II.A.4 La sensibilité de la diffusion Brillouin à la température et à la déformation	34
II.A.4.a La dépendance de la fréquence de diffusion Brillouin à la température et à la déformation	34
II.A.4.b La dépendance de l'intensité de diffusion Brillouin à la température et à la déformation	35

II.A.4.c	La matrice de sensibilité de la diffusion Brillouin à la température et à la déformation	36
II.A.5	Les techniques de mesure répartie par diffusion Brillouin utilisées dans l'industrie	38
II.A.5.a	Les interrogations de type B-OTDA	39
II.A.5.b	Les interrogations de type B-OTDR	42
II.A.5.c	Avantages et inconvénients des deux technologies et limitations respectives	44
II.B	Développement d'une nouvelle génération d'interrogateur B-OTDR	45
II.B.1	Développement et caractérisation d'un système B-OTDR	46
II.B.1.a	Description générale	46
II.B.1.b	Génération des impulsions optiques	47
II.B.1.c	Fibre optique de référence	49
II.B.1.d	Traitement numérique pour une mesure répartie de température ou de déformation	50
II.B.1.e	Réalisation d'une mesure distribuée de rétrodiffusion Brillouin	54
II.B.2	Performances du système obtenues	56
II.B.2.a	Validation de la répétabilité de la mesure en température	57
II.B.2.b	Précision de mesure de l'interrogateur	60
II.C	Instrumentation d'une structure par un B-OTDR	60
II.C.1	Surveillance d'un pipeline enfoui dans un sol gelé	61
II.C.2	Caractérisation des câbles à fibres optiques capteurs	63
II.C.2.a	Câbles à structure serrée (tight-buffered)	63
II.C.2.b	Câbles à structure libre (loose-tube)	65
II.C.3	Mesure de déformation d'un pipeline dans un sol gelé	66
II.C.4	Conclusion de l'étude	70
II.D	Conclusion du chapitre	71
III	Accroissement de la portée d'un interrogateur B-OTDR	77
III.A	Limitations en distance de la mesure B-OTDR	77
III.A.1	Limitations liées à l'atténuation optique linéaire	77
III.A.2	Limitations liées aux effets non-linéaires dans la fibre optique	78
III.A.2.a	L'effet Kerr	78
III.A.2.b	L'auto-modulation de phase	79
III.A.3	Impact des effets non-linéaires sur la mesure B-OTDR	80
III.A.3.a	Impact de l'auto-modulation de phase sur la mesure B-OTDR	80
III.A.3.b	Impact du seuil de diffusion stimulée sur la mesure B-OTDR	84
III.A.3.c	Paramétrage de l'interrogateur pour limiter les effets non-linéaires	85
III.B	Allongement de la portée de mesure d'un système B-OTDR	86
III.B.1	État de l'art résumé et piste suivie durant la thèse.	87
III.B.2	Module de ré-amplification du signal sonde et du signal rétrodiffusé	88
III.B.2.a	Conception d'un module de ré-amplification pour une mesure B-OTDR	88

III.B.2.b	Modules de régénération du signal optique	90
III.B.2.b.i	Étude de la dégradation du signal après propagation dans N km de fibre puis passage dans un amplificateur unidirectionnel	91
III.B.2.b.ii	Performances de l'amplificateur contra-propagatif inclus dans le module d'amplification bidirectionnelle	92
III.B.2.b.iii	Variation de la puissance de sortie de l'amplificateur contra-propagatif par ajout d'un atténuateur	94
III.B.2.b.iv	Ajout d'un filtre en sortie d'EDFA pour filtrer l'ASE	95
III.B.2.b.v	Paramétrage du module de ré-amplification pour une mesure B-OTDR de 100 km ou plus	97
III.B.3	Performances métrologiques des modules d'amplification du signal avec le système B-OTDR	97
III.B.3.a	Mesure B-OTDR sur 100 km	97
III.B.3.b	Mesure B-OTDR sur 150 km	100
III.C	Conclusion du chapitre	103
IV	Développement d'un système B-OTDR pour la mesure de température indépendante de la déformation	107
IV.A	État de l'art des solutions de séparation de la température et de la déformation de la mesure par fibre optique B-OTDR	107
IV.A.1	Mesures comparatives sur des câbles différents	108
IV.A.2	Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Raman	108
IV.A.3	Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Rayleigh TW-COTDR	109
IV.A.4	Utilisation de fibres optiques spécifiques	109
IV.A.5	Double sensibilité en fréquence et en intensité de la diffusion Brillouin	110
IV.A.6	Piste suivie durant cette thèse	111
IV.B	Développement d'un interrogateur pour la mesure distribuée et simultanée des rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin spontanées	111
IV.B.1	Réalisation d'un système d'interrogation combiné C-OTDR et B-OTDR résolu en fréquence et en puissance	112
IV.B.1.a	Description du schéma optique	112
IV.B.1.b	Originalités majeures de ce nouveau système par rapport au B-OTDR standard	114
IV.B.1.c	Mesures préliminaires des intensités de rétrodiffusion Rayleigh et Brillouin distribuées : limites liées au bruit de cohérence	117
IV.B.2	Évaluation des pertes optiques par un système C-OTDR	117
IV.B.2.a	Origine des différents bruits sur l'intensité du signal de rétrodiffusion Rayleigh	118
IV.B.2.b	Définition du bruit de cohérence sur une mesure C-OTDR	118
IV.B.2.c	Approche théorique de la réduction du bruit de cohérence CRN sur une mesure C-OTDR	121

IV.B.2.d	Caractérisations expérimentales de la réduction du bruit CRN par la modification de la source laser	123
IV.B.2.d.i	Évolution du bruit CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser	124
IV.B.2.d.ii	Évolution du bruit CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions	125
IV.B.2.d.iii	Évolution du bruit CRN en fonction de la résolution spatiale de mesure	127
IV.B.2.d.iv	Comparaison des valeurs de CRN expérimentales avec la théorie	128
IV.B.2.d.v	Conclusion de l'étude sur la réduction du bruit de cohérence	129
IV.B.2.e	Algorithme de réduction numérique du bruit de cohérence sur une mesure C-OTDR	129
IV.B.3	Discrimination de la mesure de température et de déformation sur la mesure de diffusion Brillouin	131
IV.B.3.a	Banc d'essai de validation d'une mesure distribuée indépendante de la température et de la déformation	131
IV.B.3.b	Mesure distribuée de température indépendante de la déformation	132
IV.B.3.b.i	Détermination des pertes optiques sur la fibre et correction sur la mesure de diffusion Brillouin	136
IV.B.3.b.ii	Mesure distribuée du ratio de Landau Placzek	137
IV.B.3.c	Détermination des coefficients de sensibilité en température et en déformation de l'interrogateur	138
IV.B.4	Performances de la mesure répartie de déformation indépendante de la température par rétrodiffusion Brillouin spontanée	140
IV.C	Déploiement du système pour une application de forage	142
IV.C.1	Présentation du contexte	142
IV.C.2	Mesures B-OTDR standard et Raman OTDR	145
IV.C.3	Mesure B-OTDR DSTS de température et de déformation	146
IV.D	Conclusion du chapitre	149
	Conclusion générale	155
	A Annexe A : Caractéristiques des fibres optiques monomodes utilisées pour l'instrumentation	157
	B Annexe B : Étude bibliographique sur l'augmentation de la portée de mesure des interrogateurs B-OTDR/B-OTDA	161
	B.A Codage des impulsions optiques	161
	B.B Utilisation de la technique de diversité de longueur d'onde pour améliorer les performances des interrogateurs	164

B.C	BOTDR et amplification Raman	165
B.D	Amélioration de la portée d'un système BOTDR avec un EDFA en ligne	167
B.E	Utilisation de plusieurs fibres avec différents décalages de fréquence Brillouin et des EDFA pour une portée de 150 km	168
C	Annexe C : Étude bibliographique des solutions de séparation de la température et de la déformation sur la mesure de diffusion Brillouin	171
C.A	Mesures comparatives sur des câbles différents	171
C.B	Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Raman	174
C.C	Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Rayleigh résolues en fréquence	175
C.D	Utilisation de fibres optiques spécifiques	176
C.E	Double sensibilité en fréquence et en intensité de la diffusion Brillouin	178
	Bibliographie	181
	Liste des publications et conférences	193

Table des figures

I.1	Courbes d'atténuation de la lumière dans une fibre optique en fonction de la longueur d'onde.	8
I.2	Géométrie et profil d'indice d'une fibre optique multimode	10
I.3	Géométrie et profil d'indice d'une fibre optique monomode	10
I.4	Évolution de la polarisation de la lumière dans une fibre optique suivant la longueur de battement	11
I.5	Coupe d'une fibre optique à maintien de polarisation	12
I.6	Coupe d'un câble à fibres optiques possédant plusieurs gaines de protection [15].	13
I.8	Illustration du dispositif de contrôle d'intégrité du câble à fibres optiques fabriqué.	14
I.9	Mesures successives de la déformation de la fibre optique insérée progressivement dans le câble en fonction de la distance depuis l'interrogateur.	15
I.10	Mesure de l'état de déformation de la fibre optique insérée dans le câble au niveau de la ligne de production.	16
I.11	Les trois diffusions présentes dans une fibre optique	16
I.12	Schéma des interactions lumière-matière donnant lieu à la diffusion Raman dans une fibre optique.	18
I.13	Principe de fonctionnement général d'un système OTDR.	21
I.14	Courbe typique d'une mesure réalisée par un système OTDR sur une ligne optique [27]	22
II.1	Couplage d'une onde optique incidente sur une onde acoustique permettant la rétrodiffusion d'une onde Brillouin Stokes.	30
II.2	Génération de la diffusion Brillouin stimulée [31].	31
II.3	Évolution de la puissance de seuil Brillouin en fonction de la longueur pour une fibre standard SMF28e.	33
II.4	Évolution du spectre de diffusion Brillouin en fonction de la température et de la déformation [43].	37
II.5	Principe de fonctionnement d'un interrogateur B-OTDA [27].	40
II.6	Schéma optoélectronique général d'un interrogateur B-OTDA d'après [31].	40
II.7	Fonctionnement d'un interrogateur B-OTDA à double impulsions d'après [51].	41
II.8	Évolution du spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré par un B-OTDA à double impulsions en fonction de la durée de première impulsion. [51].	42
II.9	Fonctionnement d'un interrogateur B-OTDR.	43
II.10	Schéma opto-électronique détaillé de l'interrogateur B-OTDR nommé FEBUS G1-R.	46
II.11	Impulsions électriques et optiques générées par le B-OTDR.	48

II.12	Spectre optique du signal rétrodiffusé dans la fibre de référence mesuré avec un analyseur de spectre optique	49
II.13	Spectres électriques du signal rétrodiffusé dans la fibre de référence	51
II.14	Étapes du traitement numérique réalisé par l'interrogateur FEBUS G1-R [68].	52
II.15	Exemple d'une cartographie de rétrodiffusion mesurée par l'interrogateur B-OTDR.	55
II.16	Mesure distribuée de la fréquence de diffusion Brillouin réalisée par le B-OTDR.	55
II.17	Schéma optique détaillé de l'interrogateur FEBUS G1-R.	56
II.18	Schéma du banc d'essai pour la réalisation de mesures de répétabilité en température.	58
II.19	Résultats de mesure d'un B-OTDR suivant une loi de distribution gaussienne	59
II.20	Répétabilité en température à 2σ de la mesure sur une fibre de 50 km	59
II.21	Banc d'essai mécanique de l'expérimentation d'instrumentation de pipeline	61
II.22	Schéma de coupe de la tranchée avec l'instrumentation optique .	62
II.23	Schéma général de l'instrumentation du pipeline	62
II.24	Mesure de la sensibilité à la température du câble à gaine serrée	64
II.25	Mesure de la sensibilité à la température du câble à gaine libre .	65
II.26	Mesure distribuée de la fréquence Brillouin de l'expérimentation de surveillance du pipeline.	66
II.27	Graphique du suivi mécanique de l'asservissement du vérin et du suivi en température de la tranchée	68
II.28	Graphique du profil de déformation durant l'expérimentation pour les câbles S2 et S3	69
II.29	Graphique du profil de déformation durant l'expérimentation pour les câbles T1 et T2	70
II.30	Graphique du profil de déformation durant l'expérimentation sur la globalité des câbles à gaine serrée	70
III.1	Evolution exponentielle de la répétabilité de mesure liée à l'atténuation optique dans la fibre	78
III.2	Variation de la fréquence instantanée (a) et spectre (b) d'une impulsion gaussienne induite par le phénomène de SPM [88] . .	79
III.3	Évolution de la largeur du spectre Brillouin suivant l'effet d'auto-modulation de phase.	80
III.4	Effet de la résolution spatiale sur l'auto-modulation de phase . .	81
III.5	Spectre Brillouin mesuré en fonction de la puissance crête injectée pour une impulsion de 20 ns.	81
III.6	Spectre Brillouin mesuré en fonction de la puissance crête injectée pour une impulsion de 100 ns.	82
III.7	Mesure distribuée de la fréquence de rétrodiffusion Brillouin en fonction de la puissance crête et pour un impulsion de 20 ns .	83
III.8	Évolution de l'effet d'auto-modulation de phase sur le spectre Brillouin mesuré en fonction de la distance de fibre optique . . .	83
III.9	Impact de l'auto-modulation de phase sur la mesure de répétabilité de l'interrogateur B-OTDR	84

III.10	Courbe d'atténuation de la diffusion Brillouin dans un régime spontané et analyse spectrale de celle-ci.	85
III.11	Courbe d'atténuation de la diffusion Brillouin dans un régime stimulé et analyse spectrale de celle-ci.	85
III.12	Schéma optique du module d'amplification bidirectionnelle	88
III.13	Répétabilité de la mesure de l'interrogateur FEBUS G1-R sur 50 km de fibre optique sans module de ré-amplification optique	90
III.14	Schéma des essais d'amplification unidirectionnelle.	91
III.15	Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré pour une amplification bidirectionnelle	93
III.16	Schéma de la configuration bidirectionnelle pour différentes puissances	94
III.17	Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré pour différentes valeurs d'amplification bidirectionnelle	94
III.18	Schéma de la configuration bidirectionnelle avec l'ajout d'un atténuateur et d'un filtre optique	95
III.19	Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré en fonction de l'atténuation et du filtrage optique au niveau de la sortie de l'EDFA 2	96
III.20	Schéma optique du module d'amplification bidirectionnel utilisé durant la thèse.	98
III.21	Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré sur une longueur de 100 km de fibre optique avec le module de ré-amplification	98
III.22	Spectre normalisé de rétrodiffusion Brillouin mesuré sur une longueur de 100 km de fibre optique avec le module de ré-amplification	99
III.23	Répétabilité de mesure en température à 2σ sur 50 et 100 km de fibre optique pour une résolution spatiale de 5 m et 10 min de mesure.	99
III.24	Schéma de la configuration optique d'une mesure B-OTDR sur 150 km avec deux modules de ré-amplification.	100
III.25	Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré sur une longueur de 150 km de fibre optique avec deux modules de ré-amplification.	101
III.26	Répétabilité en température à 2σ sur 150 km de fibre optique pour une résolution spatiale de 5 m et 10 min de mesure.	101
III.27	Répétabilité en température à 2σ sur 150 km de fibre optique pour une résolution spatiale de 10 m et 60 min de mesure.	102
IV.1	Schéma opto-électronique détaillé de l'interrogateur B-OTDR/C-OTDR nommé FEBUS G2-R.	113
IV.2	Spectre optique mesuré par l'interrogateur B-OTDR DSTS présentant une mesure simultanée des diffusions Rayleigh et Brillouin.	114
IV.3	Comparaison des répétabilités de mesure entre les configurations Stokes et anti-Stokes du B-OTDR.	115
IV.4	Impulsions optiques générées par l'interrogateur en fonction de la puissance injectée dans la fibre de référence.	116
IV.5	Mesure préliminaire des intensités de rétrodiffusion Brillouin et Rayleigh.	117
IV.6	Schéma du processus du bruit de cohérence CRN.	120
IV.7	Mesures successives de la rétrodiffusion Rayleigh.	121

IV.8	Réduction stochastique du bruit de cohérence sur la mesure C-OTDR [122]	122
IV.9	Résultats des mesures du test d'évaluation du CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser	125
IV.10	Comparaison avec la théorie des résultats du test d'évaluation du CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser.	125
IV.11	Résultats des mesures du test d'évaluation du CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions.	126
IV.12	Résultats des mesures du test d'évaluation du CRN en fonction de la résolution spatiale.	127
IV.13	Comparaison avec la théorie des résultats du test d'évaluation du CRN en fonction de la résolution spatiale.	128
IV.14	Mesure C-OTDR réalisée par l'interrogateur DSTS et analyse de celle-ci.	130
IV.15	Banc d'essai utilisé pour valider et caractériser la mesure indépendante de la température et de la déformation par l'interrogateur.	131
IV.16	Schéma de la ligne optique du banc d'essai pour la mesure indépendante de température et de déformation par l'interrogateur DSTS.	132
IV.17	Spectre optique distribué des diffusions Brillouin et Rayleigh mesurées simultanément par l'interrogateur.	133
IV.18	Spectres optiques de diffusion Brillouin et Rayleigh mesurés simultanément par l'interrogateur en un seul point de la fibre.	133
IV.19	Températures de la fibre à différents paliers issues d'une mesure B-OTDR standard résolue uniquement en fréquence.	134
IV.20	Mesure des puissances de diffusion Rayleigh (a) et Brillouin (b) durant les essais à différentes températures de l'étuve.	135
IV.21	Détermination des pertes optiques sur la mesure de diffusion Brillouin.	136
IV.22	Mesure du ratio relatif de Landau Placzek sans optimisation numérique de la mesure d'intensité Rayleigh.	137
IV.23	Mesure relative du ratio de Landau Placzek issu du traitement d'optimisation de la mesure d'intensité Rayleigh.	138
IV.24	Courbe de sensibilité à la température de la puissance de diffusion Brillouin.	138
IV.25	Courbe température et de déformation sur le montage de validation du DSTS.	140
IV.26	Répétabilité de la mesure de diffusion Brillouin en déformation (a) et en température (b) pour une distance de 1 km et 2 m de résolution spatiale.	141
IV.27	Schéma de l'instrumentation du puits pour une mesure distribuée de température et de déformation.	144
IV.28	Mesure B-OTDR et Raman OTDR de la température du câble inséré dans le puits	145
IV.29	Spectre des rétrodiffusions Brillouin et Rayleigh mesurées par l'interrogateur B-OTDR DSTS sur le câble inséré dans le puits	146
IV.30	Mesure des puissances de diffusion Brillouin et Rayleigh sur la fibre optique dans le câble.	147

IV.31	Mesure indépendante de température et de déformation réalisée par l'interrogateur le long du câble descendu dans le puits.	147
IV.32	Courbes comparatives d'une mesure B-OTDR standard, Raman OTDR et B-OTDR DSTS de température indépendante de la déformation.	148
B.1	(a) Mesure de température distribuée avec et sans pulse coding. (b) Bruit RMS des deux techniques. [92]	162
B.2	Comparaison de la mesure de signal sur bruit en fonction de la distance entre la technique de coding de l'impulsion et la technique d'impulsion unique. [93]	162
B.3	Evolution de la résolution de température entre les deux techniques en fonction de la puissance crête injectée. [92]	163
B.4	Technique de diversité de longueurs d'onde pour améliorer la réponse au gain Brillouin. [100]	164
B.5	Erreur sur la mesure de fréquence Brillouin entre un B-OTDR conventionnel et un B-OTDR avec la technique de diversité de longueur d'onde. [100]	164
B.6	Schéma du montage optoélectronique de la technique d'utilisation d'un B-OTDR et de l'amplification Raman. [101]	166
B.7	(a) Puissance Brillouin rétrodiffusée sur 100km avec un pompage Raman adapté. (b) Mesure de la température sur 100km. [101]	166
B.8	Schéma du montage expérimental de l'amélioration de la portée d'un système BOTDR avec un EDFA en ligne. [96]	167
B.9	Spectres distribués de rétrodiffusion Brillouin avec l'utilisation d'un EDFA en ligne. [96]	167
B.10	Erreur sur la mesure de température et déformation en fonction de la distance. [96]	168
B.11	Schéma du montage expérimental pour une mesure B-OTDA de 150 km avec des EDFA et plusieurs fibres optiques de fréquence Brillouin différentes. [97]	169
B.12	Spectre de rétrodiffusion du montage utilisant des fibres avec différents décalages Brillouin. [97]	169
C.1	Plan d'instrumentation et résultats obtenus par MOHAMAD, SOGA et AMATYA [104]	172
C.2	Spectre de diffusion Rayleigh mesuré par un TW-COTDR [107].	175
C.3	(a) Spectre Brillouin d'une fibre LEAF© mesuré à deux températures différentes (40 °C et 85 °C) ainsi que les coefficients de sensibilité à la température des pics de diffusion Brillouin 1, 3 et 4. (b) Courbes de sensibilité en elongation d'une fibre LEAF©, pour ses 4 pics. [31]	177
C.4	(a) Mesure de la fréquence ainsi que de la puissance de diffusion Brillouin sur une fibre optique soumise à la fois à de la température et à de la déformation. (b) Mesure de température et de déformation obtenue grâce à la méthode combinée de la mesure de fréquence Brillouin et du ratio de Landau Placzek. [70]	179

Liste des tableaux

II.1	Tableau de comparaison des performances de plusieurs techniques de mesure de la diffusion Brillouin	38
II.2	Tableau des caractéristiques principales des câbles à fibres optiques utilisés pour l'instrumentation du pipeline.	67
II.3	Configuration de la mesure B-ODTR pour les essais d'instrumentation du pipeline.	68
III.1	Tableau des paramètres typiques de la puissance crête utilisée pour limiter les effets non-linéaires.	86
III.2	Tableau de la mesure OSNR en différents points du montage de l'amplification unidirectionnelle.	92
III.3	Tableau du rapport signal à bruit de la mesure B-OTDR suivant le paramétrage de l'amplificateur "EDFA Contra"	93
III.4	Tableau du rapport signal à bruit de la mesure B-OTDR suivant l'atténuation optique en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra"	95
III.5	Tableau du rapport signal à bruit de la mesure B-OTDR suivant la largeur du filtre optique en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra"	95
III.6	Tableau du paramétrage préférentiel du module de ré-amplification	97
III.7	Tableau comparatif des performances de mesure sur 100 km de fibre optique	100
IV.1	Configurations de mesure de l'interrogateur pour le test d'évaluation du CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser.	124
IV.2	Configurations de mesure de l'interrogateur pour le test d'évaluation du CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions.	126
IV.3	Configurations de mesure de l'interrogateur pour le test d'évaluation du CRN en fonction de la résolution spatiale.	127
IV.4	Tableau récapitulatif d'amélioration du CRN en fonction de l'intervalle de balayage du laser pour une résolution spatiale de 2 m et un temps de mesure de 5 min.	128
IV.5	Configuration de l'interrogateur pour les essais de validation de la méthode du ratio de Landau Placzek pour une mesure indépendante de température et de déformation.	132
IV.6	Comparaison des performances de mesures, pour une résolution spatiale de 2 m, entre l'interrogateur B-OTDR et le nouveau B-OTDR DSTS.	142

IV.7	Paramètres de configuration de l'interrogateur DSTS pour la mesure distribuée de température et de déformation sur le câble dans le puits.	146
A.1	Tableau des principales fibres optiques monomodes utilisées durant la thèse.	159

Liste des abréviations

ASE	Amplification Spontaneous Emission
B-OTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
B-OTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
B-OCDA	Brillouin Optical Correlation Domain Analysis
B-OCDR	Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry
B-OFDA	Brillouin Optical Frequency Domain Analysis
B-OFDR	Brillouin Optical Frequency Domain Reflectometry
CFO	Capteur à Fibre Optique
C-OTDR	Coherent Optical Time Domain Reflectometry
CRN	Coherent Rayleigh Noise
DAS	Distributed Acoustic Sensing
DOP	Degree Of Polarization
DSS	Distributed Strain Sensing
DSTS	Distributed Strain Temperature Sensing
DTS	Distributed Temperature Sensing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FSAV	Frequency Shift AVeraging
FWM	Four Waves Mixing
OSNR	Optical Signal To Noise Ratio
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
P-OTDR	Polarization Optical Time Domain Reflectometry
RIN	Relative Intensity Noise
RMS	Root Mean Square
SMF	Single Mode Fiber
SNR	Signal To Noise Ratio
SPM	Self Phase Modulation
φ-OTDR	Phase Optical Time Domain Reflectometry

Introduction générale

Contexte général

Au cours du XX^{ème} siècle, la réalisation de fibres optiques à faibles pertes, associée aux lasers à semi-conducteur, a permis un essor considérable des nouvelles technologies dans le domaine des télécommunications. En effet, la fibre possède de nombreux avantages par rapport aux câbles électriques utilisés jusque-là. Sa capacité à faire transiter à la vitesse de la lumière une grande quantité d'information ainsi que son insensibilité aux rayonnements électromagnétiques lui ont permis de s'imposer très vite et de devenir aujourd'hui le moyen le plus utilisé pour la communication. Cependant les potentialités de la fibre optique ne se réduisent pas seulement à ce domaine. En effet de nouveaux capteurs à fibre optique utilisent, pour la mesure de différents paramètres physico-chimiques, la sensibilité de la fibre optique elle-même. Ce type de capteurs, qualifié d'instrumentation répartie, remplace avantageusement les sondes traditionnelles qui réalisent dans ce cas des mesures ponctuelles. Ainsi, la fibre étant elle-même l'élément sensible du capteur, cela permet de réaliser des mesures distribuées de manière continue sur des longueurs de l'ordre de plusieurs kilomètres ce qui est inenvisageable avec des capteurs traditionnels. De nombreuses infrastructures, nécessitant une surveillance étroite de la part de leurs exploitants et dont les dimensions sont de plus en plus importantes, trouvent un intérêt non négligeable dans l'utilisation des capteurs à fibre optique pour remplacer l'instrumentation traditionnelle très complexe à mettre en œuvre sur des distances de plusieurs kilomètres.

Contexte de la thèse

Cette thèse a été initiée par la jeune entreprise FEBUS Optics qui commercialise et développe des instruments de mesure par fibre optique. Le premier appareil commercialisé en 2015 par la société permet, sur la base d'une technologie brevetée, une mesure de température et de déformation distribuée le long d'une fibre optique. Par la suite, FEBUS Optics a constamment évolué en optimisant les interrogateurs déjà commercialisés et en développant de nouveaux systèmes dont certains permettent la mesure de nouveaux paramètres physiques comme par exemple les vibrations acoustiques. Les marchés visés par l'entreprise sont principalement dédiés à la surveillance d'infrastructures dans le domaine du génie civil et du transport de l'énergie. En effet, ces structures utilisent avantageusement les propriétés de la mesure par fibre optique pour prévenir en temps réel, sur plusieurs dizaines de kilomètres, d'éventuels dommages pouvant avoir des conséquences humaines, écologiques et économiques importantes. L'intérêt croissant pour ces technologies, la diversité des besoins industriels dans ce domaine et l'augmentation de la concurrence, poussent l'entreprise à innover constamment pour devenir une référence de la mesure distribuée par fibre optique.

Cette thèse a débuté alors que le premier interrogateur de la société était commercialisé. A partir de ce moment, les objectifs de l'entreprise ont été d'améliorer la fiabilité du système commercialisé et de répondre à certaines limitations techniques fondamentales de celui-ci pour proposer de nouvelles générations d'interrogeurs. En parallèle, de nombreuses instrumentations de structure et des projets de R&D ont été menés pour accroître l'expertise et les nouveaux champs applicatifs. Au moment où cette thèse se conclut, l'entreprise possède une reconnaissance mondiale dans le domaine de la mesure distribuée par fibre optique avec un développement en constante croissance.

Ces travaux de recherche se sont déroulés sur une thématique définie en partenariat avec le groupe télécommunications optiques du département COMELEC de Telecom Paris. Avec de nombreuses années d'expertise dans le domaine des télécommunications mais également des capteurs à fibre, ce groupe a apporté son savoir ainsi que toutes les technologies complémentaires au domaine de l'instrumentation optique pour mener à bien ces travaux.

Objectifs scientifiques de la thèse

- **L'augmentation de la portée de mesure des interrogeurs à fibre optique.** Ces systèmes de mesure utilisent avantageusement les propriétés de propagation de la fibre pour réaliser des mesures sur plusieurs dizaines de kilomètres. Cependant, dans de nombreux cas d'instrumentation de structure, les besoins sont supérieurs à la centaine de kilomètres. Les limites actuelles, principalement causées par des phénomènes optiques liés à la propagation de la lumière dans la fibre, ne permettent généralement pas de dépasser la cinquantaine de kilomètres avec les paramètres métrologiques souhaités par l'industrie. Dans ce cas, deux possibilités existent, la première étant de multiplier le nombre d'interrogeurs à fibre optique de manière à couvrir l'ensemble de la structure. La deuxième solution, étudiée durant cette thèse, est d'augmenter la portée de mesure de l'interrogeur, par l'utilisation d'amplificateurs optiques bidirectionnels en ligne, pour que celui-ci couvre la totalité de la structure à instrumenter. Ce travail de recherche a pu être réalisé dans le cadre d'un projet ANR nommé "SCODE" en partenariat avec l'entreprise Kraken Subsea Solution, spécialisée dans l'ingénierie de câbles de puissance électrique sous-marins. L'application de ce projet étant de pouvoir surveiller sur plusieurs centaines de kilomètres la température des câbles reliant des éoliennes en mer au littoral.
- **La séparation des mesures de température et de déformation.** La première génération d'interrogeur à fibre optique proposée par FEBUS Optics, permet une mesure de température et de déformation grâce au phénomène de diffusion Brillouin apparaissant le long d'une fibre optique. Or ce phénomène est sensible à la fois aux changements de température et de déformation. Ainsi, cela entraîne des biais de mesure dans de nombreux cas d'application puisqu'il est alors impossible de discriminer ces deux paramètres physiques. L'objectif de cette thèse a donc été de proposer une solution industrielle permettant de résoudre cette problématique avec le moins de contraintes opérationnelles possibles. C'est ainsi qu'un nouveau système d'interrogation a été mis au point, celui-ci a été testé puis validé dans des conditions d'application réelles.

-
- **La mesure distribuée de pression hydrostatique.** Il existe un fort intérêt pour la mesure répartie de pression hydrostatique par fibre optique. En effet, ce type de mesure peut adresser le marché de la surveillance de forages pour la géothermie, et pour les industries pétrolières et gazières. Les avantages qu'apportent ce type de mesure sont notamment le fait que la fibre optique est un capteur distribué et qu'il est passif, ne générant aucune interférence électromagnétique dans un milieu aussi spécifique qu'un puits. Aujourd'hui, aucune solution industrielle n'existe pour la mesure distribuée de pression hydrostatique mais certaines pistes de recherche sont prometteuses. L'objectif du travail de cette thèse a donc été de définir des perspectives de développement pour l'entreprise FEBUS Optics.

Organisation du manuscrit

Chapitre 1

Le premier chapitre est consacré à présenter les besoins principaux pour l'instrumentation d'infrastructures puis les notions élémentaires liées à la mesure distribuée par fibre optique. Nous présentons dans cette partie les principaux phénomènes apparaissant dans une fibre notamment les rétrodiffusions Rayleigh, Raman et Brillouin qui constituent la base de l'instrumentation par fibre optique. Nous définissons également le concept de la réflectométrie par fibre optique et les différents termes métrologiques spécifiques à ce type de mesure.

Chapitre 2

Ce chapitre présente plus en détail le phénomène de diffusion Brillouin dans une fibre optique ainsi que les différentes configurations d'interrogeurs permettant la mesure de cette composante. Nous justifions ainsi la technologie utilisée par l'entreprise FEBUS Optics pour réaliser une mesure de température et de déformation via la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre optique. Des essais, dans le cadre d'un projet collaboratif de R&D, ont permis d'illustrer la mise en application de ce type d'instrumentation pour de la surveillance de mouvement de terrain au niveau d'une canalisation de transport d'énergie enfouie dans le sol.

Chapitre 3

Nous présentons dans ce chapitre une limite majeure des interrogeurs B-OTDR qui est liée à la portée de mesure accessible. En effet, certains effets non-linéaires restreignent la puissance optique maximale qu'il est possible d'injecter dans la fibre entraînant de ce fait une limitation de la portée de mesure de l'interrogeur. Nous avons donc mis au point une solution industrielle permettant de tripler la distance maximale accessible, sans générer d'effets non-linéaires dégradant le signal, tout en gardant des performances de mesure acceptables dans un contexte industriel. Nous avons ainsi pu réaliser une mesure distribuée sur 150 km de fibre optique avec une répétabilité de mesure inférieure à 1,5 °C.

Chapitre 4

Dans ce chapitre nous adressons une limite fondamentale des systèmes de mesure de déformation et de température via la diffusion Brillouin dans une fibre. Cette limite est liée à la double dépendance de l'effet Brillouin à ces deux paramètres physiques. Cette partie est donc consacrée à présenter la piste suivie pour proposer une solution industrielle et brevetée permettant une mesure distribuée par fibre qui discrimine la température de la déformation et inversement. Celle-ci a pu être caractérisée en laboratoire puis validée lors d'une mesure réalisée en conditions d'application réelles dans un puits de forage. Ces mesures ont permis d'observer et quantifier certains phénomènes sur le câble qui étaient alors insoupçonnés et indétectables avec les interrogateurs précédents.

Chapitre 5 (confidentiel)

Le dernier chapitre de ce manuscrit est confidentiel pour des raisons industrielles. Il porte sur les perspectives d'évolutions des technologies proposées par FEBUS Optics pour la mesure répartie de la pression hydrostatique. Des modifications opto-électroniques ont été apportées aux systèmes déjà commercialisés par l'entreprise de manière à mettre au point un nouveau prototype d'interrogateur permettant une potentielle mesure de la pression hydrostatique. Ces hypothèses ont pu être confirmées par une étude bibliographique avancée ainsi que des premiers résultats prometteurs. Les conclusions de ce chapitre définissent donc une piste de recherche à suivre par l'entreprise si elle veut proposer un interrogateur commercial de mesure distribuée de pression hydrostatique par fibre optique.

Chapitre I

L'instrumentation optique pour la surveillance des infrastructures de l'énergie

I.A La surveillance des infrastructures de l'énergie

La surveillance des infrastructures est un sujet important lors des processus de production et d'exploitation des énergies car il permet de limiter de possibles dommages et accidents qui peuvent présenter de graves conséquences. Dans la majorité des cas, la surveillance actuelle ne permet pas de réduire totalement les accidents qui apparaissent sur ce type de structure. Par exemple, entre les années 2010 et 2015, plus de 400 incidents survenus sur des pipelines de pétroles ont été répertoriés [1]. Ces incidents sont responsables de dégâts humains, écologiques mais également d'importantes pertes financières pour les compagnies pétrolières. Un autre exemple concerne les câbles de puissance électrique sous-marins dont la fabrication et le déploiement en mer entraîne des dommages responsables d'une grande partie des coûts financiers liés au secteur des énergies renouvelables en mer [2].

Aujourd'hui, en plus d'un important travail de prévention, une grande part de la surveillance pour ce type de structures (pipeline, câble, puits,...) se fait encore par des contrôles visuels ou par de l'instrumentation dite ponctuelle. Ce type d'instrumentation constitue des capteurs, éprouvés depuis de nombreuses années, qui donnent une information à une position précise de la structure (sonde de température, corde vibrante, géophone, caméra,...). Le principal inconvénient de ces technologies repose sur le fait que la surveillance n'est réalisée qu'à certaines positions de la structure jugées critiques. Or, sur des infrastructures longues de plusieurs dizaines de kilomètres, il devient complexe de proposer une surveillance complète et fiable avec de telles technologies. Cela se conclut souvent par des imprécisions quant à la gestion des infrastructures durant tout leur cycle de vie, comme par exemple l'évolution de l'état de santé de la structure, l'optimisation de la production ou encore la détection de défauts.

Depuis plusieurs années, les différentes sociétés du domaine de l'énergie se sont intéressées aux nouvelles technologies de l'instrumentation par fibre optique et ont commencé à les implémenter au niveau de leurs infrastructures. Ce type de capteurs présente de nombreux avantages par rapport à l'instrumentation traditionnelle qui permettent d'enrichir et fiabiliser la surveillance des infrastructures.

Nous allons présenter dans cette section le principe de la mesure par fibre optique et ses caractéristiques métrologiques permettant de réaliser une surveillance étroite des infrastructures dédiées au transport de l'énergie.

I.B Les capteurs de mesure distribuée par fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde permettant la propagation d'une information sur plusieurs dizaines de kilomètres. Outre son utilisation pour les télécommunications, la fibre optique a montré son intérêt pour différents types de mesure de paramètres physico-chimiques tels que la température, la déformation ou encore la mesure de vibrations acoustiques. Ce type de capteurs remplace avantageusement l'instrumentation traditionnelle. En effet, la fibre étant elle-même l'élément sensible du capteur, cela permet de réaliser des mesures sur plusieurs dizaines de kilomètres et localisables en tout point de la fibre. Cette technologie apporte donc un fort gain en terme de multiplexage pour les instrumentations très denses et lors de détections pour lesquelles l'utilisateur ne connaît pas à l'avance les zones critiques qu'il conviendrait d'instrumenter. Ce principe de mesure distribuée sur plusieurs kilomètres étant inenvisageable à mettre en œuvre avec des capteurs traditionnels. Les infrastructures qui nécessitent une surveillance étroite de la part de leurs exploitants et dont les dimensions sont de plus en plus importantes, trouvent un intérêt non négligeable dans l'utilisation des capteurs à fibre optique pour remplacer l'instrumentation traditionnelle plus complexe à mettre en œuvre sur des structures de plusieurs kilomètres.

Dans les domaines du transport de l'énergie gazière, pétrolière ou électrique, la mesure par fibre optique présente un grand intérêt pour la surveillance des structures transportant l'énergie telles que les pipelines, ou encore les câbles de puissance électriques et notamment ceux reliant les champs d'éoliennes en mer au littoral. Ces structures dépassent généralement la centaine de kilomètres de long et nécessitent une surveillance sur la totalité de la longueur et une localisation de l'événement au mètre ou à la dizaine de mètres près.

Dans le domaine du forage, la mesure par fibre optique présente un réel avantage puisque celle-ci est totalement passive. En effet, aucun courant électrique n'est transporté dans la fibre et celle-ci se trouve insensible aux radiations électromagnétiques. De plus, grâce aux propriétés de propagation de la lumière dans la fibre, ce type d'instrumentation permet de déporter l'appareil de mesure qui n'est donc pas nécessairement sur le site de mesure. Ceci est un véritable atout pour des mesures dans les puits puisque dans ce cas, seule la fibre optique se trouve installée dans le puits. L'interrogateur restant à la surface et pouvant être installé dans un local dédié, celui-ci ne se trouve donc pas dans des conditions environnementales difficiles.

I.B.1 Les caractéristiques d'une fibre optique et son intégration pour la surveillance de structures industrielles

Il existe de nombreux types de fibre optiques présentant chacune des géométries et des caractéristiques de propagation de la lumière particulières. Nous

allons présenter dans cette partie les grandes catégories de fibres optiques généralement utilisées dans le contexte de l'instrumentation de structure. Ces fibres optiques sont la plupart du temps insérées dans des câbles spécifiques leur conférant une meilleure résistance mécanique lors de leur déploiement sur la structure à instrumenter. Nous présenterons également le processus de fabrication d'un câble à fibre optique ainsi qu'une mesure réalisée durant cette thèse offrant une nouvelle manière de contrôler l'intégrité d'un câble lors de sa production.

I.B.1.a Principe général d'une fibre optique

La fibre optique est un fil de verre permettant le guidage de la lumière grâce au processus de réflexion totale interne que l'on observe entre deux matériaux d'indice de réfraction différents. En effet, la fibre optique est constituée d'un cœur qui est généralement d'un diamètre entre $9\ \mu\text{m}$ et $60\ \mu\text{m}$ et d'une gaine optique dont le diamètre externe est généralement de $125\ \mu\text{m}$. Ces deux couches sont toutes deux constituées de silice, cependant le cœur présente la particularité d'être dopé afin de lui conférer un indice de réfraction plus fort que celui de la gaine optique, ce qui permet le guidage de la lumière par réflexions successives au niveau de l'interface cœur-gaine. Il se peut parfois que la gaine soit elle aussi dopée. Généralement, la majorité des fibres optiques sont à saut d'indice où l'indice de réfraction est constant dans le cœur et la gaine. Cependant il existe aussi des fibres à gradient d'indice où le changement d'indice entre le cœur et la gaine est progressif.

Le dopage des fibres optiques est généralement à base d'oxyde de germanium, cependant il est aussi possible d'utiliser d'autres dopants tels que le bore, le fluor, l'aluminium... Ces différents dopants peuvent modifier certaines propriétés physiques de la fibre comme par exemple sa tenue aux radiations pour un dopage fluor [3]. De plus, certains dopants terres rares sont utilisés pour la fabrication d'amplificateurs optiques ou de lasers de puissance à fibre optique.

La troisième et dernière couche qui constitue une fibre optique est la gaine mécanique. Cette gaine ne joue aucun rôle dans la propagation optique mais permet d'accroître la résistance mécanique de la fibre et également, dans certains cas, permet une meilleure tenue en température ou à certains composés chimiques. Généralement, la gaine mécanique est de diamètre externe $250\ \mu\text{m}$ et composée d'un polymère, plus rarement de carbone ou encore d'or.

I.B.1.b Propagation de la lumière dans une fibre optique

La propagation de la lumière dans une fibre optique est régie par les équations de Maxwell définissant les variations spatiales et temporelles d'une onde électromagnétique dans un milieu de propagation donné. Dans une fibre optique réelle, on constate que toute l'énergie lumineuse entrante n'est pas récupérée en sortie. Il y a ainsi une atténuation linéaire du signal durant toute sa propagation qui est causée par deux principaux phénomènes :

- Absorption : Dans une fibre de silice, l'absorption de la lumière par la matière est minimale dans un intervalle de l'ultra-violet jusqu'à l'infrarouge moyen. Un pic d'absorption supplémentaire est présent aux alentours de $1380\ \text{nm}$ et correspondant à l'absorption de la lumière par des ions métalliques OH^- pouvant apparaître par réaction chimique dans la fibre [4].

- Diffusion : Les impuretés et les défauts d'interface cœur-gaine vont provoquer de la diffusion Rayleigh sur les molécules du matériau. Cette diffusion élastique est due à des variations locales de l'indice de réfraction créées par des changements de densité ou de composition apparus au moment de la solidification du matériau. Deux autres types de diffusion peuvent intervenir que nous présenterons plus en détail dans la partie I.B.2.

Ces effets sont proportionnels à la puissance optique incidente et entraînent l'atténuation de la lumière dans une fibre optique que l'on exprime en dB/km. Cette atténuation est également fonction de la longueur d'onde. En effet, les pertes liées à la diffusion Rayleigh dans une fibre optique varient suivant une loi en $\frac{1}{\lambda^4}$ pour atteindre un minimum de perte aux alentours de 1550 nm. Les pertes par absorption sont également dépendantes de la longueur d'onde du signal lumineux qui va interagir plus ou moins avec la matière.

On distingue donc 3 bandes spectrales principales de travail représentées sur la Figure I.1. Les bandes les plus utilisées aujourd'hui sont la bande O qui va de 1260 nm à 1360 nm et la bande C allant de 1525 nm à 1565 nm et qui correspondent à des minima d'atténuation. Ainsi, un grand nombre d'installations de télécommunications et de capteurs à fibre optique utilisent ces plages de longueurs d'ondes permettant une portée de propagation du signal lumineux maximale.

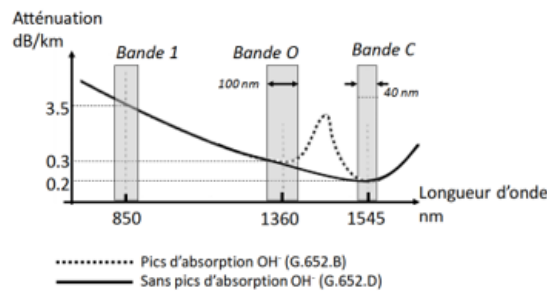


FIGURE I.1 – Courbes d'atténuation de la lumière dans une fibre optique en fonction de la longueur d'onde.

Les pertes optiques sont généralement exprimées sous la forme d'un coefficient d'atténuation α reliant la puissance transmise en sortie de la fibre P_T à la puissance initiale d'entrée P_0 . Les pertes linéaires sont uniformément réparties le long de la fibre, ce qui implique que la puissance transmise est liée à la distance de propagation L et à α .

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (\text{I.1})$$

Dans la littérature ainsi que dans les références constructeur, ce coefficient d'atténuation est, la plupart du temps, donné en échelle logarithmique α_{dB} avec une unité en dB/km.

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_0} \right) \quad (\text{I.2})$$

Des pertes ponctuelles peuvent également apparaître sur la fibre, liées à plusieurs événements :

- Courbures et micro-courbures : Une fibre optique ne peut pas être exemptée de courbures et dans ces zones le risque pour un rayon lumineux de ne plus satisfaire la condition de réflexion totale interne est inévitable. Ce qui se traduit par une perte dans la gaine par simple réfraction.
- Pertes par couplage : Ces pertes apparaissent lorsque l'on souhaite connecter deux fibres entre elles, soit par un connecteur optique, soit par une soudure. Dans ce cas, plusieurs conditions doivent être respectées entre les deux fibres connectées comme par exemple leur ouverture numérique ou leur diamètre de cœur. Si ces conditions ne sont pas respectées, alors une certaine partie de l'énergie optique sera atténuée.
- Réflexions de Fresnel : Au niveau de l'interface air-verre, correspondant à l'extrémité d'une fibre ou à une liaison de deux fibres par un connecteur, une réflexion du signal optique est causée par le changement d'indice optique entre les deux milieux. Une certaine quantité du signal optique est ainsi réfléchi dans le sens opposé à la propagation du signal.

L'addition des pertes linéaires de la fibre avec les pertes ponctuelles constitue l'atténuation totale de la fibre optique qui donne l'information sur la diminution d'un signal optique se propageant d'un point à l'autre de la fibre.

I.B.1.c Les différents types de fibres optiques

Il existe plusieurs géométries de fibres optiques qui présentent des propriétés de propagation de la lumière différentes :

- Les fibres optiques multimodes. Historiquement, les premières fibres optiques étaient des fibres optiques multimodes avec des diamètres de cœurs de l'ordre de 50 ou 62,5 μm et des gaines optiques de 125 μm . Leur géométrie est telle que plusieurs modes optiques transverses peuvent se propager à l'intérieur de ces fibres. Cet aspect induit des limitations dans le domaine des télécommunications qui font que ces fibres sont aujourd'hui utilisées majoritairement pour le transfert d'informations sur courtes distances. Les fibres optiques multimodes présentent un grand intérêt pour les applications capteurs distribués. Comme nous le verrons, certaines mesures par fibre optique ont un intérêt à transporter une grande quantité de puissance de manière à gagner en sensibilité de mesure. La distribution de puissance optique dans une fibre multimode lui permet de tolérer, sans dommages irréversibles, des puissances optiques importantes de plusieurs watts [5]. La mesure distribuée de température par diffusion Raman, que nous présenterons en partie I.B.2.c, possède une meilleure sensibilité grâce à l'utilisation de fibres multimodes. Cependant, la dispersion modale dans une fibre multimode limite la portée de mesure. La Figure I.2 représente la géométrie ainsi que le profil d'indice d'une fibre multimode.
- Les fibres optiques monomodes. Il s'agit de la géométrie de fibre la plus utilisée aujourd'hui. Ce type de fibre optique présente la géométrie décrite précédemment, soit un cœur et une gaine optique ayant un diamètre respectif de 9 μm et de 125 μm . Dans le cas où le diamètre de cœur est proche de

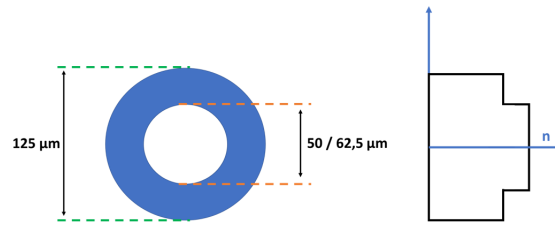


FIGURE I.2 – Géométrie et profil d'indice d'une fibre optique multimode

la longueur d'onde de la lumière, il est nécessaire de prendre en compte les conditions de continuité des champs à l'interface cœur-gaine. Dans ce cas, la propagation de la lumière est décrite par les équations de Maxwell qui donnent lieu à l'équation de propagation linéaire où plusieurs modes peuvent être solutions. Les conditions de propagation dans une fibre optique monomode standard SMF28 font qu'elle ne propage, à des longueurs d'ondes supérieures à 1250 nm, qu'un seul mode optique qui est le mode fondamental hybride HE_{11} . À l'inverse des fibres multimodes, ces fibres présentent un réel avantage pour les télécommunications longues distances puisqu'elles ne sont pas sensibles à la dispersion modale. Cependant les fibres monomodes, tout comme les fibres multimodes, restent sensibles à la dispersion chromatique. Ce type de fibre est largement utilisé pour la mesure distribuée par fibre optique notamment pour les mesures de vibrations acoustiques, de température et de déformation. La Figure I.3 représente la géométrie et le profil d'indice d'une fibre optique monomode.

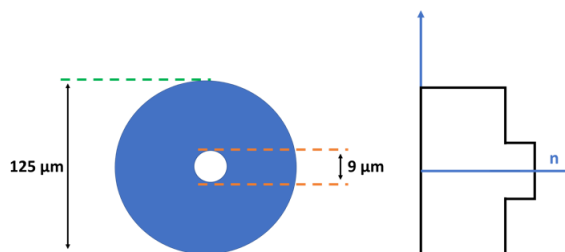


FIGURE I.3 – Géométrie et profil d'indice d'une fibre optique monomode

- Les fibres optiques à maintien de polarisation. Ce type de fibre optique fait intervenir la notion de polarisation de l'onde optique et de biréfringence. La propagation d'une onde lumineuse dans une fibre optique se fait suivant un axe z et les champs transverses de l'onde, évoluent suivant les axes x et y . Les fibres optiques sont des matériaux dont les axes propres x et y ne présentent pas le même indice optique du fait de certaines anisotropies de géométrie (cœur non circulaire) ou d'indice (contraintes non isotropes). Cette différence d'indice de réfraction, appelée biréfringence, implique que les champs de l'onde optique ne se propagent pas à la même vitesse sur les axes x et y . Il y a donc une modification de l'état de polarisation d'un signal durant sa propagation dans une fibre. La variation de l'état de polarisation est fonction d'une longueur caractéristique que l'on appelle longueur de battement. Ce terme est défini comme étant la longueur de fibre pour

laquelle une onde optique, initialement polarisée à 45° des axes propres, retrouve ce même état de polarisation. La Figure I.4 représente l'évolution de la polarisation suivant la longueur de battement.

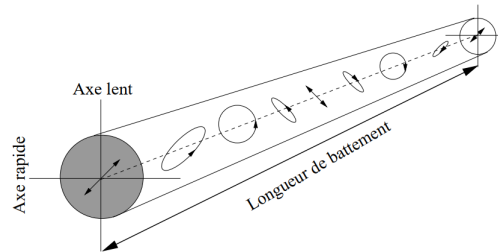


FIGURE I.4 – Évolution de la polarisation de la lumière dans une fibre optique suivant la longueur de battement

Les fibres optiques monomodes classiques présentent une grande longueur de battement, de l'ordre du mètre, qui n'est pas constante le long de la fibre. Ceci implique qu'une onde polarisée en entrée de la fibre voit sa polarisation être constamment modifiée de manière aléatoire durant sa propagation. Une fibre à maintien de polarisation vise à réduire au maximum la longueur de battement de manière à garantir la stabilité de l'état de polarisation d'un signal se propageant dans la fibre. En introduisant des matériaux aux propriétés thermoélastiques différentes dans la structure de la préforme, des contraintes mécaniques sont induites au niveau du cœur lors du tirage suivant un axe privilégié, entraînant une différence fixe entre l'indice de l'axe x et celui de l'axe y [6, 7]. La faible longueur de battement de ce type de fibre, de l'ordre du millimètre, permet à une onde de conserver sa polarisation tout le long de sa propagation. Malgré des techniques de fabrication qui s'améliorent grandement, il est difficile de garantir le maintien total de la polarisation de l'onde sur plusieurs kilomètres de fibre [8, 9, 10]. La Figure I.5 présente un schéma en coupe de deux configurations standards de fibres à maintien de polarisation. Les parties plus sombres correspondent aux différents barreaux pouvant être insérés dans la fibre pour forcer la biréfringence de celle-ci. Les fibres à maintien de polarisation présentent un réel intérêt pour les applications capteurs notamment grâce à leur possibilité de réaliser une mesure distribuée comparant l'effet d'une perturbation physique sur les deux axes de polarisation [11, 12, 13]. Cependant, leur utilisation dans un contexte industriel reste limitée. Cela s'explique par des sensibilités de mesure faibles dans certains cas, une certaine difficulté d'implémentation sur des structures avec des soudures optiques complexes, et un maintien de la polarisation sur des longueurs de fibre trop courtes pour garantir l'instrumentation d'une structure de plusieurs kilomètres.

Les fibres optiques monomodes et multimodes sont donc les plus communes pour les applications industrielles aussi bien pour les télécommunications que pour la surveillance d'infrastructures par mesures réparties. Il existe de nombreux autres types de fibres optiques que nous n'avons pas évoquées comme les fibres optiques multicœurs ou encore les fibres à cristaux photoniques. Ces fibres présentent un grand potentiel dans de nombreuses applications de mesure, mais

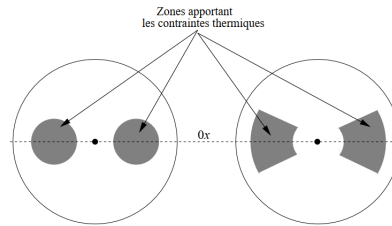


FIGURE I.5 – Coupe d'une fibre optique à maintien de polarisation

ces dernières souffrent encore de trop grandes pertes optiques lors de la propagation du signal et de coûts de fabrication bien trop élevés.

Nous allons, au cours de cette thèse, utiliser un certain nombre de fibres monomodes qui répondent à des standard internationaux dans le domaine des télécommunications que l'on nomme "ITU-T" [14]. Nous les détaillons dans l'annexe A. La majorité de ces fibres est insérée dans des câbles pour garantir une résistance mécanique élevée et limiter les risques de casse lors de leur manipulation.

I.B.1.d Fabrication d'un câble à fibres optiques

Les fibres optiques sont généralement insérées dans des câbles qui permettent de les déployer sur des structures, dans le sol ou dans les airs sans risques de détérioration. Il existe de très nombreuses configurations géométriques de câbles à fibres optiques, aussi bien pour les câbles destinés spécifiquement à la mesure par fibre que pour les câbles dédiés aux télécommunications. Chaque câble possède donc des propriétés spécifiques choisies en fonction de l'environnement dans lequel il sera utilisé (océans, terre, air) et des contraintes mécaniques ou chimiques qu'il subira lors de son utilisation (traction, compression, humidité, ensoleillement, corrosion, radioactivité, etc...). Malgré toutes ces variétés de câble, le processus de fabrication est généralement très similaire d'un câble à l'autre et se fait en plusieurs étapes. Nous décrirons de manière générale les principales étapes de fabrication sans entrer dans les détails puisque chaque fabricant de câbles possède ses propres modes de fabrication. Nous présenterons ensuite des mesures réalisées au moyen d'un capteur de mesure utilisant la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre pour déterminer son état de déformation. Cette mesure, réalisée durant la production d'un câble, permet de surveiller l'intégrité du câble en temps réel.

I.B.1.d.i Les étapes de fabrication d'un câble

Les fibres optiques, qui seront insérées dans le câble, sont dans un premier temps testées et validées pour respecter les spécifications souhaitées. Ces fibres sont ensuite colorées pour pouvoir les différencier lorsqu'il s'agit d'un câble multifibres. L'ajout d'une seconde gaine mécanique sur la fibre peut être réalisé en fonction de l'utilisation du câble. Une fois cette première étape réalisée, les fibres sont prêtes à être insérées à l'intérieur du câble. Le processus de fabrication nécessite des installations spécifiques avec une ligne de production horizontale (à l'inverse des tours de fibrage verticales pour la fabrication des fibres) de plusieurs mètres dans laquelle les fibres optiques sont déroulées pour être insérées progressivement dans l'armature du câble. Pour des câbles complexes avec plusieurs types de gaines, les fibres optiques passent dans plusieurs lignes de production dont

chacune à la particularité d'appliquer une épaisseur de gaine spécifique au câble. Par exemple pour un câble comme celui présenté en Figure I.6, nous distinguons deux types de gaines : une première correspondant à un tube métallique et une seconde à une gaine plastique en polyamide.

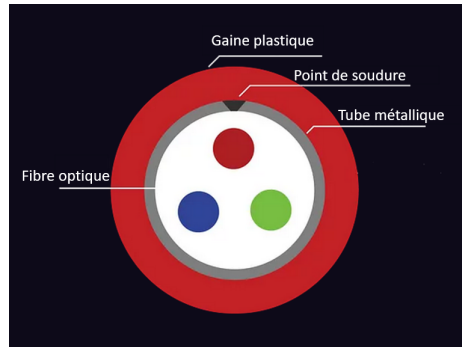
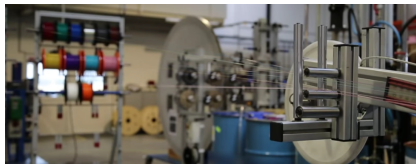


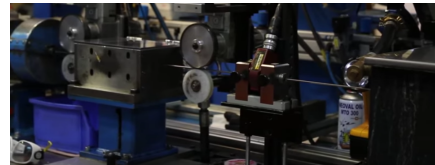
FIGURE I.6 – Coupe d'un câble à fibres optiques possédant plusieurs gaines de protection [15].

Le processus de fabrication de ce câble est donc le suivant :

- coloration et ajout de la seconde gaine $900 \mu\text{m}$ sur les trois fibres présentes dans le câble ;
- insertion des trois fibres dans le tube métal. Pour cela, les trois fibres sont déroulées simultanément le long de la ligne de production. Le tube métallique est réalisé au moyen d'une feuille de métal pliée et soudée localement autour des trois fibres optiques. Puis le tube métallique, avec les fibres à l'intérieur, est enroulé sur un touret ;



(a) Les différentes fibres optiques colorées sont amenées dans la ligne de production.



(b) Les fibres optiques sont insérées dans le tube métallique.



(c) Le câble métallique nouvellement créé est enroulé sur un touret.

- insertion du tube métallique dans la gaine en polyamide. Le tube est déroulé dans une seconde ligne de production dans laquelle il est baigné dans la solution de polyamide portée à haute température pour être liquide. Le tout est ensuite refroidi de manière à solidifier la gaine plastique. Le câble tel que présenté en Figure I.6 est ainsi fabriqué.

I.B.1.d.ii Surveillance en temps réel de l'intégrité d'un câble à fibres optiques durant sa production

Deux paramètres essentiels sont généralement analysés après fabrication :

- l'intégrité de la fibre dans le câble, qui permet de s'assurer qu'aucune perte optique excessive n'est présente le long du câble ;
- la sur-longueur de fibre dans le câble qui permet, en cas de trop forte élongation du câble, de garantir que la fibre optique ne casse pas à l'intérieur du câble.

Ces tests sont réalisés une fois le câble fabriqué, ce qui peut entraîner une perte de productivité dans le cas où celui-ci est classé non-conforme. Un souhait des fabricants est de pouvoir contrôler en temps réel l'intégrité de la fibre durant la production du câble. Dans ce cas, à l'instant même où un défaut est détecté, il est possible de stopper la production pour résoudre le problème.

Nous avons, au cours de cette thèse, eu l'opportunité de valider une méthode de surveillance instantanée de la production d'un câble à fibre optique. Pour cela, nous avons réalisé une mesure distribuée de déformation permettant de suivre en temps quasi-réel l'état de déformation d'une des fibres optiques pendant la fabrication d'un câble tel que celui présenté en Figure I.6. Nous avons réalisé ces mesures uniquement durant le processus d'insertion de la fibre dans le tube métallique.

Pour cela nous avons connecté un interrogateur à la fibre optique directement sur le touret de production, placé en bout de la chaîne de production et sur lequel s'enroule le câble fabriqué. L'interrogateur utilisé est le système compact FEBUS G1-C, produit par la société FEBUS Optics et pouvant fonctionner en autonomie sur batterie. Nous avons fixé l'interrogateur sur le touret en rotation sans devoir le raccorder à une alimentation électrique et avons piloté ce dernier par communication WIFI. La Figure I.8 illustre le montage décrit précédemment avec l'interrogateur placé au niveau de la chaîne de production.

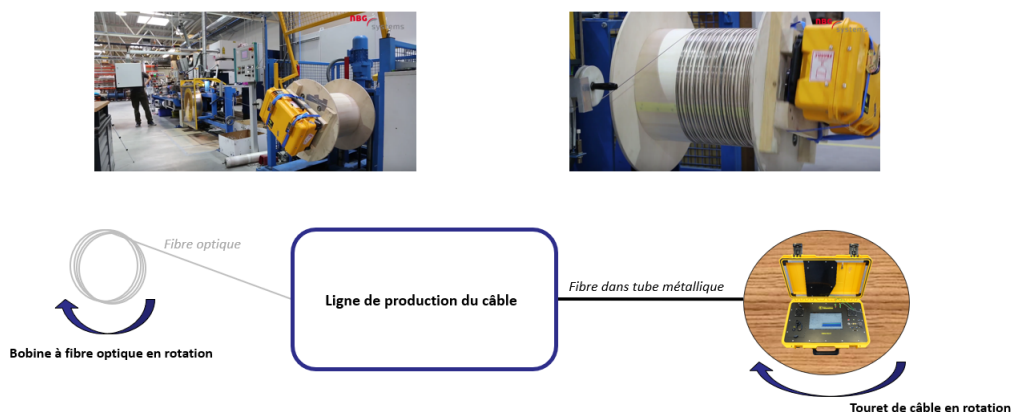


FIGURE I.8 – Illustration du dispositif de contrôle d'intégrité du câble à fibres optiques fabriqué.

Des mesures ont été réalisées toutes les 30 secondes pour obtenir l'évolution du profil de déformation¹ de la fibre comme illustré en Figure I.9.

1. Le système de mesure utilisé est également sensible aux variations de température de la fibre. Cependant nous estimons que, durant ce processus de fabrication, le paramètre de température peut être négligé car très bref et localisé. Nous aborderons la problématique de la température et de la déformation plus tard dans ce manuscrit.

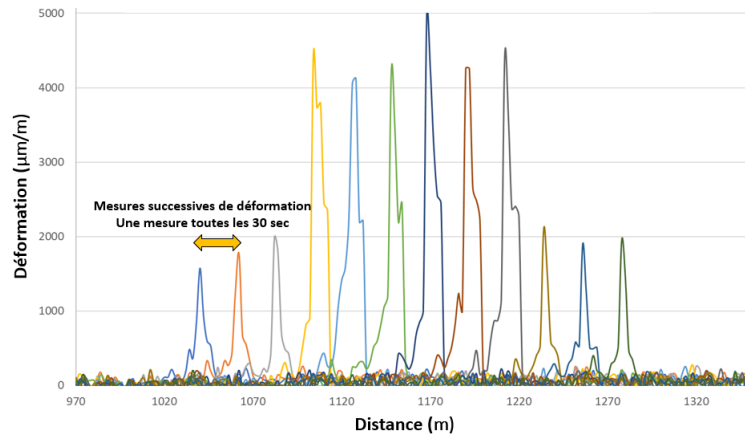


FIGURE I.9 – Mesures successives de la déformation de la fibre optique insérée progressivement dans le câble en fonction de la distance depuis l’interrogateur.

Les mesures étant réalisées durant la production du câble, les pics de déformation observés se déplacent depuis l’interrogateur vers la fin de fibre à mesure que celle-ci est insérée dans le câble. Nous avons mesuré des déformations aléatoires allant de 1500 jusqu’à presque 5000 $\mu\text{m/m}$ ce qui est un niveau relativement élevé par rapport à la résistance d’une fibre optique qui se situe aux alentours de 10 000 $\mu\text{m/m}$ en statique. Ces valeurs nous montrent que pendant le processus de fabrication du câble, la fibre est très fortement sollicitée avec des niveaux de déformation inconstants. Celle-ci ne casse pas car les déformations observées sont très ponctuelles dans le temps. Cependant, ces niveaux de contrainte durant un temps beaucoup plus long pourraient affaiblir la résistance mécanique de la fibre [16, 17]. Les mesures étant réalisées à intervalles de temps réguliers de 30 secondes, nous observons que la ligne de production fabrique le câble à vitesse constante puisque les pics de déformation mesurés sont espacés à intervalles de distance réguliers. Par ailleurs nous constatons également que la déformation de la fibre retombe à des valeurs proches de 0 $\mu\text{m/m}$ après être passée dans la ligne de production et une fois le câble enroulé sur le touret. Ce qui valide l’intégrité de la fibre durant le processus de fabrication du câble.

La Figure I.10 montre ce qui se passe en détail au niveau de la fibre à un seul instant et nous permet de mieux comprendre la déformation de la fibre dans la ligne de production. Nous pouvons décomposer le pic de déformation en trois parties : la première correspondant à une élévation progressive de la déformation et liée à la mise en place de la fibre au niveau de la ligne de production ; par la suite la fibre est insérée dans le tube métallique ce qui crée une forte contrainte mécanique sur celle-ci ; finalement la déformation diminue progressivement lorsque le tube métallique contenant la fibre sort de la ligne de production pour ensuite être enroulé au niveau du touret de câble. Grâce à cette mesure, nous avons également pu estimer la longueur de la ligne de production à environ 17 m ce qui correspond effectivement bien aux vraies dimensions de celle-ci.

Ces mesures ont été réalisées grâce à un interrogateur à fibre optique analysant la rétrodiffusion de la lumière dans une fibre optique. C’est cette rétrodiffusion qui donne l’information cherchée qui est dans notre cas la déformation mécanique perçue par la fibre. Nous allons maintenant présenter le phénomène de diffusion de la lumière qui est à la base de la mesure distribuée par fibre optique.

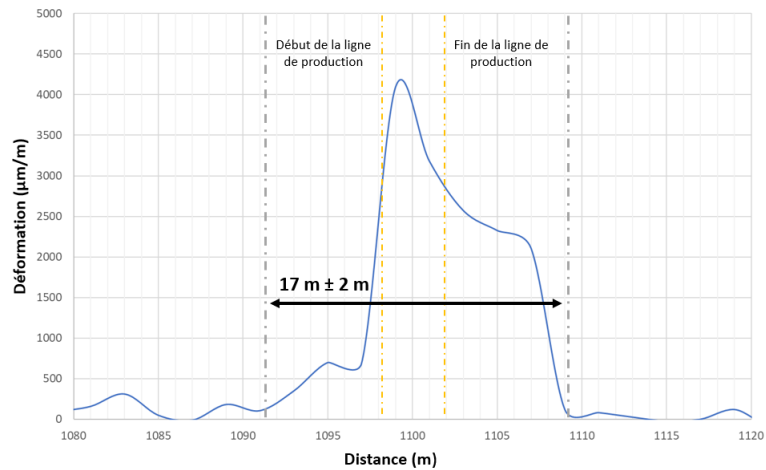


FIGURE I.10 – Mesure de l'état de déformation de la fibre optique insérée dans le câble au niveau de la ligne de production.

I.B.2 Le phénomène de diffusion de la lumière appliqué à la mesure répartie par fibre optique

Toute onde optique se propageant dans un matériau interagit avec ce dernier. Ces interactions entre l'onde optique et le milieu matériel sont à l'origine du phénomène de diffusion dans une fibre optique. Il existe trois types de diffusions représentées en Figure I.11 : les diffusions Rayleigh, Raman et Brillouin. La diffusion Rayleigh est un processus élastique alors que les diffusions Raman et Brillouin sont des phénomènes inélastiques engendrant des décalages en fréquence de la nouvelle onde optique créée. Comme présenté sur la Figure I.11, les diffusions inélastiques peuvent entraîner un décalage fréquentiel soit positif, où l'on parle d'onde anti-Stokes, soit négatif pour une onde Stokes. Ces différentes diffusions ont un véritable intérêt pour la mesure répartie par fibre optique car sensibles à des paramètres physiques tels que la température pour les diffusions Brillouin et Raman, la déformation pour la diffusion Brillouin ou encore les vibrations acoustiques pour la diffusion Rayleigh.

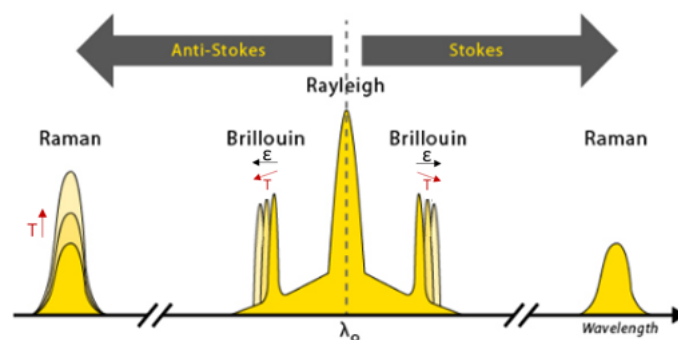


FIGURE I.11 – Les trois diffusions présentes dans une fibre optique

Pour la réalisation de capteurs répartis à fibre optique, ce sont les diverses dépendances des rétrodiffusions aux événements extérieurs qui sont étudiées. Les systèmes de mesure opto-électroniques doivent donc être adaptés à la détection et à l'analyse de l'une des composantes citées ci-dessus.

I.B.2.a La diffusion Rayleigh dans une fibre optique

La diffusion Rayleigh est la réflexion d'une onde optique incidente sur les inhomogénéités d'indice optique dans la fibre (centres diffuseurs). Ces inhomogénéités dans la fibre sont présentes dans la silice qui est un milieu amorphe, mais sont également liées aux éléments chimiques présents dans la fibre et notamment ceux introduits lors de sa fabrication (impuretés, dopants, etc, ...). La diffusion Rayleigh est la principale cause des pertes dans une fibre optique et les variations d'intensité du signal diffusé dépendent des modifications locales dans la fibre optique :

- un pic d'intensité peut correspondre à une réflexion de Fresnel causée par un connecteur ;
- une chute ponctuelle d'intensité peut correspondre à des pertes par soudure ;
- la décroissance globale d'intensité tout le long de la fibre, induite par des pertes uniformes, suit une loi de décroissance exponentielle.

La diffusion Rayleigh est un phénomène élastique qui se produit dans toutes les directions du guide d'onde. La fraction du signal lumineux retournée dans la direction opposée à l'onde optique incidente est dite rétrodiffusée. Cette diffusion n'entraîne pas de changement d'énergie et le signal diffusé se trouve à la même longueur d'onde que l'onde incidente. De plus, l'onde diffusée garde en majorité le même état de polarisation et reste cohérente avec l'onde incidente [18].

La diffusion Rayleigh est communément mesurée par des systèmes de réflectométrie optique qui analysent l'intensité du signal rétrodiffusé dans le but de déterminer les pertes optiques le long de la fibre. Il existe également des instruments permettant, par une analyse de la phase du signal de rétrodiffusion Rayleigh, de détecter et quantifier des vibrations acoustiques se propageant près de la fibre optique [19, 20].

I.B.2.b La diffusion Brillouin dans une fibre optique

Dans une fibre optique, la diffusion Brillouin est un processus inélastique lié à l'interaction entre une onde optique se propageant dans la fibre et des phonons acoustiques de la fibre. Le couplage entre le signal incident et les phonons crée une nouvelle onde optique qui, par effet Doppler, voit sa fréquence être modifiée. Le décalage fréquentiel de la nouvelle onde optique est de l'ordre de 11 GHz. Il est positif lorsque l'on parle d'onde anti-Stokes et négatif lorsque l'on parle d'onde Stokes. La fréquence de diffusion Brillouin est sensible à la fois aux variations de température ΔT et de déformation $\Delta \varepsilon$ de la fibre optique selon l'équation I.3 [21, 22]. La sensibilité de la diffusion Brillouin suivant ces deux paramètres est définie grâce aux coefficients de sensibilité en température $C_{\nu_B T}$ et en déformation $C_{\nu_B \varepsilon}$. Ce phénomène présente aujourd'hui un grand intérêt pour l'instrumentation optique puisque les appareils capables de mesurer la variation de la fréquence du décalage Brillouin peuvent en déduire une mesure de température ou de déformation de la fibre optique suivant l'équation I.3.

$$\Delta \nu_B = C_{\nu_B T} \Delta T + C_{\nu_B \varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (\text{I.3})$$

La diffusion Brillouin et son utilisation pour la mesure par fibre optique fera l'objet d'une description détaillée dans le Chapitre II de ce manuscrit.

I.B.2.c La diffusion Raman dans une fibre optique

Le dernier phénomène de diffusion dans une fibre optique est la diffusion Raman. Ce processus résulte de l'interaction d'une onde optique avec le matériau de la fibre et notamment les phonons optiques. L'onde se propageant dans une fibre optique échange son énergie avec les molécules du milieu, ce qui génère de la diffusion Raman Stokes et anti-Stokes espacées d'environ 13,2 THz par rapport à la fréquence de l'onde optique incidente responsable du processus.

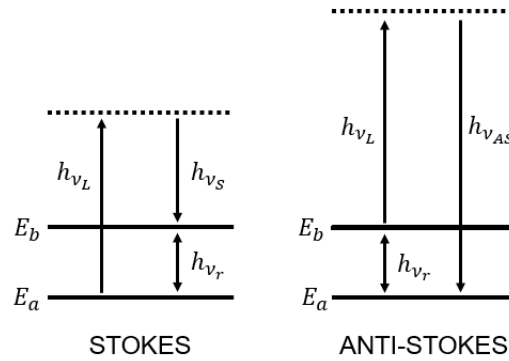


FIGURE I.12 – Schéma des interactions lumière-matière donnant lieu à la diffusion Raman dans une fibre optique.

La Figure I.12 schématise le processus d'échange d'énergie entre deux niveaux virtuels, E_a et E_b . On distingue ainsi deux cas :

- la diffusion Raman Stokes correspond à la transition d'un niveau d'énergie E_a à un niveau d'énergie $E_b = E_a + h\nu_r$ par absorption d'un photon à ν_L et émission d'un photon à $\nu_S = \nu_L - \nu_r$ où h est la constante de Planck et ν_r la fréquence du phonon optique avec lequel interagit l'onde incidente. La population des phonons est donc augmentée d'une unité par transfert d'énergie de l'onde incidente vers le milieu matériel ;
- la diffusion Raman anti-Stokes correspond à la transition d'un niveau d'énergie E_b à un niveau d'énergie $E_a = E_b - h\nu_r$ par absorption d'un photon à ν_L et émission d'un photon à $\nu_{AS} = \nu_L + \nu_r$. La population des phonons est donc diminuée d'une unité par transfert d'énergie du milieu matériel vers l'onde Stokes.

La population de phonons dans un milieu naturel à la température T , notée $\eta_{\text{phonons}}(T)$, suit la statistique de Bose-Einstein explicitée dans l'équation I.4.

$$\eta_{\text{phonons}}(T) = \frac{1}{\left(e^{\frac{h\nu_r}{k_B T}} - 1\right)} \quad (\text{I.4})$$

Ainsi, la diffusion Raman étant fortement liée à la population de phonons présente dans le milieu, cette dernière est donc dépendante de la température. L'intensité de diffusion Raman Stokes et anti-Stokes est donnée par les équations I.5 et I.6 [23].

$$I_{R_{as}}(T) = \frac{K_{AS}}{\lambda_{as}^4} \cdot \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu_r}{k_B T}\right) - 1} \right) \quad (I.5)$$

$$I_{R_s}(T) = \frac{K_S}{\lambda_s^4} \cdot \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu_r}{k_B T}\right) - 1} + 1 \right) \quad (I.6)$$

avec K_{AS} et K_S deux constantes qui prennent en compte la différence de réponse du récepteur optique aux longueurs d'ondes Stokes et anti-Stokes.

L'expression $e^{h\nu_r/k_B T}$ étant très petite devant 1 aux températures proches de 300 K, il en ressort que l'intensité de diffusion Raman anti-Stokes a une dépendance plus forte à la température que l'onde Stokes. On a, pour des températures proches de 300 K, l'intensité de l'onde anti-Stokes qui varie de l'ordre de 0,8 %/K et l'intensité de l'onde Stokes qui varie de l'ordre de 0,1 %/K.

Cette diffusion présente un réel intérêt pour la mesure de température par fibre optique puisque l'analyse des rétrodiffusions Raman Stokes et anti-Stokes permet de déterminer la valeur de la température perçue par la fibre [24]. Le ratio de ces deux intensités $R(T) = I_{R_{as}}(T)/I_{R_s}(T)$, associé à une compensation liée à la différence de pertes dans une fibre optique pour deux longueurs d'ondes sensiblement différentes (≈ 400 nm), permet donc de retrouver quantitativement la valeur de température au niveau de la fibre optique suivant l'équation I.7 [18].

$$R(T) = \left(\frac{K_{as}}{K_s} \right) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu_r}{k_B T}\right) \quad (I.7)$$

Il est à noter que la diffusion Raman dans une fibre optique est très faible (environ 10^{-6} de la puissance du signal incident [23, 25]), le rapport signal sur bruit d'une telle mesure est donc lui-aussi faible. Pour cela, l'utilisation de fibre multimode présente un intérêt non négligeable par rapport aux fibre monomodes. Outre le fait qu'une fibre monomode standard SMF28 perd son aspect unimodal en dessous de 1250 nm (ce qui peut être une limite pour propager le signal Raman anti-Stokes), la fibre multimode présente l'avantage de recueillir une puissance rétrodiffusée supérieure aux fibres monomodes. Ainsi, l'utilisation de la fibre multimode pour réaliser une mesure de diffusion Raman permet d'augmenter le rapport signal sur bruit et ainsi la sensibilité de mesure.

I.B.3 Les capteurs de mesure répartie par fibre optique

La technologie des capteurs à fibre optique utilise les phénomènes de diffusion dans une fibre optique pour permettre une mesure distribuée de paramètres physiques tels que la température, la déformation ou encore les vibrations acoustiques. Ces capteurs réalisent une mesure dite répartie puisque le phénomène de diffusion est infiniment continu sur toute la longueur de la fibre. Ainsi la totalité de la fibre est interrogée à l'inverse des capteurs à réseaux de Bragg dont la mesure se fait uniquement en des points précis de la fibre dont la position a été définie au préalable lors de l'inscription des réseaux. Dans le secteur industriel, il existe trois dénominations de capteurs à fibre optique en fonction du type de paramètre physique que l'on souhaite mesurer :

- les appareils DTS pour "Distributed Temperature Sensing" qui permettent une mesure de la température ;
- les DSS pour "Distributed Strain Sensing" qui réalisent une mesure de l'état de déformation de la fibre ;
- les interrogateurs DAS pour "Distributed Acoustic Sensing" qui sont, quant à eux, destinés à la mesure de vibrations acoustiques.

Chacun de ces instruments est relié à une ou plusieurs des trois diffusions présentes dans la fibre optique. Les appareils DTS sont reliés à la diffusion Raman mais également à la diffusion Brillouin sensible à la fois à la température et à la déformation. Les équipements DSS sont eux majoritairement liés à la diffusion Brillouin dans une fibre optique bien que la diffusion Rayleigh présente elle-aussi une sensibilité à la déformation. Enfin, les interrogateurs DAS utilisent la diffusion Rayleigh dans la fibre. Ces interrogateurs reposent sur le principe de la réflectométrie optique dans le domaine temporel.

I.B.3.a La réflectométrie optique dans le domaine temporel

Le principe de réflectométrie optique dans le domaine temporel est une méthode d'analyse initialement démontrée pour une mesure de la rétrodiffusion Rayleigh dans une fibre optique en 1976 par Barnoski et Jensen [18, 26]. Le système optique mis au point a été appelé OTDR pour "Optical Time Domain Reflectometry" et ce nom est aujourd'hui couramment utilisé dès qu'une mesure répartie par fibre optique est réalisée en réflectométrie dans le domaine temporel. Initialement, les systèmes OTDRs mesuraient simplement l'intensité de diffusion Rayleigh mais de nouveaux réflectomètres optiques ont vu le jour et permis la mesure d'autres paramètres physiques dans la fibre comme la diffusion Brillouin et Raman ou encore la phase optique de la diffusion Rayleigh. Ainsi ces nouveaux systèmes ont gardé le suffixe OTDR auquel on a ajouté un préfixe correspondant au paramètre physique mesuré. Par exemple, les systèmes B-OTDRs mesurent par réflectométrie la diffusion Brillouin dans une fibre tandis que les systèmes ϕ -OTDR mesurent la phase de la diffusion Rayleigh.

Un réflectomètre optique contient une source laser, un photorécepteur (généralement constitué par une simple photodiode) et un système d'acquisition du signal précis dans le temps. Le principe général de la réflectométrie repose sur l'injection d'une impulsion de lumière brève dans la fibre optique qui, tout au long de son parcours, interagit avec le milieu. Une petite portion de cette lumière est rétrodiffusée de manière continue tout le long de la fibre en raison des effets simultanés Rayleigh, Brillouin et Raman. Ce signal optique, rétrodiffusé en direction de la photodiode, est converti dans le domaine électrique, enregistré de manière continue puis analysé en fonction du paramètre à mesurer souhaité (intensité de rétrodiffusion Rayleigh, spectre de rétrodiffusion Brillouin, phase de rétrodiffusion Rayleigh, etc...). Ainsi la mesure par réflectométrie permet une interrogation presque simultanée sur la totalité de la longueur de la fibre, la transformant en l'équivalent d'une multitude de capteurs répartis le long de celle-ci. La localisation de la mesure se fait grâce à l'évaluation du temps de propagation, aller-retour, du signal lumineux dans la fibre.

Un système OTDR traditionnel mesure l'intensité du signal de diffusion Rayleigh en fonction de la distance dans la fibre, ce qui permet de déterminer la qualité d'une ligne optique en localisant et quantifiant les pertes optiques qui ont un impact sur la transmission du signal.

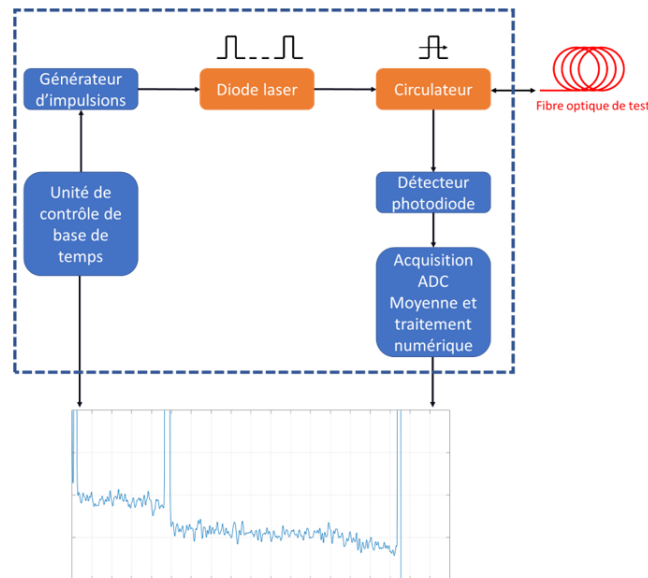


FIGURE I.13 – Principe de fonctionnement général d'un système OTDR

Aujourd'hui, un OTDR a une dynamique de mesure pouvant supporter jusqu'à 50 dB de pertes optiques, ce qui permet une mesure sur environ 250 km de fibre. Les résolutions spatiales minimales accessibles sont généralement aux alentours de 0,3 m avec une précision de mesure de l'ordre de 0,01 dB. Le temps d'une mesure OTDR est généralement de plusieurs dizaines de secondes puisque l'appareil réalise un moyennage du signal généré par des milliers d'impulsions lumineuses envoyées les unes après les autres (l'appareil attend que l'impulsion se soit propagée entièrement dans la fibre, aller et retour, avant d'en renvoyer une autre). Ce moyennage permet d'améliorer le ratio du signal à bruit de la mesure.

Une illustration typique d'une courbe OTDR est donnée à la figure I.14. Celui-ci va permettre de discriminer les événements affectant la fibre. Un connecteur est une interface verre-air-verre et représente un miroir semi-réfléchissant qui crée une réflexion de Fresnel. Dans le cas d'un connecteur, l'OTDR mesure un pic de réflexion suivi d'une perte de l'ordre de 0,1 – 0,2 dB. Une épissure optique ou une courbure locale vont quant à elles représenter sur la trace OTDR un décalage négatif de l'ordre de 0,02 dB pour une épissure. Par ailleurs, les pertes linéaires (absorption et diffusion Rayleigh) présentes tout le long de la fibre sont caractérisées par la pente linéaire décroissante de l'intensité de rétrodiffusion Rayleigh tout le long de la fibre optique. La fin de la ligne optique s'identifie généralement par un pic de réflexion suivi par la chute du signal jusqu'au niveau de bruit de l'appareil.

Du fait de la réalisation de mesures dites distribuées, les réflectomètres par fibre optique sont des instruments de mesure qui présentent des caractéristiques métrologiques additionnelles aux capteurs ponctuels plus classiques. Il est donc important de connaître et comprendre ces paramètres lors de l'utilisation de ce type de technologie.

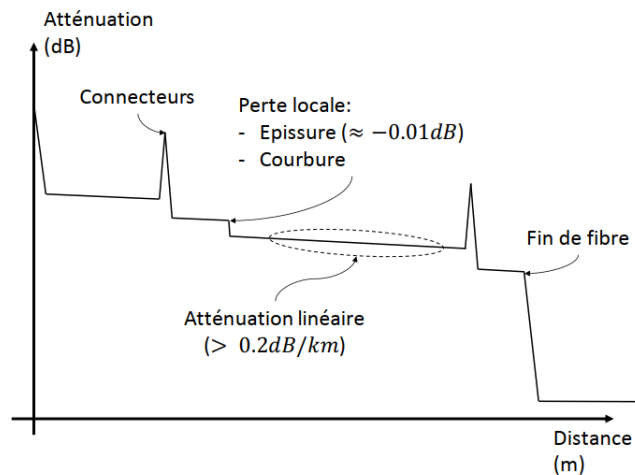


FIGURE I.14 – Courbe typique d'une mesure réalisée par un système OTDR sur une ligne optique [27]

I.B.3.b Définitions métrologiques des paramètres d'acquisition de la mesure distribuée par fibre optique

Nous allons présenter dans cette partie les différentes définitions métrologiques liées à la mesure distribuée par fibre optique. Les instruments de mesure par fibre optique présentent un certain nombre de paramètres métrologiques supplémentaires par rapport à des systèmes ponctuels. Nous souhaitons dans un premier temps rappeler les définitions importantes liées à la métrologie [28] puis nous présenterons les paramètres spécifiques pour la mesure par fibre optique. Mais avant cela, nous allons définir deux termes importants qui sont : la mesurande et le capteur.

- **La mesurande** : Il s'agit de la grandeur physique à mesurer. Pour la grande majorité des systèmes de mesure par fibre optique, la mesurande pourra être de la déformation, de la température ou encore des vibrations acoustiques.
- **Le capteur** : Il s'agit un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée dans une certaine zone, en une grandeur manipulable par un utilisateur : une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité, la déviation d'une aiguille, etc... Il est au minimum composé d'un transducteur dont le rôle est de transformer la grandeur à mesurer en information interprétable. Il convient en général de distinguer le capteur de l'instrument de mesure, qui comporte en plus un affichage et un traitement informatique des données. En effet, le capteur n'est que l'interface entre un phénomène physique et une grandeur qui pourra être manipulée et traitée par la suite. Dans le cadre de la mesure par fibre optique, il est primordial de distinguer le capteur qui est la fibre optique et le système d'interrogation qui permet l'analyse de la grandeur physique pour en déduire la mesurande.

Nous présentons les principales définitions métrologiques pour l'ensemble des capteurs.

- **La sensibilité** est la variation du signal de sortie d'un appareil de mesure en fonction de la variation du signal d'entrée sur toute l'étendue de mesure de l'instrument.
- **L'exactitude** caractérise l'étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie de mesurande. Ce paramètre est qualifié par la justesse qui est l'écart entre le résultat moyen et la valeur vraie, et aussi par la fidélité qui est l'aptitude à donner des mesures exemptes d'erreurs accidentelles.
- **Le seuil de mobilité** correspond à la plus petite variation perceptible sur le résultat de la mesure, appelée aussi résolution lorsque liée à l'affichage / enregistrement. Il peut toutefois s'agir du bruit provenant de la chaîne de mesure ou de son environnement.
- **L'incertitude**, à l'inverse de l'exactitude, est une valeur définissant la dispersion autour de la valeur vraie. Elle modélise une probabilité d'erreur sur une mesure isolée. Dans le domaine de l'instrumentation par fibre optique on caractérise souvent l'incertitude de répétabilité qui qualifie l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages successifs d'une même mesurande, effectués exactement dans les mêmes conditions de mesure. 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.

Toutes ces définitions métrologiques sont standards pour tout type de capteurs, qu'ils soient à fibre optique ou non. Mais la mesure distribuée par fibre optique est également caractérisée par d'autres paramètres propres à cette technologie.

— **La localisation de la mesure :**

Il s'agit bien d'une notion nouvelle puisque, à l'inverse des capteurs dits "ponctuels" où la mesure est située dans ou à proximité du transducteur, la mesure par fibre optique est réalisée sur toute la longueur de la fibre. Le transducteur est donc continu sur une longueur qui peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Ainsi la localisation de la mesure est un point important de ce type de technologie. La localisation d'un point de mesure à la distance d de l'interrogateur se fait en prenant en compte le temps de propagation aller-retour de la lumière dans la fibre entre le point remarquable et l'interrogateur suivant l'équation :

$$d = \frac{c\Delta t}{2n_g} \quad (I.8)$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide, n_g l'indice de groupe dans la fibre, Δt le temps aller-retour de la lumière dans la fibre (entre l'instant d'injection de l'impulsion, son temps de propagation pour arriver au point d , et le temps de retour de la rétrodiffusion du point d jusqu'à l'interrogeur).

— **La résolution d'échantillonnage de la mesure :**

Ce paramètre est corrélé à la localisation de la mesure puisqu'il définit le plus petit intervalle de distance entre deux points de mesure le long de la fibre optique. Ce paramètre est en partie dépendant de la fréquence d'échantillonnage du système mais également de la puissance du traitement informatique disponible dans celui-ci.

— **La résolution spatiale de la mesure :**

Un autre aspect important de la mesure par réflectométrie optique est la résolution spatiale. Il s'agit de la longueur spatiale du plus petit événement détectable par le système. Physiquement cela correspond à la longueur d'interaction de l'impulsion optique avec le matériau de la fibre. Cette longueur est donc définie par la durée de l'impulsion optique injectée par le système. Effectuant une mesure en réflectométrie et étant dépendant du temps de trajet aller-retour de l'impulsion, la résolution spatiale mesurée sur le signal de rétrodiffusion est définie par la moitié de la durée δt de l'impulsion optique suivant la relation :

$$\Delta z = \frac{c\delta t}{2n_g} \quad (\text{I.9})$$

Les résolutions spatiales pour les systèmes de mesure répartie par fibre optique sont généralement comprises entre des valeurs de 1 à 10 m qui correspondent à une impulsion de 10 à 100 ns.

— **La portée de la mesure et le budget optique :**

Une des caractéristiques principales d'un interrogeur à fibre optique est sa capacité à réaliser des mesures sur plusieurs dizaines de kilomètres. Or comme nous l'avons vu, un signal optique se propageant dans une fibre s'atténue au cours de sa propagation à raison d'environ 0,2 dB/km à une longueur d'onde de 1550 nm pour une fibre standard monomode. Cette atténuation limite donc la distance de mesure maximale de l'interrogeur puisque celui-ci doit garder un rapport signal sur bruit suffisant pour réaliser une mesure avec une incertitude acceptable. La notion de budget optique détermine le taux maximal de pertes de la ligne optique pouvant être supportées par l'interrogeur pour lequel l'incertitude de mesure est encore acceptable. Étant donné que les pertes optiques sont dépendantes du type de fibre utilisée mais également de la manière dont celle-ci a été implémentée, la notion de budget optique, exprimée en dB, est plus pertinente que le serait la notion de distance.

— Le temps de mesure :

Ce paramètre est très important dans le domaine de la mesure distribuée par fibre optique. En effet, les interrogateurs mesurent des signaux de rétrodiffusion qui sont d'intensité très faible. Ainsi, pour une seule mesure, il est nécessaire de réaliser un grand nombre de moyennes en collectant la rétrodiffusion générée par des impulsions optiques successives afin d'améliorer le rapport signal sur bruit de la mesure. Cette succession de moyennes nécessite un certain temps pour être réalisée. Ce temps est dépendant de la durée de propagation aller-retour de la lumière dans la fibre optique mais également du temps nécessaire à l'acquisition du signal et à son traitement numérique. De ce fait, plus la distance de la fibre à mesurer est grande, plus le temps de mesure est important. Le rapport signal sur bruit étant plus faible en fin de fibre du fait des pertes optiques, augmenter le nombre de moyennes permet alors d'augmenter la distance de mesure. Le temps de mesure est un paramètre qui peut être ajusté par l'utilisateur en fonction des performances de mesure souhaitées. Généralement, ce temps est de l'ordre de la seconde ou de la minute. Cependant, certains équipements dits « dynamiques » permettent des mesures supérieures à la dizaine de hertz pouvant même atteindre 100 Hz. Dans ce cas, le nombre de moyennes par mesure est plus faible et les performances de mesure sont moins bonnes que pour un appareil de mesures dites « statiques ».

I.C Conclusion du chapitre

Les technologies de capteurs à fibres optiques ont créé un véritable bouleversement dans le domaine de l'instrumentation des grandes structures linéaires liées au domaine de l'énergie (pipeline, câbles, puits,...). Les avantages liés à la mesure par ces techniques (encombrement et poids minime, insensibilité aux champs électromagnétiques, portée de mesure, etc.) permettent de rivaliser avec les techniques de mesure traditionnelles par capteurs électriques et très souvent de les surpasser. La détection de défauts ou le suivi de la production en tous points de la structure instrumentée, sans aucune zone morte, est le point le plus important pour ce type de technologie.

Nous avons présenté dans ce chapitre les concepts fondamentaux de l'instrumentation par fibre optique. Les principales caractéristiques des fibres optiques ainsi que les moyens de fabrication et de contrôle des câbles destinés à la surveillance d'infrastructures ont été présentés. Nous avons décrit et validé une méthode de surveillance en temps réel de la production d'un câble. Les résultats obtenus, qui ont fait l'objet d'une communication dans une conférence dédiée à l'industrie des énergies renouvelables en mer [29], nous ont permis de mieux comprendre et valider le processus de fabrication du câble. Nous avons par la suite décrit les concepts de propagation de la lumière dans une fibre optique ainsi que les différents phénomènes de rétrodiffusion qui permettent la mesure de paramètres physiques d'intérêt comme la température, la déformation ou encore les vibrations acoustiques. Enfin, nous avons défini le principe de réflectométrie optique dans le domaine temporel qui a été majoritairement utilisé durant cette thèse ainsi que tous les paramètres métrologiques spécifiques liés à ce type de technologie.

Références

- [1] EGIG. *Gas Pipeline Incidents : 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 - 2013)*. EGIG 14.R.0403. Fév. 2015.
- [2] GCUBE INSURANCE. *Down to the Wire : An insurance buyer's guide to subsea cabling incidents*. Juin 2016.
- [3] A. MORANA et al. « Steady-State Radiation-Induced Effects on the Performances of BOTDA and BOTDR Optical Fiber Sensors ». In : *IEEE Transactions on Nuclear Science* 65.1 (jan. 2018), p. 111-118. ISSN : 1558-1578. DOI : [10.1109/TNS.2017.2772333](https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2772333).
- [4] Joshua M. JACOBS. *The Impact of Hydrogen on Optical Fibers*. Sept. 2004.
- [5] Donald D. Davis JR, Stephen C. METTLER et David J. DIGIOVANNI. « Comparative evaluation of fiber fuse models ». In : *Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1996*. Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1996. T. 2966. International Society for Optics et Photonics, 13 mai 1997, p. 592-606. DOI : [10.1117/12.274220](https://doi.org/10.1117/12.274220).
- [6] T. HOSAKA et al. « Low-loss single polarisation fibres with asymmetrical strain birefringence ». In : *Electronics Letters* 17.15 (juil. 1981). Conference Name : Electronics Letters, p. 530-531. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19810371](https://doi.org/10.1049/e1:19810371).
- [7] Chris EMSLIE. « Chapter 8 - Polarization Maintaining Fibers ». In : *Specialty Optical Fibers Handbook*. Sous la dir. d'Alexis MÉNDEZ et T. F. MORSE. Burlington : Academic Press, 1^{er} jan. 2007, p. 243-277. ISBN : 978-0-12-369406-5. DOI : [10.1016/B978-012369406-5/50010-2](https://doi.org/10.1016/B978-012369406-5/50010-2).
- [8] Zhihong LI et al. « Complete Characterization of Polarization-Maintaining Fibers Using Distributed Polarization Analysis ». In : *Journal of Lightwave Technology* 33.2 (15 jan. 2015), p. 372-380. ISSN : 0733-8724, 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.2014.2377091](https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2377091).
- [9] Feng TANG et al. « Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers ». In : *Optics Letters* 31.23 (1^{er} déc. 2006). Publisher : Optical Society of America, p. 3411-3413. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.31.003411](https://doi.org/10.1364/OL.31.003411).
- [10] Fujikura LTD. « Introduction of PANDA fibers ». In : (), p. 44.
- [11] Kwang Yong SONG et al. « All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber ». In : *Optics Letters* 33.9 (1^{er} mai 2008), p. 926-928. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.33.000926](https://doi.org/10.1364/OL.33.000926).
- [12] Qinrong YU, Xiaoyi BAO et Liang CHEN. « Temperature dependence of Brillouin frequency, power, and bandwidth in panda, bow-tie, and tiger polarization-maintaining fibers ». In : *Optics Letters* 29.1 (1^{er} jan. 2004). Publisher : Optical Society of America, p. 17-19. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.29.000017](https://doi.org/10.1364/OL.29.000017).
- [13] M.P. VARNHAM et al. « Polarimetric strain gauges using high birefringence fibre ». In : *Electronics Letters* 19.17 (août 1983). Conference Name : Electronics Letters, p. 699-700. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19830476](https://doi.org/10.1049/e1:19830476).

- [14] UIT : *Engagée à connecter le monde*. ITU. Library Catalog : www.itu.int. URL : <https://www.itu.int:443/fr/Pages/default.aspx> (visité le 30/04/2020).
- [15] Home. NBG Fiber Optics. Library Catalog : www.nbg.tech. URL : <https://www.nbg.tech/> (visité le 21/03/2020).
- [16] David KALISH et B. K. TARIYAL. « Static and Dynamic Fatigue of a Polymer-Coated Fused Silica Optical Fiber ». In : *Journal of the American Ceramic Society* 61.11 (1978). _eprint : <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1151-2916.1978.tb16131.x>, p. 518-523. ISSN : 1551-2916. DOI : [10.1111/j.1151-2916.1978.tb16131.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb16131.x).
- [17] Arne SKONTORP et Julie CAMMAS. « Static fatigue life of silica optical fibers and the significance of fiber coating and handling ». In : *Smart Structures and Materials 2001 : Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*. Smart Structures and Materials 2001 : Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. T. 4328. International Society for Optics et Photonics, 6 août 2001, p. 96-105. DOI : [10.1117/12.435514](https://doi.org/10.1117/12.435514).
- [18] Arthur HARTOG. *An introduction to distributed optical fibre sensors*. 12 avr. 2017. ISBN : 978-1-4822-5957-5. DOI : [10.1201/9781315119014](https://doi.org/10.1201/9781315119014).
- [19] R. JUŠKAITIS et al. « Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber ». In : *Optics Letters* 19.3 (1^{er} fév. 1994). Publisher : Optical Society of America, p. 225-227. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.19.000225](https://doi.org/10.1364/OL.19.000225).
- [20] Yuelan LU et al. « Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR ». In : *Journal of Lightwave Technology* 28.22 (15 nov. 2010). Publisher : IEEE, p. 3243-3249.
- [21] T. HORIGUCHI, T. KURASHIMA et M. TATEDA. « Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 1.5 (mai 1989). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 107-108. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/68.34756](https://doi.org/10.1109/68.34756).
- [22] T. KURASHIMA, T. HORIGUCHI et M. TATEDA. « Thermal effects of Brillouin gain spectra in single-mode fibers ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 2.10 (oct. 1990). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 718-720. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/68.60770](https://doi.org/10.1109/68.60770).
- [23] Robert BOYD. *Nonlinear Optics*. 3rd edition. Academic Press, 28 mar. 2008. 640 p.
- [24] J. P. DAKIN et al. « Distributed Antistokes Ratio Thermometry ». In : *Optical Fiber Sensors (1985), paper PDS3*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 1^{er} jan. 1985, PDS3. DOI : [10.1364/OFS.1985.PDS3](https://doi.org/10.1364/OFS.1985.PDS3).
- [25] Govind P. AGRAWAL. *Nonlinear Fiber Optics*. 5th. Elsevier, 2013. ISBN : 978-0-12-397023-7. DOI : [10.1016/C2011-0-00045-5](https://doi.org/10.1016/C2011-0-00045-5).
- [26] M. K. BARNOSKI et S. M. JENSEN. « Fiber waveguides : a novel technique for investigating attenuation characteristics ». In : *Applied Optics* 15.9 (1^{er} sept. 1976), p. 2112-2115. ISSN : 2155-3165. DOI : [10.1364/AO.15.002112](https://doi.org/10.1364/AO.15.002112).
- [27] Damien MARAVAL. « Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR ». Thèse de doct. Télécom ParisTech, 11 mai 2017. 180 p.

- [28] *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. JCGM 200 :2012. JCGM, 2008.
- [29] Pierre CLÉMENT, Lara LATRASSE et Vincent LANTICQ. « Cable Monitoring during Production and Deployment ». In : WindEurope. Amsterdam, 28 nov. 2017.

Chapitre II

Caractérisation et optimisation d'un système B-OTDR

II.A La diffusion Brillouin dans les fibres optiques

II.A.1 La diffusion Brillouin spontanée

Dans tout matériau, les molécules constituant ce dernier subissent l'agitation thermique et effectuent des petits déplacements autour de leur position d'équilibre. Cette agitation thermique est responsable de la création de phonons acoustiques qui se couplent entre eux et modifient l'indice de réfraction, créant des ondes acoustiques de faible amplitude. Vu autrement, une onde acoustique est une onde de compression de la matière se propageant à une vitesse V_A et qui induit des réseaux d'indice, dits réseaux de Bragg, se propageant à cette vitesse. Lorsqu'une onde électromagnétique est injectée dans une fibre optique, certains photons vont alors être diffusés par ces ondes mobiles. Le couplage de ces photons avec ces réseaux mobiles crée une nouvelle onde optique contra-propagative qui, par effet Doppler, voit sa fréquence être modifiée. Il est également possible de parler de réflexion de la lumière sur ces réseaux de Bragg mobiles.

Deux cas se présentent :

- lorsque l'onde diffusée est décalée vers les basses fréquences, avec une valeur ν_A de l'onde acoustique, on parle alors d'onde Stokes. Dans ce cas, les photons diffusés perdent de l'énergie par rapport à l'onde incidente ;
- à l'inverse, lorsque l'onde présente une fréquence supérieure par rapport à l'onde optique initiale, l'onde diffusée est appelée anti-Stokes. Elle présente alors une énergie supérieure à l'onde incidente.

La fréquence de l'onde Brillouin diffusée s'écrit donc :

$$\nu_B = \nu_p \pm \nu_A \quad (\text{II.1})$$

où ν_p est la fréquence de l'onde optique incidente et ν_A la fréquence de l'onde acoustique dans le matériau qui a pour expression :

$$\nu_A = \frac{2n_{eff}V_A}{\lambda_0} \quad (\text{II.2})$$

où V_A est la vitesse des ondes acoustiques dans le matériau et n_{eff} l'indice effectif des ondes optiques à la longueur d'onde λ_0 .

La vitesse V_A des ondes acoustiques est fortement liée aux propriétés mécaniques du matériau et dans le cas de la silice, $V_A = 5960\text{m/s}$. Dans la pratique,

on parle plutôt de vitesse acoustique effective qui est dépendante des conditions de guidage des ondes acoustiques dans la fibre [30].

Le couplage acousto-optique traduit alors la réflexion de l'onde incidente sur l'onde acoustique et les vecteurs d'onde impliqués sont liés par la relation de conservation de quantité de mouvement :

$$\vec{k}_B = \vec{k}_p \pm \vec{q} \quad (\text{II.3})$$

avec \vec{k}_B le vecteur d'onde du signal diffusé, \vec{k}_p celui de l'onde incidente et \vec{q} celui des ondes acoustiques.

A la manière d'un réseau de Bragg, les longueurs d'onde λ_B des champs Stokes Brillouin et λ_a des champs acoustiques sont liées par la relation de Bragg :

$$\lambda_B = 2\lambda_a \sin(\theta_i) \quad (\text{II.4})$$

La fréquence de l'onde acoustique étant très inférieure aux fréquences optiques, les vecteurs d'ondes \vec{k}_B et \vec{k}_p sont quasi égaux. On en déduit alors que l'angle de diffusion θ_B entre les faisceaux optiques est deux fois l'angle d'incidence θ_i . Ainsi la relation de Bragg peut s'écrire en fonction des vecteurs d'onde :

$$\|\vec{q}\| = 2\|\vec{k}_p\| \sin \frac{\theta_B}{2} \quad (\text{II.5})$$

Dans une fibre optique, la propagation de la lumière étant guidée, la diffusion ne peut se faire qu'en avant ou en arrière. Or $\theta_B = 0$ correspond alors à une fréquence nulle, ce qui fait que le seul angle admissible de diffusion est $\theta_B = \pi$. On parle alors uniquement de rétrodiffusion Brillouin qui se propage dans le sens opposé à l'onde incidente. La Figure II.1 schématise géométriquement cette condition.

En prenant en compte ces relations entre les vecteurs d'onde, il est possible également de définir l'onde diffusée Stokes lorsque l'onde acoustique se déplace dans le même sens de propagation que l'onde optique. Et inversement, les deux ondes se propagent dans le sens opposé lorsqu'il s'agit de diffusion anti-Stokes.

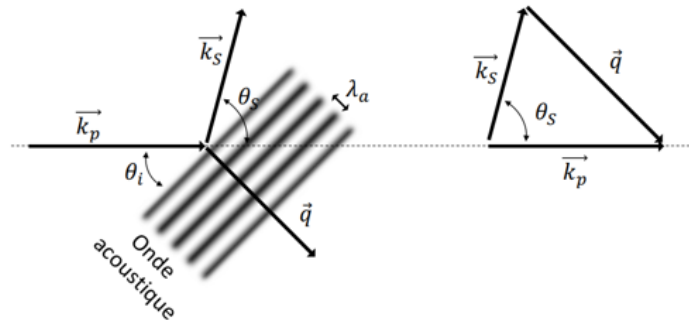


FIGURE II.1 – Couplage d'une onde optique incidente sur une onde acoustique permettant la rétrodiffusion d'une onde Brillouin Stokes.

II.A.2 La diffusion Brillouin stimulée

Le régime Brillouin stimulé apparaît lorsque deux ondes optiques et le matériau (par le biais des ondes acoustiques) interagissent entre eux. Ainsi, lorsqu'une onde pompe optique et une onde Stokes contra-propagatrice sont présentes dans le matériau, elles forment un battement comme nous l'observons sur la Figure II.2. L'enveloppe de ce battement vibre à la fréquence ν_B et se propage à la vitesse V_A dans le sens de l'onde pompe. Ce champ électrique crée alors une pression hydrostatique que l'on nomme électrostriction qui renforce l'onde acoustique de fréquence de diffusion Brillouin ν_B et de vitesse V_A . Elle est en mesure de se coupler de nouveau avec l'onde pompe de manière à créer une onde Stokes plus intense et ainsi de suite. Ce phénomène en boucle est appelé diffusion Brillouin stimulée et apparaît pour des ondes pompes de fortes intensités dépassant une puissance pour laquelle on observe un accroissement significatif du niveau de puissance Brillouin que nous définirons plus tard dans l'équation II.8.

La pression électrostrictive P_{st} créée dépend du carré du champ électrique E de l'onde pompe et de la constante électrostrictive du matériau γ suivant la relation :

$$P_{st} = -\gamma \frac{E^2}{8\pi} \quad (\text{II.6})$$

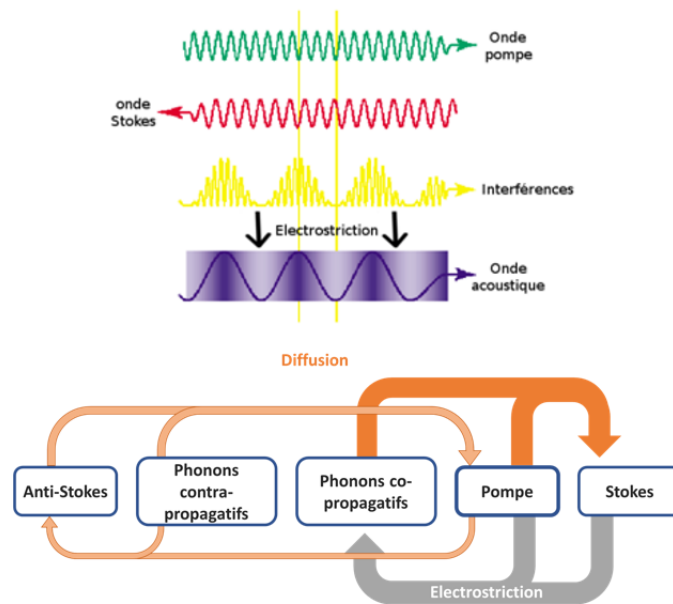


FIGURE II.2 – Génération de la diffusion Brillouin stimulée [31].

Une approche corpusculaire de la diffusion Brillouin stimulée permet d'expliquer que la création de l'onde anti-Stokes ne peut exister en régime stimulé. En effet, en régime spontané, les diffusions Stokes et anti-Stokes ont quasiment la même amplitude. Cependant en régime stimulé, l'accroissement de la puissance pompe entraîne une augmentation à la fois du nombre de photons Stokes et de phonons acoustiques se propageant dans le sens de propagation. A l'opposé, la création d'un photon anti-Stokes résulte de l'annihilation d'un photon pompe et d'un phonon acoustique se propageant dans le sens inverse à la propagation. Le "réservoir" de phonons acoustiques responsable de la diffusion anti-Stokes n'est pas alimenté, par conséquent l'onde anti-Stokes n'est pas stimulée.

Deux cas sont possibles pour arriver au stade de diffusion Brillouin stimulée :

— Régime stimulé :

Deux ondes optiques sont injectées à chaque extrémité de la fibre optique. Lorsqu'elles se rencontrent, le phénomène d'électrostriction est enclenché afin d'accroître l'amplitude de l'onde acoustique et par conséquent, le niveau de rétrodiffusion Brillouin correspondant à l'onde signal. Le niveau de signal rétrodiffusé sera maximal quand la différence entre les deux ondes est égale à la fréquence acoustique ν_B .

— Régime spontané amplifié :

On parle de régime spontané amplifié lorsque la rétrodiffusion spontanée Brillouin est elle-même amplifiée par le phénomène d'électrostriction. Ce régime apparaît pour des puissances de pompe suffisamment élevées qui génèrent une onde Stokes intense favorisant l'électrostriction dans la fibre. Cette limite de puissance est appelée puissance de seuil Brillouin et noté P_{th} . Dans le domaine des télécommunications, elle limite la puissance des ondes optiques injectées car en cas de dépassement, la qualité de transmission diminue [32].

II.A.3 Les notions principales de la diffusion Brillouin

Nous allons définir plusieurs paramètres importants liés aux propriétés de la diffusion Brillouin dans une fibre optique :

Le gain Brillouin :

Le gain Brillouin définit le coefficient de transfert d'énergie entre l'onde pompe et l'onde Stokes contra-propagatrice générée dans le milieu. L'expression du gain Brillouin est définie en accord avec la relation suivante [33, 25] :

$$g_B = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2 \Gamma_B}{c \lambda_0^2 \rho V_A} \quad (\text{II.7})$$

où p_{12} est un coefficient du tenseur photoélastique longitudinal, n l'indice optique, ρ la densité volumique du matériau, c la célérité de la lumière dans le vide et Γ_B le temps de vie des phonons dans le matériau, de l'ordre de 10 ns dans une fibre optique. Le gain Brillouin d'une fibre de silice présente une valeur aux alentours de $3 - 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$. Pour une fibre Corning SMF28e, celui-ci est d'environ $2 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$ du fait des effets de polarisation de l'onde optique [34, 31].

La puissance de seuil Brillouin :

Le gain Brillouin est dit saturé si le transfert d'énergie est trop important et amène un phénomène de déplétion de l'onde pompe. On définit la puissance de seuil Brillouin P_{th} lorsque la déplétion atteint 3 dB en bout de fibre. Le niveau de ce seuil dépend de la longueur efficace de l'interaction Brillouin, du gain g_B et de l'aire effective A_{eff} du mode optique se propageant dans la fibre :

$$P_{th} = G_{th} \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (\text{II.8})$$

où G_{th} est une constante sans dimension dépendante de la longueur de la fibre et du gain Brillouin g_B . Typiquement, G_{th} a une valeur entre 17 et 19 pour une fibre standard SMF28e de longueur supérieure au kilomètre [35]. Enfin, la longueur effective L_{eff} d'une fibre optique de longueur L est définie comme la longueur équivalente d'une fibre sans absorption α qui produirait les mêmes effets non-linéaires cumulés. En effet, plus la fibre est longue, plus les effets non-linéaires s'accumulent.

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (\text{II.9})$$

Ainsi à partir de la puissance critique P_{th} , l'onde Stokes s'amplifie exponentiellement suivant le coefficient de gain Brillouin g_B . Cette puissance critique est d'autant plus faible que la fibre est longue. La Figure II.3 montre l'évolution de la puissance seuil Brillouin pour une fibre standard monomode SMF28e en fonction de sa longueur. On observe sur ce graphique que la puissance seuil diminue fortement entre 0 et 5 km, passant de plus de 100 mW à moins de 20 mW, puis la décroissance devient plus faible au-delà et suit la loi exponentielle de l'expression de la longueur effective.

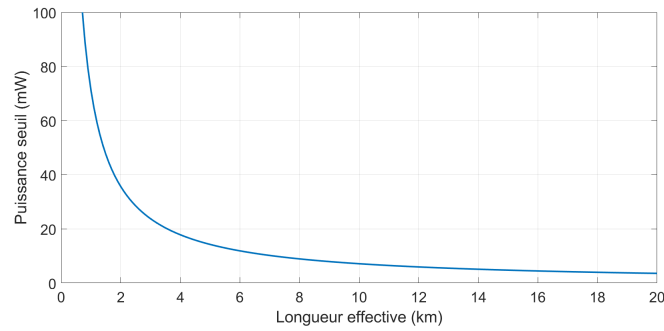


FIGURE II.3 – Évolution de la puissance de seuil Brillouin en fonction de la longueur pour une fibre standard SMF28e.

Le spectre de gain Brillouin :

La forme du spectre de gain Brillouin est étroitement liée au temps de vie des phonons acoustiques dans la fibre optique qui s'exprime suivant une exponentielle décroissante. Ainsi la forme du spectre de gain Brillouin résultante est une lorentzienne ayant pour expression :

$$g_B(\nu) = g_B \frac{\left(\frac{\Delta\nu_B}{2}\right)^2}{(\nu_B - \nu)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_B}{2}\right)^2} \quad (\text{II.10})$$

On peut par ailleurs noter que la largeur à mi-hauteur $\Delta\nu_B$ du gain Brillouin est reliée à la durée de vie des phonons Γ_B par la relation :

$$\Gamma_B = \frac{1}{\pi\Delta\nu_B} \quad (\text{II.11})$$

Dans les fibres utilisées pour les télécommunications à 1550 nm, on estime la largeur à mi-hauteur du pic Brillouin à environ 30 MHz [36].

En régime stimulé, le spectre de l'onde de diffusion Brillouin évolue d'un profil lorentzien vers un profil gaussien, et sa largeur à mi-hauteur rétrécit avec l'augmentation de la puissance incidente [37]. Ce régime multiplie le nombre de phonons autour de la fréquence Brillouin ν_B , position du maximum de la courbe de gain Brillouin [35, 38].

Tous ces paramètres étudiés seront utiles pour la compréhension des phénomènes qui seront décrits dans la suite de ce manuscrit, notamment lors de la présentation au Chapitre III des limites en puissance des interrogateurs mesurant la rétrodiffusion Brillouin.

II.A.4 La sensibilité de la diffusion Brillouin à la température et à la déformation

Nous allons démontrer dans cette partie la double sensibilité de la diffusion Brillouin à la température et à la déformation. Cette propriété a permis l'essor des appareils de mesure de diffusion Brillouin dans la domaine de l'instrumentation.

II.A.4.a La dépendance de la fréquence de diffusion Brillouin à la température et à la déformation

Dépendance à la déformation :

D'après l'équation II.2, la valeur de la fréquence de diffusion Brillouin d'une fibre est dépendante de la vitesse des ondes acoustiques dans la fibre V_A . Ce paramètre dépend lui-même des propriétés mécaniques de la fibre et notamment de sa densité volumique ρ , son module de Young E_γ et son coefficient de Poisson $\nu_{poisson}$ suivant l'équation II.12.

$$V_A = \sqrt{\frac{E_\gamma(1 - \nu_{poisson})}{(1 + \nu_{poisson})(1 - 2\nu_{poisson})\rho}} \quad (\text{II.12})$$

Tous ces paramètres varient en fonction de la déformation appliquée au matériau de telle manière à ce que la vitesse des ondes acoustiques évolue suivant la relation :

$$\frac{1}{V_A} \frac{\partial V_A}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{2E_\gamma} \frac{\partial E_\gamma}{\partial \varepsilon} + \frac{\nu_{poisson}(2 - \nu_{poisson})}{(1 - \nu_{poisson}^2)(1 - 2\nu_{poisson})} \frac{\partial \nu_{poisson}}{\partial \varepsilon} - \frac{1}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \quad (\text{II.13})$$

où $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} = -(1 - 2\nu_{poisson})$, expérimentalement $\frac{1}{E_\gamma} \frac{\partial E_\gamma}{\partial \varepsilon} = 5,75$ et $\frac{\partial \nu_{poisson}}{\partial \varepsilon} = 3,07$ pour la silice [39].

De même, l'évolution de l'indice effectif de la fibre en fonction de la déformation est déterminée par les coefficients photo-élastiques ρ_{11} et ρ_{12} tels que :

$$\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} = -\frac{n_{eff}}{2} [\rho_{12} - \nu_{poisson}(\rho_{11} + \rho_{12})] \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, la fréquence de diffusion Brillouin étant dépendante de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans la fibre V_A mais également de l'indice effectif n_{eff} , on en déduit donc, d'après les équations II.13 et II.14, que la déformation de la fibre optique va avoir un impact sur la fréquence du pic Brillouin.

Dépendance à la température :

Les paramètres n_{eff} et V_A varient avec la température. Les coefficients thermo-optique dn_{eff}/dT et thermo-acoustique dV_A/dT usuellement utilisés sont décrits par la relation suivante [30] :

$$\frac{dn_{eff}}{dT} = \text{vol}_D \frac{dn_D}{dT} + (1 - \text{vol}_D) \frac{dn_{SiO_2}}{dT} \quad (\text{II.15})$$

où vol_D correspond à la fraction de volume du dopant dans la fibre, n_D et n_{SiO_2} étant les indices respectifs du dopant et de la silice. La variation de la vitesse V_A en fonction de la température s'écrit donc :

$$\frac{dV_A}{dT} = \frac{V_A}{2} \left[\frac{1}{E_\gamma} \frac{dE_\gamma}{dT} + \alpha \right] \quad (\text{II.16})$$

où V_A est la vitesse longitudinale des ondes acoustiques, E_γ le module de Young et α le coefficient d'expansion thermique.

On peut donc, de la même manière, supposer que la fréquence de diffusion Brillouin d'une fibre optique présente une sensibilité à la température.

II.A.4.b La dépendance de l'intensité de diffusion Brillouin à la température et à la déformation

Dépendance à la température :

La diffusion Brillouin résulte de l'interaction entre l'onde optique et les phonons acoustiques dans la fibre dont le nombre moyen \bar{n} est donné par la loi de Bose-Einstein [23] :

$$\bar{n} = \left(e^{\frac{h\nu_A}{k_B T}} - 1 \right)^{-1} \approx 600 \quad (\text{II.17})$$

(pour $\nu_A = 10 \text{ GHz}$ et $T = 283 \text{ K}$)

avec k_B et h qui sont respectivement les constantes de Boltzman et de Planck.

L'intensité de diffusion Brillouin est donc dépendante de cette loi puisqu'elle résulte de l'interaction des photons optiques avec les phonons acoustiques présents dans la fibre à un instant donné. L'intensité de diffusion Brillouin Stokes (correspondant d'un point de vue de la mécanique quantique à l'émission d'un phonon) et l'intensité de diffusion Brillouin anti-Stokes (correspondant à l'absorption d'un phonon) peuvent s'écrire :

$$I_{B_{as}}(T) = \frac{K_B}{\lambda_{as}^4} \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{h\nu_A}{k_B T}} - 1} \right) \quad (\text{II.18})$$

$$I_{B_s}(T) = \frac{K_B}{\lambda_s^4} \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{h\nu_A}{k_B T}} - 1} + 1 \right) \quad (\text{II.19})$$

où le coefficient d'intensité K_B est lié au coefficient de diffusion Rayleigh dépendant de la densité du matériau [18], de la vitesse des ondes acoustiques, ainsi que de la compressibilité isotherme.

Dans l'équation II.19, l'énergie présente au numérateur de l'exponentielle, correspondant à l'énergie des phonons responsable de la diffusion Brillouin décalée d'environ 10 GHz, est plus petite que le dénominateur de trois ordres de grandeur. Ceci implique donc qu'aux températures usuelles, les intensités de diffusion Stokes et anti-Stokes ont une sensibilité identique à la température qui suit approximativement une loi linéaire en fonction de la température. Ces équations nous montrent donc que l'intensité de diffusion Brillouin évolue de manière proportionnelle avec la température : plus la température de la fibre augmente plus l'intensité de diffusion est importante.

Dépendance à la déformation :

Par ailleurs, l'intensité de diffusion Brillouin présente également une dépendance à la déformation et cette dépendance a été montrée à travers l'expression du ratio de Landau Placzek, correspondant au ratio de l'intensité de diffusion Rayleigh par l'intensité de diffusion Brillouin [40, 41].

$$\frac{I_B}{I_R}(T, \varepsilon) = \frac{T}{T_f} \frac{1}{V_A^2 \rho \beta_T (1 + 5,75\varepsilon) - 1} \quad (\text{II.20})$$

où β_T est la compressibilité isotherme du matériau, ν_p le coefficient de Poisson, E_γ le module de Young et T_f la température fictive à laquelle le verre se retrouve figé d'un point de vue thermodynamique. Ainsi d'après l'équation II.20, on peut affirmer que l'intensité présente une sensibilité également à la déformation et qu'une augmentation de la déformation de la fibre aura pour conséquence de diminuer l'intensité de la diffusion Brillouin dans la fibre.

Si l'on résume, la diffusion Brillouin dans une fibre optique présente une double sensibilité à la fois à la température mais également à la déformation. Cette double sensibilité se traduit par une variation de la fréquence de diffusion Brillouin mais également de l'intensité. Nous allons voir par la suite les valeurs des différents coefficients de sensibilité impliqués.

II.A.4.c La matrice de sensibilité de la diffusion Brillouin à la température et à la déformation

D'après les différents points abordés, nous pouvons affirmer que le décalage $\Delta\nu_B$ de la fréquence Brillouin rétrodiffusée ν_B et la variation de son intensité ΔI_B sont tous les deux sensibles linéairement aux variations de température ΔT et de déformation $\Delta\varepsilon$ de la fibre optique. Cette relation peut ainsi s'écrire sous la forme d'une matrice de dimension 2x2 :

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\nu_B\varepsilon} & C_{\nu_B T} \\ C_{I_B\varepsilon} & C_{I_B T} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les coefficients de sensibilité en fréquence $C_{\nu_B\varepsilon}$, $C_{\nu_B T}$ et en intensité $C_{I_B\varepsilon}$, $C_{I_B T}$ liés aux variations de température et déformation sont déterminés pour un type de fibre donné et une longueur d'onde définie. Cependant, les fibres optiques typiques utilisées dans les télécommunications présentent des coefficients de sensibilité similaires qui ont été quantifiés dans plusieurs études [42, 30].

$$\begin{bmatrix} C_{\nu_B\varepsilon} & C_{\nu_B T} \\ C_{I_B\varepsilon} & C_{I_B T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.046 \text{ MHz}/\mu\varepsilon & 1.07 \text{ MHz}/\text{K} \\ -8.10^{-4}\%/\varepsilon & 0.36\%/\text{K} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

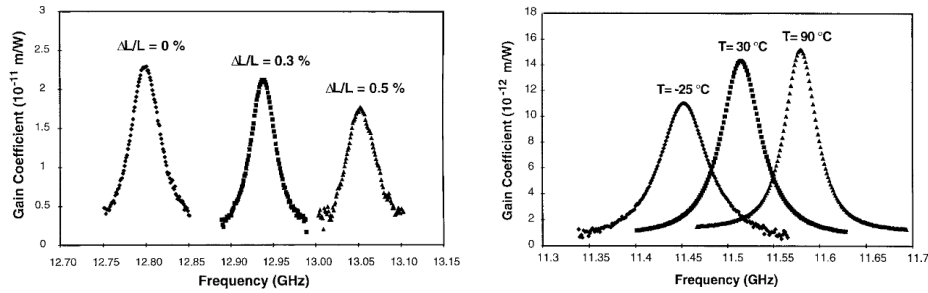


FIGURE II.4 – Évolution du spectre de diffusion Brillouin en fonction de la température et de la déformation [43].

Les courbes en Figure II.4 montre l'évolution en fréquence mais également en intensité du spectre Brillouin en fonction de la température et de la déformation. Cette évolution suit les coefficients de sensibilité définis dans l'équation II.22.

Il est important de noter que les coefficients de sensibilité sont dépendants des propriétés de la fibre optique et peuvent donc varier de quelques pourcents en fonction notamment du dopage de celle-ci [30]. En effet, de nombreux paramètres sont à prendre en compte dans la définition de la fréquence et de l'intensité de diffusion Brillouin comme le module de Young, le coefficient de Poisson, la densité, la vitesse des ondes acoustiques, paramètres qui peuvent donc varier en fonction de la température et de la déformation. Par exemple, les coefficients de sensibilité de la fréquence Brillouin pour la déformation peuvent varier de $0,046 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ pour une fibre standard SMF28e jusqu'à $0,0347 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ pour une fibre qui sera fortement dopée au G_eO_2 . Ces différences peuvent donc avoir des conséquences importantes pour la mesure distribuée par fibre optique et doivent donc être prises en compte pour la réalisation d'interrogeurs.

La plupart des interrogeurs réalisant une mesure de température ou de déformation utilisent la sensibilité à la fréquence de la diffusion Brillouin. Très peu d'interrogeurs analysent la puissance de diffusion Brillouin car dans ce cas, la fiabilité de mesure est souvent moins bonne. En effet, une mesure fréquentielle, à l'inverse d'une mesure en puissance qui peut varier dans le temps du fait de pertes optiques apparaissant sur la fibre, ne nécessite pas de calibration à chaque mesure réalisée.

La sensibilité en fréquence permet d'estimer la résolution de mesure accessible pour un système de mesure de diffusion Brillouin. En fonction des moyens d'acquisition à disposition de nos jours, elle est de l'ordre de $10 \mu\text{m}/\text{m}$ et $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour la majorité des applications de surveillances de structures, comme les pipelines, les puits ou encore les câbles de puissance, cette résolution de mesure est suffisante puisque les événements qui engendrent des dégâts sur ces structures ont la plupart du temps de fortes amplitudes. Mais nous verrons que des améliorations optiques et numériques spécifiques permettent aux interrogeurs d'améliorer encore un peu plus cette résolution de mesure.

II.A.5 Les techniques de mesure répartie par diffusion Brillouin utilisées dans l'industrie

Il existe de nombreux types d'interrogateurs avec des configurations opto-électroniques différentes permettant une mesure de la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre optique. Le principal intérêt de ce type de technologie est la sensibilité de la rétrodiffusion Brillouin à la température et à la déformation. Dans l'industrie, ce type d'interrogateur sera appelé à la fois DTS (Distributed Temperature Sensing) ou DSS (Distributed Strain Sensing) en fonction de son utilisation.

Pour caractériser des variations de température ou de déformation par effet Brillouin, il faut donc réussir, par un moyen ou un autre, à mesurer les variations de fréquence du signal rétrodiffusé ν_B . Ainsi, différentes techniques existent comme celles dans le domaine de corrélation (B-OCDA/B-OCDR pour "Brillouin Optical Correlation Domain Analysis/Reflectometry") ou encore dans le domaine fréquentiel (B-OFDA/B-OFDR pour "Brillouin Optical Frequency Domain Analysis/Reflectometry"). Cependant, les technologies les plus éprouvées et utilisées dans l'industrie pour la surveillance d'infrastructure réalisent la mesure dans le domaine temporel (B-OTDA/B-OTDR pour "Brillouin Optical Time Domain Analysis/Reflectometry"). L'avantage des technologies dans les domaines de corrélation et fréquentiel par rapport au domaine temporel est une meilleure résolution spatiale de la mesure au détriment d'une portée bien moindre. Ainsi, la résolution spatiale est de l'ordre du centimètre contre une résolution de l'ordre du mètre pour les technologies temporelles. En contrepartie, la portée de mesure est réduite à quelques centaines de mètres contre plusieurs dizaines de kilomètres. Or pour la surveillance de grandes infrastructures telles que les pipelines ou les câbles de puissance sous-marins, la portée de mesure atteignable de l'instrument prime sur la résolution. Nous nous focaliserons donc sur la technologie temporelle et notamment sur le fonctionnement du B-OTDA et du B-OTDR. Le lecteur pourra consulter [18, 44, 45, 46] pour plus d'informations sur les autres systèmes.

Techniques courantes de mesure de diffusion Brillouin	Meilleure combinaison résolution spatiale / portée de mesure atteignable	Répétabilité de mesure atteignable
B-OCDA [47]	• 30 mm / 500 m	• $60 \mu\epsilon$ / 1°C
B-OFDA [48]	• 20 mm / 2 km	• $2 \mu\epsilon$ / $0,1^\circ\text{C}$
B-OTDA [49]	• 50 cm / 5 km • 1 m / 10 km • 5 m / 50 km	• $15 \mu\epsilon$ / $0,75^\circ\text{C}$ • $7 \mu\epsilon$ / $0,35^\circ\text{C}$ • $16 \mu\epsilon$ / $0,8^\circ\text{C}$
B-OTDR [50]	• 1 m / 10 km • 5 m / 50 km	• $6 \mu\epsilon$ / $0,3^\circ\text{C}$ • $13 \mu\epsilon$ / $0,65^\circ\text{C}$

TABLE II.1 – Tableau de comparaison des performances de plusieurs techniques de mesure de la diffusion Brillouin

Le tableau II.1 compare différentes spécifications clés comme la résolution spatiale, la portée de mesure ainsi que les performances en répétabilité, pour un nombre non exhaustif de types d'interrogations les plus courants dans l'industrie. Les technologies B-OCDA et B-OFDA montrent leurs limites en terme

de portée de mesure. En effet, ces technologies permettent d'accéder à une résolution spatiale de l'ordre du mm avec des performances de mesure acceptables. Cependant, la distance de mesure accessible est bien trop courte pour pouvoir adresser le marché de la surveillance de grandes infrastructures. Ces technologies peuvent malgré tout présenter un intérêt dans le génie civil où le besoin pour une résolution spatiale millimétrique est beaucoup plus important que dans d'autres domaines. Par ailleurs, on constate également sur ce tableau que les interrogateurs B-OTDAs et B-OTDRs présentent des performances relativement similaires tout en pouvant accéder à de longues distances de mesure, ce qui leur donne un net avantage pour la surveillance d'infrastructure de transport d'énergie. Ce tableau comparatif conforte donc le choix de se focaliser principalement, au cours de cette thèse, sur les technologies réalisant des mesures dans le domaine temporel (B-OTDA et B-OTDR).

II.A.5.a Les interrogations de type B-OTDA

Ces systèmes de mesure analysent le spectre de gain Brillouin sous un régime stimulé mettant en jeu deux ondes contra-propagatives dans la fibre, une onde pompe et une onde sonde. La Figure II.5 présente le fonctionnement général d'un système de mesure B-OTDA. Une onde pompe impulsionnelle, de fréquence ν_p , est injectée à une extrémité de la fibre optique tandis que de l'autre côté est injectée une onde sonde continue et de fréquence optique inférieure ν_s . La fréquence de l'onde sonde est balayée afin de faire varier la différence de fréquence optique $\Delta\nu = \nu_p - \nu_s$ entre l'onde sonde et l'onde pompe autour de la fréquence de décalage Brillouin dans la fibre ν_B . Nous allons décrire les différentes étapes du processus en nous appuyant sur cette figure :

- (a). Deux ondes optiques pompe et sonde sont injectées, chacune aux deux extrémités d'une fibre instrumentée dont une portion est sous contrainte;
- (b). Lorsque l'onde pompe et sonde se recouvrent dans la fibre, un échange d'énergie apparaît entre les deux. Celui-ci est maximal lorsque la différence de fréquence optique des deux ondes est exactement égale à la fréquence de décalage Brillouin;
- (c). Lors de l'interaction entre les ondes pompe et sonde au niveau de la zone de fibre contrainte, le couplage n'est plus le même du fait de la variation de la fréquence Brillouin liée à la déformation de la fibre. Ici, l'échange d'énergie entre les deux ondes est donc plus faible;
- (d). On revient à la même configuration que pour l'étape (b) avec un échange d'énergie entre les deux ondes plus important qu'en (c);
- (e). Lors du changement de fréquence optique de l'onde signal, les interactions précédentes, soit les étapes (b), (c) et (d), s'inversent et l'échange d'énergie est alors maximal à l'endroit où la fibre est déformée.

Ainsi par un balayage de la fréquence optique, il est possible de reconstituer en tout point de la fibre le spectre d'évolution du gain Brillouin afin d'en déterminer le décalage exact de la fréquence Brillouin. Pour ce type d'interrogateur, l'analyse se fait sur l'évolution du gain de l'onde sonde en transmission et non en réflexion. Il est à noter que deux types de mesure sont possibles : une mesure par gain lorsque la fréquence optique de l'onde impulsionnelle est supérieure à l'onde continue et une mesure par perte dans le cas inverse. La Figure II.6 schématise un montage B-OTDA standard avec une partie optique composée d'un

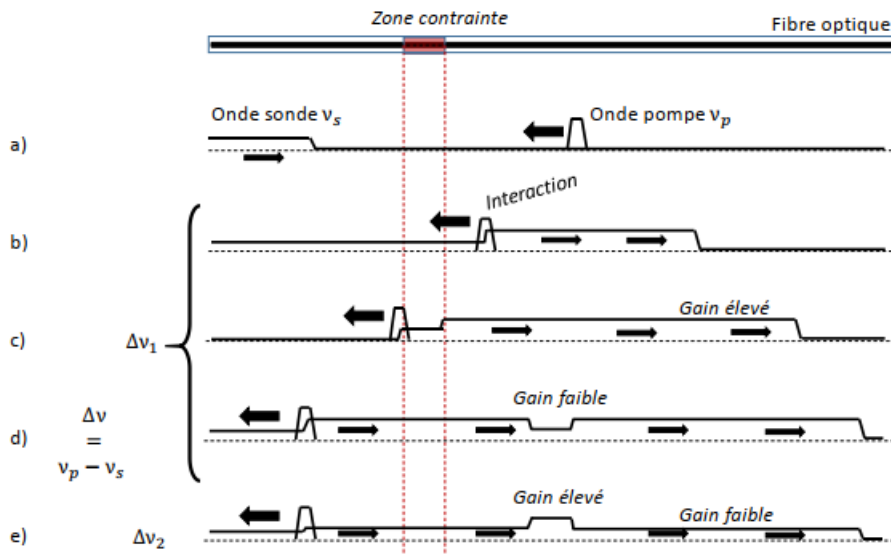


FIGURE II.5 – Principe de fonctionnement d'un interrogateur B-OTDA [27].

laser continu et de modulateurs électro-optiques permettant de générer d'un côté les impulsions optiques envoyées dans la fibre et de l'autre côté permettant de réaliser le balayage fréquentiel de l'autre onde. Le signal optique est ensuite collecté par un système d'acquisition permettant de reconstituer le spectre de gain Brillouin distribué sur toute la fibre mesurée.

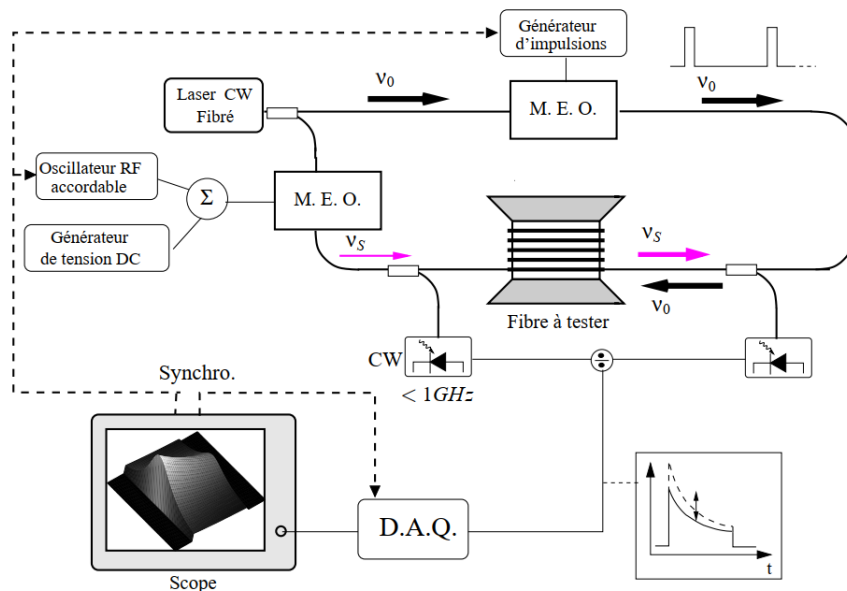


FIGURE II.6 – Schéma optoélectronique général d'un interrogateur B-OTDA d'après [31].

La résolution spatiale des appareils de mesure B-OTDAs est déterminée par la durée de l'impulsion de l'onde pompe. Ainsi, une impulsion de 30 ns entrainera une résolution spatiale de l'ordre de 3 m. Les interrogateurs mesurant la rétrodiffusion Brillouin dans le domaine temporel sont limités physiquement à une résolution spatiale de 1 m qui correspond à une durée d'impulsion de 10 ns, ce qui est

le temps de vie des phonons acoustiques dans la fibre. Dès lors que la durée de l'impulsion injectée dans la fibre est inférieure à 10 ns, on observe une réduction drastique de l'amplitude du pic Brillouin ainsi qu'un élargissement spectral en raison de la convolution entre le spectre de gain Brillouin et le spectre optique de l'impulsion optique d'autant plus large que l'impulsion est courte. La détermination du pic de fréquence Brillouin devient donc plus incertaine.

Certaines évolutions ont été proposées pour accroître la résolution spatiale des équipements B-OTDAs. Une méthode consiste à envoyer deux impulsions de sonde consécutives de durée et d'amplitude différentes et sans temps de délai entre les deux impulsions [51]. La Figure II.7 montre le fonctionnement optique de ce type d'interrogateur, appelé PPP-BOTDA pour "Pulse Pre-Pump BOTDA", qui injecte d'un côté de la fibre un signal faible continu (comme un B-OTDA classique) et de l'autre côté une impulsion optique découpée en deux parties : une de faible amplitude et de longue durée, suivie sans discontinuité d'une autre de forte amplitude et de courte durée. La durée de l'impulsion courte correspond à la résolution spatiale de mesure souhaitée, tandis que la durée de l'impulsion longue doit l'être suffisamment pour obtenir un spectre de diffusion Brillouin suffisamment fin comme le montre la Figure II.8. L'interaction entre l'onde pompe et la première impulsion de sonde, d'une durée bien supérieure au temps de vie des phonons (pour éviter tout élargissement spectral), va par diffusion Brillouin stimulée pré-activer les phonons dans la fibre avant que la seconde impulsion sonde (de taille plus petite que le temps de vie des phonons) n'arrive à cette position. Grâce à l'effet de la première impulsion sur les ondes acoustiques de la fibre, l'interaction de la deuxième impulsion avec les phonons de la fibre et l'onde pompe injectée à l'autre extrémité de la fibre peut être améliorée, ce qui permet de réduire la résolution spatiale tout en gardant une précision de mesure satisfaisante. Cette technique permet de limiter le phénomène d'élargissement spectral dû à des impulsions très courtes (< 10 ns) et permet également de limiter la réduction d'amplitude du pic Brillouin.

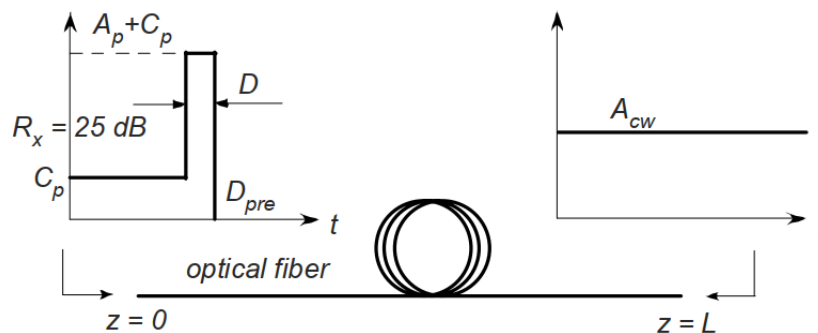


FIGURE II.7 – Fonctionnement d'un interrogateur B-OTDA à double impulsions d'après [51].

Certains systèmes commerciaux B-OTDAs utilisent donc ce type de fonctionnement optique pour proposer des résolutions de mesure allant jusqu'à 10 cm [52]. Dans ce cas, cette technique de double impulsions est légèrement modifiée pour améliorer la fiabilité de mesure et son rapport signal sur bruit. Notamment, la première impulsion optique peut être modulée en intensité ou en phase de manière à augmenter le contraste entre les diffusions Brillouin générées par la première et la seconde impulsion [53, 51].

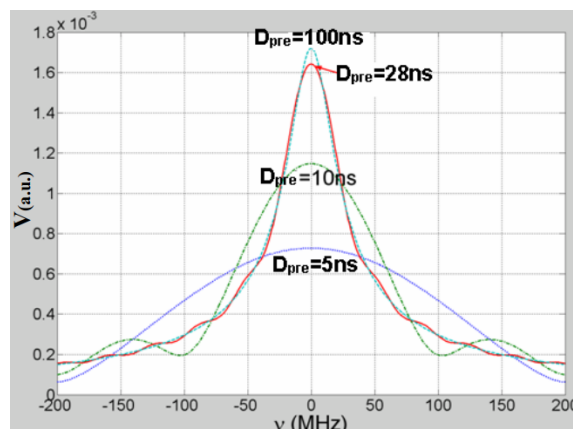


FIGURE II.8 – Évolution du spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré par un B-OTDA à double impulsions en fonction de la durée de première impulsion. [51].

II.A.5.b Les interrogations de type B-OTDR

Les systèmes de mesure B-OTDR réalisent une analyse spectrale et temporelle du signal de rétrodiffusion Brillouin en utilisant le principe de réflectométrie optique déjà présenté en partie I.B.3.a. A l'inverse des équipements B-OTDAs, le B-OTDR ne nécessite l'accès qu'à une seule extrémité de la fibre optique.

La Figure II.9 représente la configuration classique d'un système B-OTDR. Les impulsions sont générées à partir d'un laser CW qui est couplé à un modulateur électro-optique (noté "MEO" sur la figure), piloté par un générateur d'impulsions électriques, de manière à préserver la cohérence de la source. Ces impulsions optiques sont injectées dans la fibre, et vont générer de la diffusion Brillouin spontanée durant leur propagation dans la fibre optique. Le signal de rétrodiffusion est ensuite analysé par un système de détection cohérente hétérodyne dont l'oscillateur local est obtenu à partir du même laser, l'objectif étant d'amplifier mais également de transposer, par battement, la fréquence optique de la rétrodiffusion de l'ordre de 200 THz en une fréquence de l'ordre de 10 GHz qui correspond à la fréquence de décalage Brillouin de la fibre mesurée. Sur l'oscillateur local est généralement implémenté un système permettant de s'affranchir des effets de polarisation lors de la détection du battement optique par la photodiode (noté "SCR"). Par la suite, le signal issu de la photodiode (dont la bande passante doit être supérieure à la fréquence de décalage Brillouin) est mélangé avec un oscillateur local électrique (noté "MIX"), ramenant le signal Brillouin vers une fréquence intermédiaire IF. Son enveloppe est alors détectée avec un couple composé d'un filtre passe-bande ("FPB") centré sur l'IF, et un détecteur. En faisant varier la fréquence de l'oscillateur RF, on reconstitue, fréquence par fréquence, le spectre Brillouin réparti qui est détecté par la chaîne d'acquisition ("DAQ").

Cette technique de mesure spectrale dans le domaine électrique a été présentée par SHIMIZU et al. [54] en 1994 et correspond à une technique qui n'est aujourd'hui pratiquement plus utilisée avec la généralisation du traitement numérique permettant de réaliser des détections d'enveloppe et de l'analyse spectrale à moindre coût et de manière beaucoup plus rapide. Nous verrons dans la suite de ce chapitre qu'il est possible d'utiliser des algorithmes de transformées de Fourier permettant d'obtenir le spectre de gain Brillouin de manière totalement numérique.

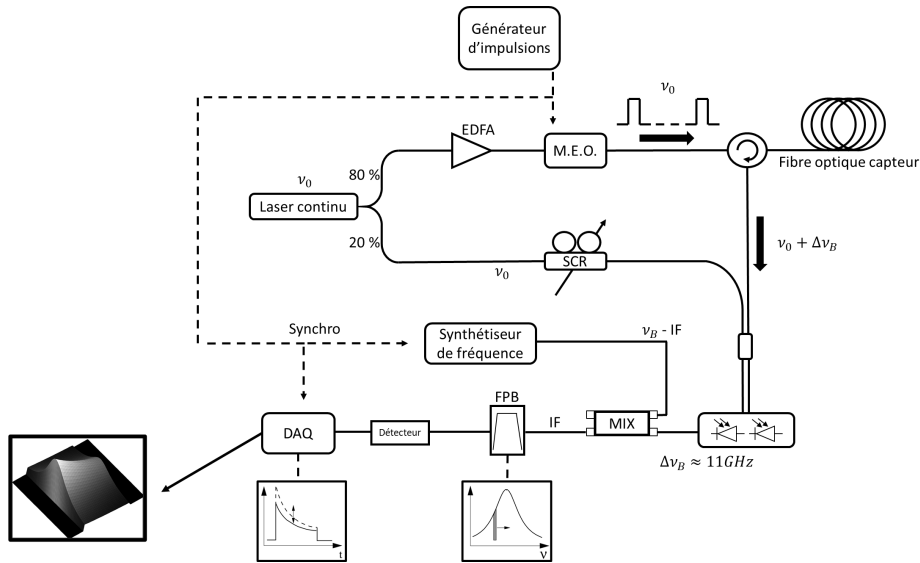


FIGURE II.9 – Fonctionnement d'un interrogateur B-OTDR.

Comme les systèmes B-OTDAs, les B-OTDRs ont une résolution spatiale limitée physiquement à 1 m qui correspond aux 10 ns de temps de vie des phonons dans la fibre. Cependant, de la même manière que pour les PPP-BOTDAs, des concepts de B-OTDR à doubles impulsions ont permis de réaliser des mesures avec des résolutions spatiales allant jusqu'à 20 cm [55]. Le principe de la mesure diffère quelque peu de celui des PPP-BOTDAs en étudiant le signal d'interférence de la diffusion créée par deux impulsions sondes dont l'espacement et la largeur sont inférieurs au temps de vie des phonons pour rester dans le même domaine de cohérence. L'interférence de ces deux ondes permet d'obtenir la fréquence de diffusion Brillouin d'un point de la fibre très localisé avec une résolution spatiale proche de la taille d'une impulsion. SAKAIRI et al. [56] ont ainsi pu démontrer une mesure B-OTDR avec une résolution spatiale de 20 cm et une précision de la mesure de $\pm 20 \mu\epsilon$ correspondant à $\pm 1 \text{ MHz}$. Ces DP-BOTDRs pour "Double-Pulse B-OTDR", bien que prometteurs, restent malgré tout très limités en terme de portée puisque des mesures sur seulement quelques dizaines de mètres ont été réalisées. D'autres méthodes, utilisant des traitements numériques spécifiques, permettent de réduire à posteriori la résolution spatiale de mesure via l'analyse spectrale distribuée de la diffusion Brillouin [57, 58]. Cependant ce type de méthode, qui permet d'atteindre une résolution spatiale de l'ordre de 25 cm, élève drastiquement le niveau de bruit sur la mesure finale de température ou de déformation. Ainsi, à l'inverse des systèmes B-OTDAs et malgré certaines méthodes encourageantes, il n'existe aucune solution industrielle de mesure B-OTDR avec une résolution spatiale inférieure au mètre, souvent présenté comme un inconvénient majeur pour ce type d'interrogation.

Nous décrivons de manière détaillée le fonctionnement de l'interrogateur B-OTDR de la société FEBUS Optics dont le schéma optique présente quelques différences par rapport aux configurations de B-OTDR que l'on trouve généralement dans la littérature. Pour plus d'informations sur les systèmes B-OTDRs, BAI et al. [59] ont réalisé un état de l'art complet sur ce type de mesure de diffusion Brillouin.

II.A.5.c Avantages et inconvénients des deux technologies et limitations respectives

— Accès aux deux extrémités ou à une seule :

Le système B-OTDR présente l'avantage de ne nécessiter l'accès qu'à une seule extrémité de la fibre optique. Ceci est un réel atout dans le cas de l'instrumentation d'une infrastructure puisqu'il n'est pas rare que lors de la mise en œuvre du câble à fibre optique, celui-ci se casse du fait de trop fortes sollicitations. Dans le cas de l'utilisation d'un B-OTDA, il est alors impossible de réaliser la moindre mesure. A l'inverse, un B-OTDR pourra toujours effectuer une mesure de rétrodiffusion Brillouin et ce jusqu'au point de rupture de la fibre qui sera donc, par la même occasion, localisé précisément. Avec l'utilisation d'un commutateur optique relié aux deux extrémités de la fibre, il peut même être possible d'interroger la totalité de sa longueur malgré sa rupture.

— Résolution spatiale

Les interrogateurs Brillouin ont généralement une résolution spatiale limitée à 1 m et comme nous l'avons montré dans la partie II.A.2, cette limitation liée au temps de vie des phonons est fondamentale. Comme nous l'avons évoqué également, certains équipements B-OTDAs commercialisés permettent d'améliorer la résolution spatiale de mesure jusqu'à 0.1 m. Ces méthodes ne peuvent cependant pas être transposées dans le cas d'un fonctionnement en réflectométrie. Certains travaux d'amélioration de la résolution spatiale présentent des résultats intéressants mais à ce jour aucun n'ont aboutis au développement d'un interrogateur industriel. Cependant, dans le cadre de la surveillance de pipelines ou de puits, la résolution spatiale n'est pas un paramètre critique.

— Temps de mesure

Le temps de mesure des interrogateurs B-OTDAs était initialement plus court que celui des B-OTDRs. La mesure B-OTDA étant liée à la diffusion Brillouin stimulée, le rapport signal à bruit de la mesure est bien plus élevé que la mesure B-OTDR liée à la diffusion Brillouin spontanée. Ainsi pour obtenir des performances de mesure équivalentes entre les deux technologies, un temps de mesure bien plus important est nécessaire pour les interrogateurs B-OTDRs de manière à réaliser un grand nombre de moyennes d'acquisitions. Certains interrogateurs B-OTDRs, comme l'interrogateur de FEBUS Optics que nous présenterons par la suite, ont une méthode d'acquisition novatrice et différente de ce qui a été présenté jusque-là. En effet, ces derniers obtiennent le spectre de diffusion Brillouin directement par calcul numérique via des transformées de Fourier rapide en se basant sur le signal issu de la photodiode. Cette méthode permet donc d'acquérir le spectre de diffusion Brillouin bien plus rapidement qu'avec la méthode décrite en partie II.A.5.b où il est nécessaire de faire varier, fréquence par fréquence, un oscillateur RF. Ce traitement numérique était, jusqu'il y a quelques années, très coûteux en ressources informatiques et nécessitait donc un temps de calcul très conséquent (entre 30 et 60 min de mesure pour une longueur de fibre de l'ordre de 10 km). Cependant, les avancées actuelles dans le domaine de la puissance de calcul font qu'aujourd'hui, le calcul numérique

n'est plus une limitation pour le temps de mesure des interrogateurs B-OTDRs utilisant cette méthode. Ainsi ces derniers permettent de réaliser des mesures de rétrodiffusion Brillouin plus rapides que certains B-OTDAs, notamment des mesures dynamiques à 100 Hz sur 500 m de fibre ce qui était jusque-là réalisable seulement avec des configurations B-OTDA [46, 27].

La stratégie de FEBUS Optics est centrée sur le développement d'interrogateurs utilisant le signal rétrodiffusé Rayleigh ou Brillouin. Nous avons développé un interrogateur B-OTDR permettant des résolutions spatiales au-delà du mètre avec des temps d'acquisitions réduits. Le B-OTDR ne présente aujourd'hui aucun inconvénient par rapport au B-OTDA et il est plus à même de répondre aux spécifications requises pour la surveillance d'infrastructures telles que les puits et les pipelines du fait de son interrogations sur une seule extrémité de la fibre. Nous verrons également que ce type d'interrogateur présente une architecture pouvant s'adapter à des systèmes de régénération du signal optique pour allonger la portée de mesure des équipements (Chapitre III).

II.B Développement d'une nouvelle génération d'interrogateur B-OTDR

Nous avons démontré que le choix de la configuration B-OTDR pour des mesures de rétrodiffusion Brillouin dans un contexte industriel présente un réel avantage par rapport aux systèmes B-OTDAs. La société FEBUS Optics s'est donc orientée vers cette technologie pour ses solutions de surveillance d'infrastructure en température et déformation avec le système FEBUS G1-R. Les travaux de cette thèse se sont inscrits dans le développement et la caractérisation optique approfondie d'un interrogateur B-OTDR permettant d'atteindre des spécifications à l'état de l'art. Une évaluation des performances en laboratoire, ainsi qu'une validation par différents essais terrains ont également été réalisées. Une étude dans le cadre d'un projet CITEPH¹ sponsorisé par une société pétrolière, et nommé "Surveillance par fibre optique de pipelines enterrés dans le permafrost", a permis d'évaluer la capacité des systèmes B-OTDRs à surveiller l'intégrité d'un pipeline enterré dans un sol soumis à des déformations mécaniques. Finalement, ce travail a démontré l'importance de la mise en œuvre de l'instrumentation optique pour ce type de surveillance. Nous avons défini l'impact du type de câble et de son positionnement pour la surveillance de déformations de sol.

1. Le programme CITEPH pour "Concertation pour l'Innovation Technologique dans l'Exploration et la Production des Hydrocarbures" facilite l'accès à des financements privés de projets de recherche innovants en Exploration Production des Hydrocarbures. Il contribue à une vision partagée de l'évolution des technologies dans ce domaine industriel porteur et à un partage du risque financier de la R&D. Il aide les PME et sociétés innovantes dans la conduite de projets à finalité industrielle et favorise les relations entre porteurs de projets et sponsors.

II.B.1 Développement et caractérisation d'un système B-OTDR

II.B.1.a Description générale

L'interrogateur FEBUS G1-R présente une configuration optique spécifique permettant de détecter la fréquence Brillouin dans un intervalle de quelques MHz jusqu'à 1 GHz. Cette méthode permet, à l'inverse des systèmes standards présentés en Figure II.9, l'utilisation de systèmes d'acquisition électronique basses fréquences, notamment l'utilisation d'un photorécepteur équilibré à faible bruit et de convertisseurs analogique/numérique basses fréquences [60]. Ce point réduit considérablement les coûts de production de l'interrogateur et améliore sa fiabilité. Ces deux paramètres étant critiques pour la production d'un appareil industriel. Le schéma optique de l'interrogateur est défini en Figure II.10.

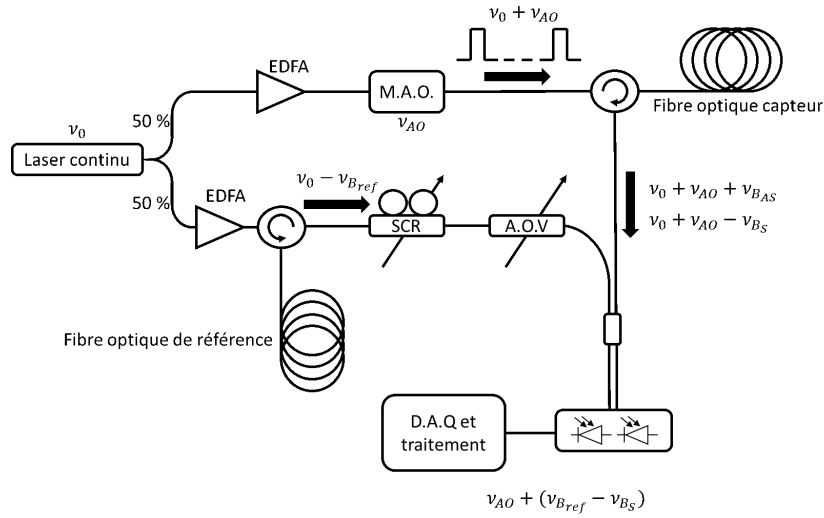


FIGURE II.10 – Schéma opto-électronique détaillé de l'interrogateur B-OTDR nommé FEBUS G1-R.

La configuration optique du B-OTDR repose sur un schéma optique de détection hétérodyne classique avec un oscillateur local permettant l'analyse de signaux optiques de très faible amplitude. En effet cette architecture permet d'accroître le niveau du signal détecté par battement avec une source de forte puissance. Le signal ainsi collecté devient :

$$S(t, \nu) = 2\sqrt{A_{OL}^2 \cdot A_{sig}^2} \cdot \cos[2\pi \cdot t(\nu_{batt})] \quad (II.23)$$

où A_{OL} est l'amplitude du signal provenant de l'oscillateur local, A_{sig} l'amplitude du signal provenant du bras signal et ν_{batt} la fréquence de battement entre les deux signaux.

Dans la configuration optique présentée en Figure II.10, un laser continu de fréquence ν_0 et de largeur spectrale inférieure à la largeur du pic de rétrodiffusion Brillouin spontanée théorique (≈ 30 MHz) est injecté dans un coupleur 1x2 avec un ratio de 50 % pour l'oscillateur local et 50 % le bras de signal.

- L'oscillateur local est composé d'une fibre de référence dont l'objectif est la réduction de la bande passante de détection. En effet, le signal lumineux continu issu du coupleur est injecté après amplification dans la fibre et ce signal, d'une puissance supérieure à la puissance seuil Brillouin, permet la

rétrodiffusion de la composante Brillouin Stokes décalée de la fréquence ν_{Bref} en raison du régime stimulé établi. Le signal rétrodiffusé provenant de la fibre de référence et de fréquence $\nu_0 - \nu_{Bref}$ est renvoyé dans le schéma optique par le biais d'un circulateur optique. Un brouilleur de polarisation permet ensuite de modifier de manière pseudo aléatoire la polarisation du signal de rétrodiffusion Brillouin, provenant de la fibre de référence, qui est un processus partiellement polarisé [31]. Grâce au moyennage des acquisitions, cette solution permet d'éliminer la sensibilité à la polarisation de la mesure [61]. Le signal optique issu du brouilleur de polarisation est ensuite atténué pour éviter la saturation de la photodiode.

- De l'autre côté, la sortie 50 % du coupleur 1x2 connecté au laser continu est appelée bras signal puisque reliée à la fibre capteur. Le signal est amplifié par un système EDFA puis découpé en impulsions au moyen d'un modulateur acousto-optique. Les impulsions sont ensuite envoyées dans la fibre capteur et génèrent de la rétrodiffusion Brillouin spontanée permettant la mesure de température et de déformation voulue. Un circulateur optique permet de collecter le signal rétrodiffusé qui est ensuite mélangé avec le signal de l'oscillateur local, au moyen d'un coupleur 2x2 50/50, pour créer le battement optique qui sera ensuite mesuré par le système d'acquisition de l'appareil.
- Le coupleur 2x2 est ensuite connecté à un photodétecteur équilibré dont l'intérêt est de réduire le bruit d'intensité de l'oscillateur local ainsi que de supprimer la composante continue du signal électrique de sortie [27]. Ce type de détecteur permet également de s'affranchir des pertes intrinsèques de 3 dB. Le photodétecteur possède une bande passante d'environ 1 GHz de manière à ne collecter que le battement de fréquence $\nu_{AO} + (\nu_{Bref} - \nu_{Bs})$, où ν_{AO} est la fréquence du modulateur acousto-optique (200 MHz) et ν_{Bs} est la fréquence de la rétrodiffusion Brillouin spontanée Stokes. Le choix d'une bande passante allant jusqu'à 1 GHz permet de détecter un large choix de signaux de diffusion Brillouin en fonction des types de fibres utilisées et de leur fréquence de diffusion Brillouin ν_{Bs} . Par ailleurs, cette configuration ne permet pas de mesurer la rétrodiffusion Brillouin anti-Stokes puisque le battement de celle-ci avec l'oscillateur local est à la fréquence $\nu_{AO} + (\nu_{Bref} + \nu_{Bs})$. Cette fréquence, proche de 22 GHz, est largement en dehors de la bande passante d'acquisition de 1 GHz du photodétecteur. Ainsi l'utilisation de la fibre de référence permet que le battement optique entre l'oscillateur local et le bras signal soit contenu dans une plage fréquentielle plus restreinte que dans la configuration présentée en Figure II.9. Pour cela, la fibre de référence utilisée est choisie de telle manière à ce que la différence $(\nu_{Bref} - \nu_{Bs})$ soit comprise entre 0 et 800 MHz.

II.B.1.b Génération des impulsions optiques

L'interrogateur B-OTDR nécessite de générer des impulsions optiques pour sonder la fibre à mesurer. Les impulsions optiques sont réalisées au moyen d'un modulateur acousto-optique qui présente l'avantage de découper le signal optique en impulsions mais également de décaler en fréquence le signal optique de manière à réaliser la détection hétérodyne. Bien que le temps de montée des

modulateurs acousto-optiques soit plus long que celui de modulateurs électro-optiques, ils restent tout à fait convenables pour notre application car la durée des impulsions créées ne sera jamais inférieure à 10 ns en raison de la résolution spatiale minimale atteignable par les B-OTDRs. De plus, un modulateur acousto-optique permet d'atteindre des taux d'extinction supérieurs à 50 dB.

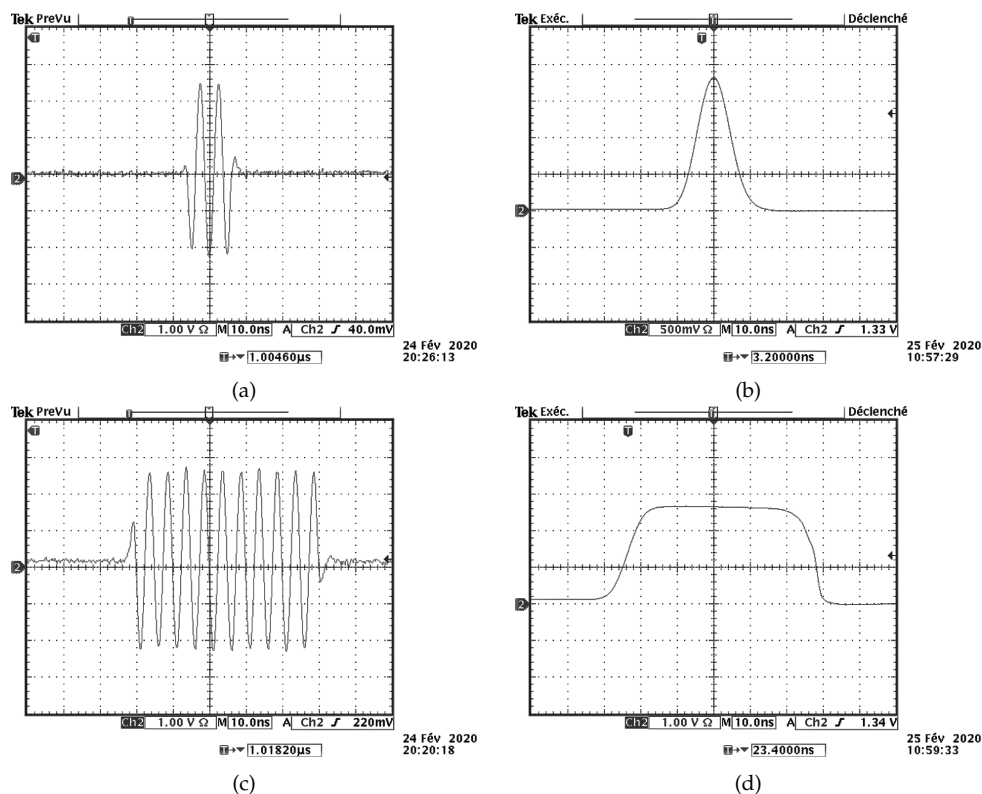


FIGURE II.11 – Impulsions électriques et optiques générées par le B-OTDR. En (a) et (c) les impulsions électriques respectivement de 20 et 50 ns. En (b) et (d) les impulsions optiques respectivement de 20 et 50 ns.

La Figure II.11, montre la limite du modulateur acousto-optique 200 MHz dont le temps de montée a une influence sur la forme et la taille de l'impulsion optique. Ainsi la figure en (a) montre une impulsion électrique envoyée dans le modulateur acousto-optique, d'une durée de 20 ns et modulée à 200 MHz. Le signal optique correspondant est représenté en (b) et possède une forme que l'on peut assimiler à une gaussienne de largeur 20 ns. Cette forme, liée à la durée de l'impulsion optique qui est courte par rapport au temps de montée du modulateur, ne se retrouve pas sur les graphiques (c) et (d) correspondant à des durées d'impulsion de 50 ns. Dans ce cas, la forme de l'impulsion optique est différente avec un palier où l'impulsion reste stable pendant 40 ns. Ce point sera à l'origine de certaines limitations de l'interrogateur que nous détaillerons en partie III.A de ce manuscrit. Le modulateur acousto-optique utilisé dans le schéma du B-OTDR présente un décalage en fréquence de 200 MHz qui présente un réel intérêt notamment pour la réduction du bruit électrique en $1/f$ présent sur les systèmes d'acquisition du signal. En effet, la majorité des signaux détectés seront autour de la fréquence $\nu_{AO} + (\nu_{Bref} - \nu_{Bs}) > 200 \text{ MHz}$.

II.B.1.c Fibre optique de référence

La fibre optique de référence incluse dans l'oscillateur local du schéma optique permet de ramener la mesure à des basses fréquences, proche de 200 MHz. Généralement dans les configurations classiques de B-OTDR en montage hétérodyne, cela se fait électriquement au moyen d'une source RF ou bien optiquement avec un second laser décalé d'environ 11 GHz de celui générant les impulsions (il peut s'agir dans ce cas d'une source laser ou d'un laser Brillouin [62, 63]). L'utilisation d'une fibre de référence est une méthode passive permettant de réduire l'utilisation d'équipements RF haute fréquence ou l'utilisation de sources laser coûteuses. L'oscillateur local doit être suffisamment puissant, de manière à ce que le signal de battement soit correctement détecté au niveau du photodétecteur (équation II.23). La Figure II.12 montre l'évolution du spectre optique de rétrodiffusion dans une fibre de référence soumis à un signal lumineux continu en fonction de la puissance injectée. Cette figure a été établie avec un analyseur de spectre optique OSA-APEX de résolution 0,16 pm. La fibre de référence utilisée est une fibre SMF28-ULL de la société Corning. Cette fibre est d'une longueur de 10 km, présentant un décalage Brillouin de 10,975 GHz à 1550 nm qui est particulièrement élevé par rapport aux décalages Brillouin des fibres standards monomodes les plus courantes dans l'industrie ($\approx 10,815$ GHz à 1550 nm). Cette différence s'explique notamment par les différents niveaux de dopages des fibres qui modifient la fréquence de diffusion Brillouin [30]. Ainsi le choix de cette fibre SMF28-ULL permet de réaliser une mesure sur un large choix de fibres optiques dont la fréquence Brillouin permet de satisfaire la condition suivante sur la fréquence du battement optique : $\nu_{Bref} - \nu_{Bs} < 1GHz$.

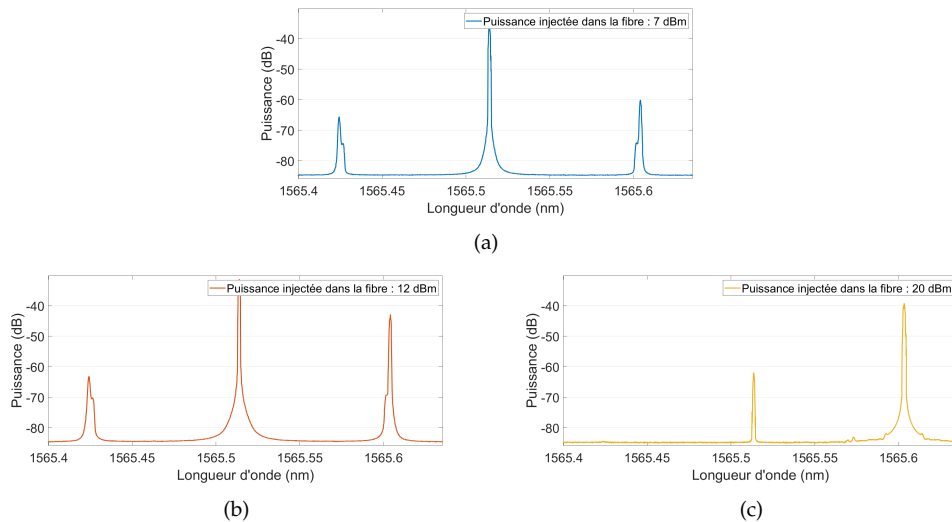


FIGURE II.12 – Spectre optique du signal rétrodiffusé dans la fibre de référence mesuré avec un analyseur de spectre optique. En (a) pour une puissance injectée dans la fibre de 7dBm, en (b) pour 15 dBm, en (c) pour 20 dBm.

Nous observons l'évolution du spectre Brillouin en mode spontané jusqu'au seuil stimulé (< 7 dBm) puis le mode stimulé (> 7 dBm). Pour une puissance injectée de 7 dBm, nous sommes encore dans un régime quasi spontané avec des amplitudes Stokes et anti-Stokes sensiblement équivalentes et une rétrodiffusion Rayleigh de 30 dB supérieure au Brillouin anti-Stokes spontané. Passé le seuil Brillouin qui, dans notre cas et suivant l'évolution de la puissance seuil Brillouin

déterminée en II.A.2, se trouve aux alentours de 5 mW soit environ 7 dBm, la composante Stokes Brillouin va petit à petit prendre de l'ampleur grâce au processus spontané amplifié qui se met en place. Pour une puissance injectée de 20 dBm, on observe uniquement le régime stimulé dans la fibre de référence avec une augmentation de la composante Stokes stimulée de + 20 dB par rapport à la composante Stokes spontanée tandis que la composante anti-Stokes a elle complètement disparu. La rétrodiffusion Rayleigh dans la fibre de référence est réduite quant à elle de - 25 dB. Ainsi cette puissance de 20 dBm permet de créer dans la fibre de référence un régime de rétrodiffusion avec une seule composante spectrale majoritaire à la fréquence $\nu_0 - \nu_{Bref}$ et avec un fort niveau de signal. Ce signal est de ce fait favorable pour être utilisé comme oscillateur local pour la détection hétérodyne.

Le phénomène de rétrodiffusion Brillouin présente un bruit basse fréquence, initié par l'ASE correspondant à l'émission spontanée Brillouin amplifiée, et générant une fluctuation de puissance que l'on appelle plus communément RIN pour "Relative Intensity Noise" [64, 65, 66, 38]. Dans le cas d'une détection hétérodyne comme celle de notre interrogateur, ce bruit optique s'observe sur le photo-courant qui augmente avec le niveau de la puissance de diffusion Brillouin généré dans la fibre de référence comme on le voit sur la Figure II.13. Le montage optique permettant d'obtenir les résultats présentés est constitué d'un laser continu connecté à un système d'amplification EDFA dont nous pouvons faire varier la puissance. Le signal lumineux continu est connecté à 10 km de fibre SMF28-ULL via un circulateur optique. Le signal de rétrodiffusion Brillouin de la fibre est ensuite injecté, via le circulateur, au niveau d'un photodétecteur avec une bande passante allant du DC jusqu'à 125 MHz. Cette photodiode a pour objectif de récupérer le signal optique continu issu de la rétrodiffusion présente dans la fibre de référence. Ainsi nous observons que plus la puissance optique injectée dans la fibre est importante, plus le bruit lié au RIN du Brillouin stimulé augmente de manière importante. Un accroissement du bruit supérieur à 50 dB sur la plage 0-25 MHz est observé dans le cas d'une puissance injectée de 20 dBm.

Ce bruit de mesure présent sur l'oscillateur local peut donc être limité par l'utilisation d'un photodétecteur équilibré permettant de réduire ce bruit de fluctuation [67]. L'ajout d'un filtre électrique passe-haut coupant à 100 MHz permet de réduire encore plus ce bruit sans toutefois perturber la mesure B-OTDR de notre système. La bande passante de détection de celui-ci se situe alors entre 200 MHz (fréquence de décalage du modulateur acousto-optique) et 1 GHz (fréquence maximale de bande passante du photodétecteur). Nous estimons ainsi limiter au maximum la perturbation liée à ce phénomène.

II.B.1.d Traitement numérique pour une mesure répartie de température ou de déformation

Nous allons maintenant détailler le traitement numérique permettant, à partir du signal optique détecté par la photodiode, d'obtenir un spectre de rétrodiffusion Brillouin aboutissant à une mesure distribuée de température ou de déformation. La méthode définie ici diffère des autres techniques utilisées initialement avec les interrogateurs B-OTDRs et décrites en partie II.A.5.b. Pour rappel, les systèmes B-OTDRs précédemment mis au point utilisent une détection optique à des fréquences de l'ordre de 11 GHz puis un transfert de fréquence au moyen d'un synthétiseur RF permettant la détection de la densité spectrale de puissance

II.B. Développement d'une nouvelle génération d'interrogateur B-OTDR

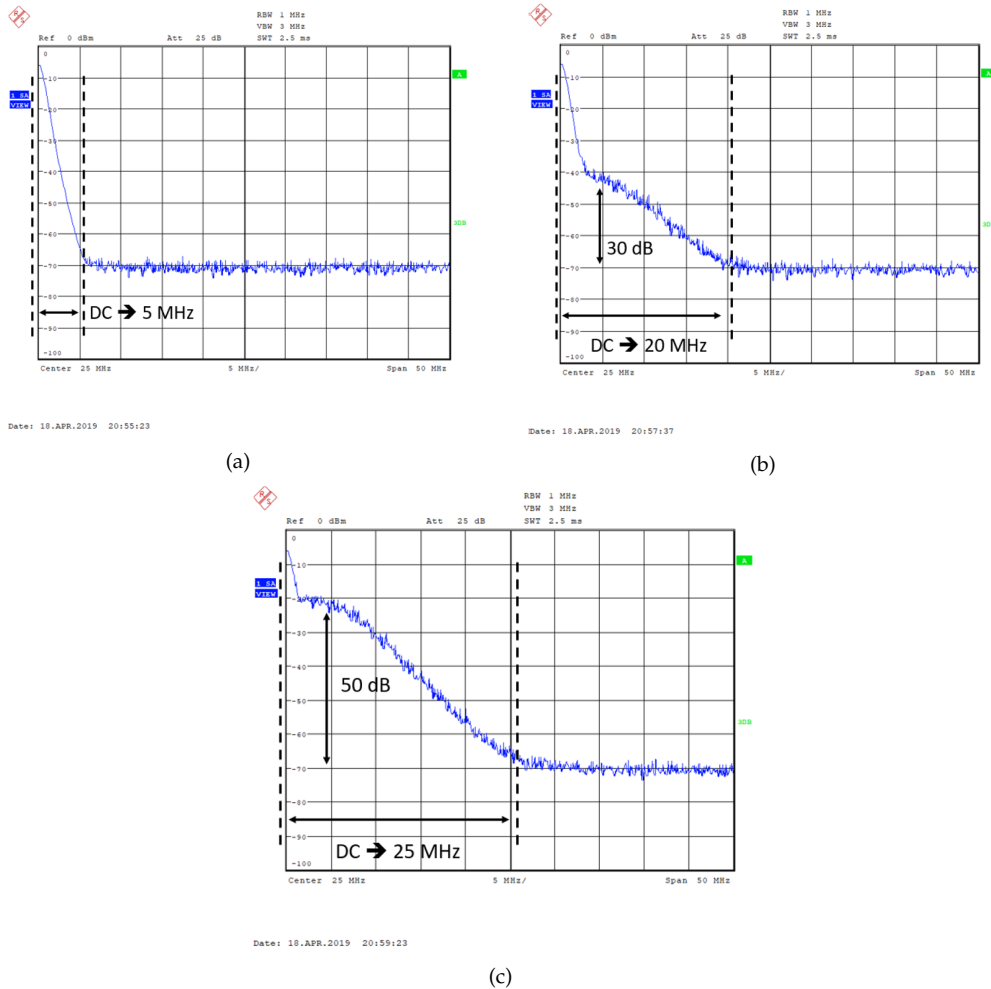
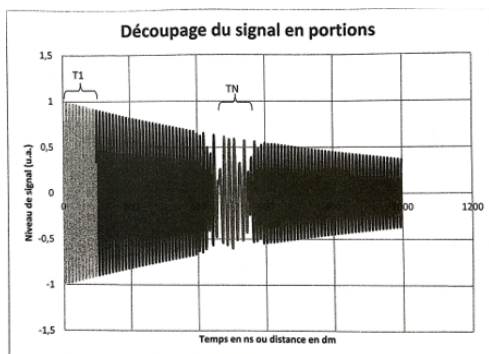


FIGURE II.13 – Spectres électriques du signal rétrodiffusé dans la fibre de référence mesurés par un photodétecteur pour différentes puissances optiques injectées dans la fibre de référence. En (A) pour 7dBm, en (B) pour 15 dBm, en (C) pour 20 dBm.

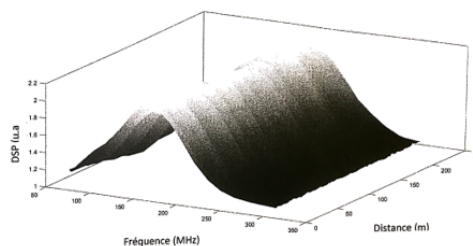
Brillouin. La forme lorentzienne du spectre Brillouin est reconstituée en faisant varier la fréquence du synthétiseur RF. L'approche utilisée dans notre cas est tout autre et s'appuie grandement sur l'utilisation de traitement numérique, notamment d'un algorithme de transformée de Fourier rapide ou FFT.

Les différentes étapes du traitement numérique des données, représentées en Figure II.14, sont :

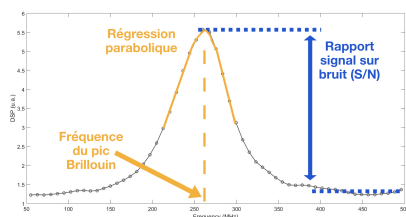
- numérisation du signal optique temporel de diffusion Brillouin ;
- reconstitution de la densité spectrale de puissance par un algorithme de FFT et moyennage des spectres optiques ;
- construction du graphique de la variation de la fréquence Brillouin en fonction de la distance ;
- déduction des variations de température ou de déformation en fonction de la distance.



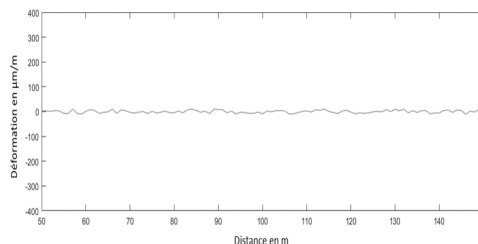
(a) Signal de la photodiode numérisé et découpage de celui-ci.



(b) Mesure de la densité spectrale de la diffusion Brillouin en chaque point de la fibre grâce à l'algorithme de FFT.



(c) Courbe de régression sur le signal à mi-hauteur du spectre Brillouin. La fréquence du pic Brillouin peut donc être déterminée ainsi que le rapport signal à bruit de la mesure.



(d) Fréquence Brillouin déterminée en chaque point z à l'issue du fit polynomial sur le spectre.

FIGURE II.14 – Étapes du traitement numérique réalisé par l'interrogateur FEBUS G1-R [68].

Dans le détail ces étapes sont :

- (a). La première étape consiste en la numérisation du signal correspondant au battement détecté par la photodiode entre le signal rétrodiffusé de la fibre test et le signal issu de l'oscillateur local. Ce signal est numérisé à une fréquence d'échantillonnage de 2 GHz, soit supérieure à 2 fois la fréquence maximale du signal électrique à détecter (lié à la photodiode de bande passante de 1 GHz), et ceci afin de respecter le critère de Shannon. Il s'agit ensuite de découper ce signal temporel en une pluralité de tronçons, correspondant à différentes portions de fibre, par application d'une fenêtre temporelle glissante de type fenêtre de Hamming. Chaque tronçon présente une largeur égale au double de la largeur temporelle de la résolution spatiale choisie². La largeur de chaque tronçon est centrée autour d'un instant du signal qui correspond à un point spatial précis de la fibre. Ainsi chaque tronçon correspond à un point de mesure sur la fibre, et le nombre de tronçons correspond à la longueur de fibre divisée par la résolution d'échantillonnage spatial.
- (b). Un algorithme de transformée de Fourier rapide FFT est ensuite utilisé sur chaque tronçon et permet de calculer le spectre fréquentiel du signal. La taille de la FFT est de 1024 points pour une fréquence d'échantillonnage de

2. Dans une mesure en réflectométrie, il faut prendre en compte le temps de propagation aller-retour du signal lumineux. Si l'on souhaite une résolution de mesure de 1 m, alors l'impulsion optique envoyée dans la fibre sera d'une durée de 10 ns mais le signal de rétrodiffusion à analyser, et correspondant à cette résolution, sera quant à lui d'une durée du double de l'impulsion, soit 20 ns.

2 GHz, ce qui permet d'obtenir un spectre fréquentiel avec une résolution de 2 MHz. On obtient alors la densité spectrale de puissance locale mesurée par l'interrogateur. Le signal de diffusion Brillouin étant très faible, il est nécessaire de réaliser un grand nombre d'acquisitions par point de mesure de manière à pouvoir moyenner chaque spectre obtenu à une distance donnée de la fibre à tester. Cela dans le but d'augmenter au maximum le rapport signal sur bruit de la mesure qui évolue, comme l'ont démontré SOTO et THÉVENAZ [69] dans le cas d'un bruit additif gaussien, suivant une loi en $1/\sqrt{n}$ où n est le nombre de moyennes réalisées sur la mesure du spectre. Le moyennage s'effectue dans le domaine fréquentiel et non temporel car aucune relation de phase n'existe entre les signaux de diffusion Brillouin liés à deux impulsions optiques successives. On obtient alors une cartographie des spectres résolue en fréquence et en distance sur laquelle il est possible d'évaluer la fréquence de diffusion Brillouin de manière suffisamment précise. Pour diminuer le temps de mesure, ce traitement numérique est avantageusement réalisé par un processeur graphique de type GPU (Graphical Processing Unit) car cet algorithme est hautement parallélisable, le même calcul étant réalisé de nombreuses fois sur des portions différentes du signal.

- (c). Il est ensuite possible de reconstruire un graphe de la variation de fréquence mesurée en fonction de la distance de la fibre. Pour cela, on utilise une méthode de régression parabolique réalisée sur le spectre en fréquence, de manière à obtenir la position précise du pic de diffusion Brillouin. Nous avons vu en partie II.A.3 que le spectre de diffusion Brillouin présente une forme lorentzienne et il peut donc paraître pertinent de réaliser la régression avec une fonction de ce type comme le proposent MAUGHAN, KEE et NEWSON [70]. Ce type de régression est très fortement lié au choix du paramètre initial et l'utilisation d'un algorithme non-linéaire de Levenberg-Marquart permet de faciliter la convergence des résultats [71]. Cependant ce traitement, est très coûteux en temps de calcul (plusieurs centaines de millisecondes) et bien que certaines optimisations aient été réalisées pour le diminuer, celui-ci reste malgré tout de l'ordre de la milliseconde [72, 73]. La régression parabolique, beaucoup moins coûteuse en ressources informatiques, a permis d'obtenir des résultats fiables et moins sensibles à d'éventuelles modifications de la forme du pic Brillouin qui peuvent être liées à des déformations sur des longueurs inférieures à la résolution spatiale [74, 69]. Le traitement de notre interrogateur B-OTDR repose donc sur ce type de régression permettant d'obtenir une combinaison de la vitesse de calcul et des performances à l'état de l'art comme nous le verrons en partie II.B.2. Le traitement réalise d'abord une première approximation sur le spectre calculé de manière à obtenir le point maximal de celui-ci et donner les conditions initiales à l'algorithme de régression. Il est ensuite possible de réaliser la régression à partir du maxima et sur 16 points répartis équitablement de part et d'autre du point de départ. Avec un point tous les 2 MHz sur le spectre fréquentiel, la régression se fait donc sur une largeur de 32 MHz qui est approximativement la largeur à mi-hauteur du pic de diffusion Brillouin, ce qui permet d'optimiser au mieux le calcul de la fréquence de diffusion Brillouin [75]. Dans ce cas, il a été établi que l'incertitude $\sigma_v(z)$ en tout point de la fibre, dans l'hypothèse d'une régression parabolique, est définie suivant l'équation suivante [69] :

$$\sigma_v(z) = \frac{1}{SNR(z)} \sqrt{\frac{3}{4} \delta \Delta \nu_B} \quad (\text{II.24})$$

où $SNR(z)$ est le rapport signal sur bruit du spectre en un point de la fibre, δ la résolution fréquentiel du spectre de gain et $\Delta \nu_B$ la largeur à mi-hauteur du spectre de gain Brillouin. Une expression plus générale a été proposée pour une bande spectrale d'analyse quelconque [69]. L'évaluation du SNR se fait en évaluant l'intensité de signal du pic Brillouin que l'on compare avec la moyenne du bruit mesurée sur une plage de fréquence où le spectre Brillouin n'est pas présent et sur une largeur de 50 MHz. Cette équation, telle qu'elle est écrite, n'est valide que si la régression parabolique s'applique sur les points compris dans la largeur à mi-hauteur du pic Brillouin. En prenant par exemple en compte un rapport signal sur bruit de 10 dB, une résolution fréquentielle de 2 MHz et une largeur à mi-hauteur du pic Brillouin et de la fenêtre de régression de 32 MHz, nous pouvons ainsi estimer l'incertitude de la mesure à une fois l'écart-type est d'environ 0,7 MHz en sortie de l'interrogateur, qui correspond à 0,7 °C ou 14 $\mu\epsilon$. La résolution spatiale utilisée ayant un impact sur la largeur à mi-hauteur du pic Brillouin, il convient donc de corriger ce résultat si les paramètres de mesure varient. De même, ces résultats sont pour un rapport signal sur bruit de 10 dB mais peuvent être bien meilleurs lorsque l'on augmente la puissance de l'impulsion de l'interrogateur ou son temps de mesure en augmentant le nombre de moyennes.

- (d). Il suffit ensuite d'appliquer les coefficients de sensibilité à la température ou à la déformation $C_{v_{B\epsilon}}$ et $C_{v_{BT}}$ que nous avons présentés dans la partie II.A. Cela dans le but d'obtenir le graphe de mesure répartie en température ou déformations.

II.B.1.e Réalisation d'une mesure distribuée de rétrodiffusion Brillouin

Nous allons maintenant présenter les résultats de la mesure de diffusion Brillouin réalisée par l'interrogateur. Ces résultats se présentent sous deux formes :

- une cartographie qui correspond à la mesure du spectre de gain Brillouin de l'onde Stokes en tout point de la fibre. Cette cartographie est le résultat de la transformée de Fourier du signal temporel de la photodiode en fonction de la distance ;
- une mesure distribuée de la fréquence de diffusion Brillouin de la fibre qui correspond au résultat de la régression parabolique moyennée en chaque point de la fibre.

La Figure II.15 montre une cartographie de rétrodiffusion typique de l'interrogateur B-OTDR sur une ligne optique de 30 km. La fibre de référence utilisée pour cette mesure est une fibre Corning SMF28-ULL de fréquence Brillouin d'environ 10,975 GHz et la fibre testée est une fibre Corning SMF28e de fréquence Brillouin d'environ 10,820 GHz.

Cette figure représente une mesure du spectre optique brut issue de l'interrogateur. L'axe des abscisses représente la distance en mètre, l'axe des ordonnées la fréquence d'acquisition du signal et l'échelle de couleur représente l'intensité du

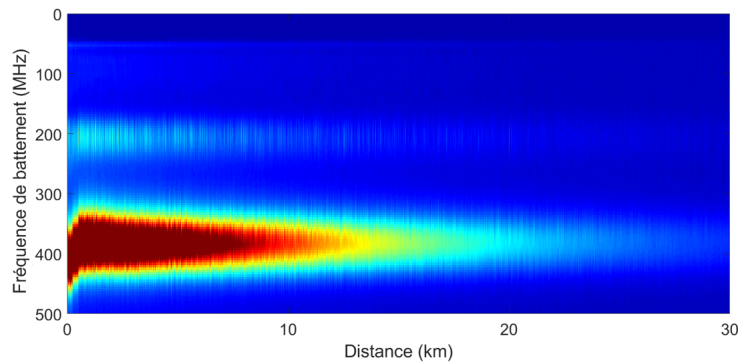


FIGURE II.15 – Exemple d’une cartographie de rétrodiffusion mesurée par l’interrogateur B-OTDR.

signal optique. Le spectre de diffusion Brillouin est caractérisé par un signal fort à une fréquence d’acquisition $\nu_{AO} + (\nu_{Bref} - \nu_{Bs})$ (ici autour de 400 MHz). A une distance proche de l’interrogateur, on constate une variation de la fréquence de diffusion Brillouin qui s’explique par l’enroulement de la fibre sur la bobine. En effet, sur une bobine de fibre enroulée industriellement, les première centaines de mètres de fibres sont peu contraintes puis la déformation augmente petit à petit avec la longueur de fibre et atteint ensuite une valeur constante qui se traduit par un spectre Brillouin qui varie très peu en fréquence. On constate également une diminution progressive de l’intensité du signal qui correspond aux pertes linéaires présentes dans la fibre de l’ordre de 0,2 dB/km. On observe ainsi un rapport signal sur bruit variant de 10 à 4 dB entre le début et la fin de la fibre, ce qui permet à la régression parabolique de s’effectuer correctement [74].

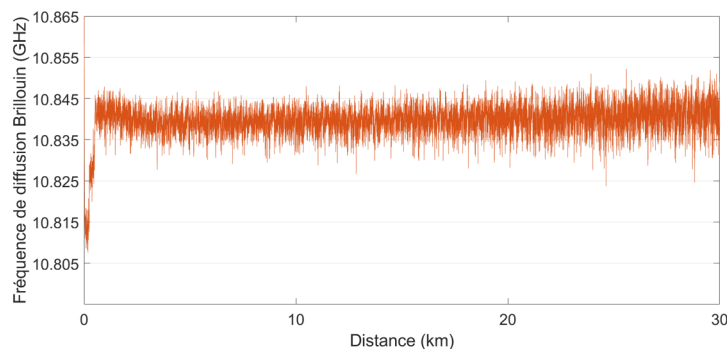


FIGURE II.16 – Mesure distribuée de la fréquence de diffusion Brillouin réalisée par le B-OTDR.

La Figure II.16 représente le résultat de la régression parabolique, effectuée sur la cartographie, qui permet d’accéder à la fréquence du pic de diffusion Brillouin de la fibre. On observe l’incertitude de mesure qui augmente petit à petit avec la distance, liée aux pertes linéaires dans la fibre qui réduisent le rapport signal sur bruit de la mesure. La fréquence Brillouin ici mesurée est en moyenne de l’ordre de 10,840 GHz, liée à des contraintes créées lors de l’enroulement de la fibre sur la bobine.

Enfin, la cartographie de la Figure II.15 montre un bruit résiduel aux alentours de la fréquence d’acquisition 200 MHz sur toute la longueur de la ligne, quelque soit le type de fibre. Cette fréquence correspond à la fréquence de décalage du

modulateur acousto-optique ν_{AO} et le signal observé est en fait issu de la détection de la rétrodiffusion Rayleigh. En effet, si l'on reprend le schéma optique de l'interrogateur ainsi que l'étude spectrale réalisée sur la fibre de référence, nous constatons que dans le spectre de rétrodiffusion de la fibre de référence, une faible fraction de diffusion Rayleigh est également présente. Nous pouvons compléter le schéma optique déjà présenté par la Figure II.17 avec, en bleu, les valeurs de fréquences Brillouin disponibles à chaque endroit du montage ainsi qu'en vert la valeur de la fréquence de rétrodiffusion Rayleigh.

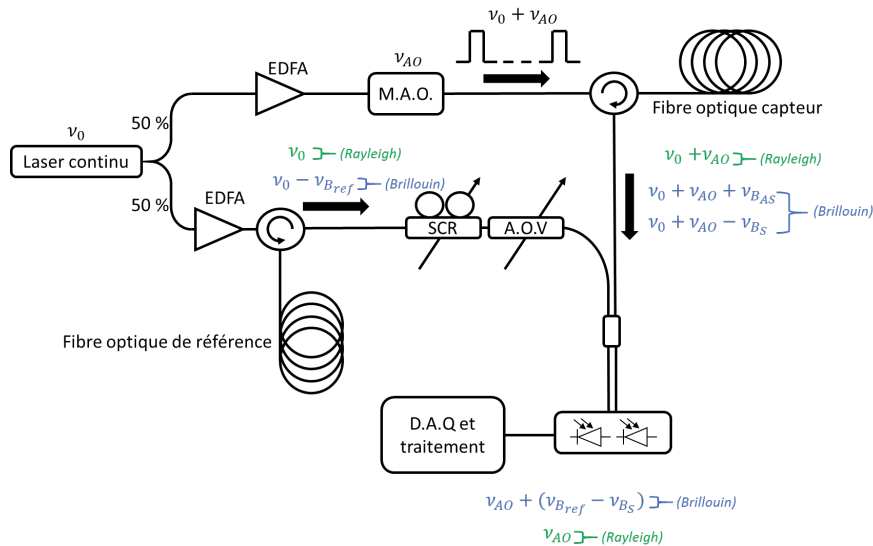


FIGURE II.17 – Schéma optique détaillé de l'interrogateur FEBUS G1-R.

Ainsi, la rétrodiffusion Rayleigh présente dans la fibre de référence est mesurée lors de l'acquisition et apparaît sur le spectre optique, détecté à la fréquence ν_{AO} . Il s'avère donc nécessaire d'injecter suffisamment de puissance optique dans la fibre de référence au-delà du seuil Brillouin de manière à limiter au maximum la rétrodiffusion Rayleigh dans celle-ci. Nous montrerons néanmoins dans la suite de ce manuscrit que la sensibilité à la rétrodiffusion Rayleigh de ce schéma optique peut être un atout pour réaliser une mesure de diffusion Brillouin sensible de manière indépendante à la température et à la déformation.

II.B.2 Performances du système obtenues

Dans le cadre d'une instrumentation de structure, l'objectif d'un interrogateur B-OTDR est de fournir, à partir d'un spectre de diffusion Brillouin, une mesure de température ou de déformation aussi précise et répétable que possible. Nous allons présenter dans cette partie la procédure de qualification d'un équipement de mesure distribuée B-OTDR qui suit le standard international IEC 61757-2-2. Cette norme définit les procédures permettant notamment l'évaluation de la répétabilité de mesure, la précision de mesure ou encore la qualification de la résolution spatiale. Nous présenterons uniquement l'évaluation de la répétabilité de mesure et invitons le lecteur à se référer au document MSP-01 d'où est issu cette norme pour plus d'informations [76].

Deux types de répétabilités peuvent être évaluées lorsque l'on qualifie un interrogateur à fibre optique [77] :

- **la répétabilité dans le domaine temporel** : Il s'agit de la répétabilité classique que l'on peut comparer à tout capteur ponctuel. On évalue dans ce cas, pour chaque point spatial de la fibre, l'écart-type de plusieurs mesures consécutives réalisées dans des conditions expérimentales identiques ;
- **la répétabilité dans le domaine spatial** : Ce type de répétabilité est spécifique à l'aspect distribué de la mesure par fibre optique. Dans ce cas, on analyse l'écart-type de la mesure sur plusieurs points spatiaux de la fibre à un instant précis. Pour ce type d'évaluation, on s'assure que chaque point spatial de la fibre est soumis aux mêmes conditions environnementales durant la mesure.

Dans le cas d'interrogateurs Raman, il est pertinent d'évaluer ces deux paramètres lorsque l'on qualifie de manière métrologique le système [78]. En effet, la mesure Raman qui est uniquement sensible à la température peut être assimilée à une multitude de sondes de température disposées en série le long de la fibre. Il est important de connaître la capacité de l'interrogateur à interpréter correctement une séquence de plusieurs températures réparties dans l'espace. Mais également d'évaluer dans le temps la répétabilité de cette mesure.

Cependant, l'évaluation de la répétabilité spatiale est à réaliser avec précaution surtout lorsque l'on souhaite déterminer les performances d'un interrogateur B-OTDR dont la mesure est dépendante à la fois à la température et à la déformation. En effet, ce type d'interrogateur mesure la fréquence de diffusion Brillouin qui dépend de nombreux paramètres physiques (température, déformation, indice optique, propriétés du matériau de la silice influant sur le gain Brillouin,...) et qui n'est donc absolument pas identique tout le long d'une même fibre optique pourtant placée dans des conditions environnementales stables [79, 80, 81].

Avec ces considérations, il nous paraît pertinent de n'évaluer que la répétabilité temporelle lorsque l'on souhaite caractériser nos interrogateurs B-OTDRs. Cela se confirme par l'utilisation de ce type de système pour de l'instrumentation de structure. En effet, dans ce contexte, il est rarement réalisé des mesures absolues de température ou de déformation puisque ces mesures donnent des résultats qui dépendent en partie de la manière dont a été installée la fibre optique, créant plus ou moins de contraintes sur celle-ci. Il est donc seulement réalisé des mesures relatives par rapport à une mesure de référence qui correspond généralement au moment où l'instrumentation a été mise en service sur la structure. Dans ce cas, la surveillance se fait en comparant, dans le temps, l'évolution de la mesure réalisée sur chaque point spatial de la fibre et la répétabilité temporelle devient donc le paramètre métrologique le plus important.

II.B.2.a Validation de la répétabilité de la mesure en température

La validation de la répétabilité de mesure de l'interrogateur B-OTDR consiste donc à vérifier que, dans des conditions identiques, le système donne les mêmes valeurs de température et/ou de déformation pour des mesures successives. Le banc de mesure présenté en Figure II.18 consiste en l'équipement à qualifier, connecté à une longueur de fibre z permettant d'évaluer la répétabilité de mesure sur toute cette distance de fibre. La fibre est placée dans une enceinte climatique permettant de maintenir une température constante durant un certain laps de temps. C'est sur cette bobine que se fera l'évaluation des performances de l'interrogateur. Celle-ci est placée dans un bac d'eau de manière à avoir une température homogène sur toute sa longueur. Elle est totalement décontrainte, enroulée

sur elle-même de manière à s'affranchir de toutes déformations qui pourraient être liées à de la dilatation thermique. Le bac d'eau peut également servir de tampon dans le cas d'une variation de la température de l'étuve liée à son asservissement.

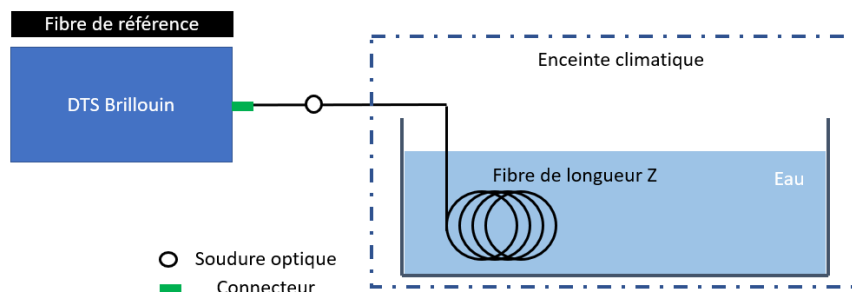


FIGURE II.18 – Schéma du banc d'essai pour la réalisation de mesures de répétabilité en température.

Le protocole consiste à répéter 20 fois consécutivement la mesure sur la fibre placée dans l'étuve³. Puis l'écart-type sur ces 20 mesures consécutives est calculé en chaque point spatial de la fibre. Deux termes métrologiques dépendent de cet écart-type :

- **La mobilité de mesure**⁴ : Elle correspond à une valeur sensiblement égale à l'écart-type σ défini plus haut [80, 81]. Ce paramètre est souvent utilisé dans la littérature lorsque l'on souhaite évaluer les performances d'un nouvel interrogateur. Cependant, nous allons montrer que nous sommes dans le cadre d'une loi gaussienne et ainsi, seulement 68 % des mesures sont comprises dans l'intervalle égal à l'écart-type. Pour une qualification d'équipements industriels, nous préférons parler de répétabilité de mesure qui correspond à un intervalle égal à deux fois l'écart-type.
- **La répétabilité de mesure** : La répétabilité de mesure correspond à une valeur sensiblement égale à deux fois l'écart-type σ . La Figure II.19 nous montre que nous sommes bien dans le cadre d'une loi gaussienne. Ainsi, en évaluant la répétabilité de mesure, nous pouvons affirmer que 95 % des mesures réalisées par l'interrogateur se trouve dans cette intervalle de répétabilité. Nous parlerons donc uniquement de répétabilité de mesure dans tout le manuscrit de cette thèse.

La Figure II.20 représente les résultats de l'évaluation en répétabilité de l'interrogateur où chaque point de mesure correspond à deux fois l'écart-type sur 20 mesures consécutives. Ce graphique montre un exemple de mesure de répétabilité réalisée sur une longueur de fibre de 50 km, une résolution spatiale de 5 m et un temps pour chaque mesure de 10 min. Suivant la norme IEC 61757-2-2, il est ensuite réalisé une moyenne glissante sur une fenêtre de 51 points de mesure qui est représentée par la courbe en trait plein. La valeur de répétabilité communiquée pour une distance z de fibre optique (ici 50 km) correspond au point maximal de cette moyenne, soit dans notre cas à 1,44 °C.

Toutes les mesures de répétabilité qui seront présentées dans le manuscrit de cette thèse le seront suivant cette norme et ce protocole de mesure.

3. On rappelle qu'une mesure réalisée par l'interrogateur est déjà le résultat de plusieurs acquisitions moyennées un nombre de fois défini par l'utilisateur.

4. Le terme mobilité de mesure est aussi souvent qualifié de "frequency error" dans la littérature lorsqu'il s'agit d'évaluer la capacité d'interrogateurs à mesurer la fréquence de diffusion Brillouin.

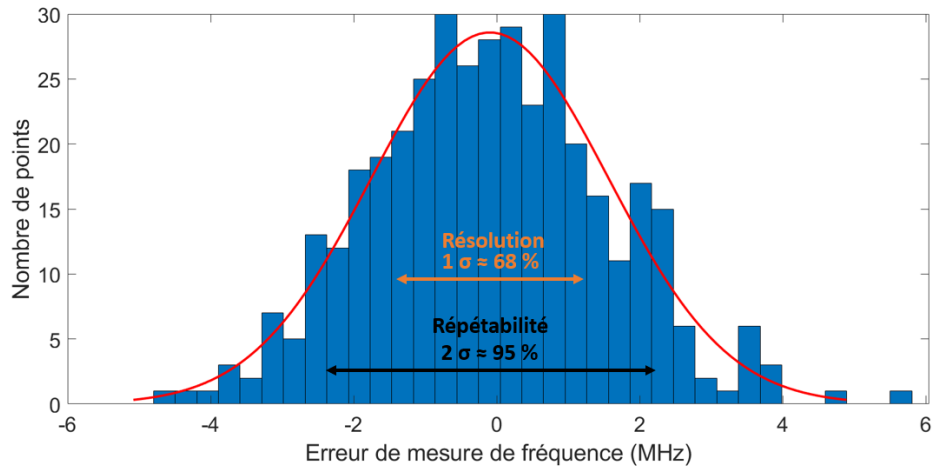


FIGURE II.19 – Résultats de mesure d'un B-OTDR suivant une loi de distribution gaussienne. Cet histogramme représente la distribution de la mesure de fréquence réalisée par le B-OTDR sur 400 mesures consécutives à 30 km de distance.

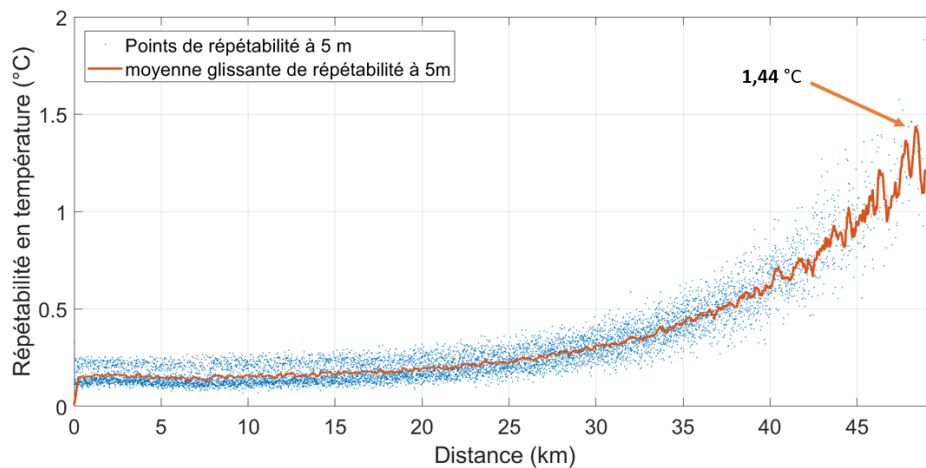


FIGURE II.20 – Répétabilité en température à 2σ de la mesure sur une fibre de 50 km pour une résolution spatiale de 5 m et un temps de mesure de 10 min.

Les résultats sur cette figure sont en accord avec la théorie modélisée par l'équation II.24 et indiquant la valeur d'incertitude sur la mesure à une fois l'écart-type. En effet sur cette mesure, le spectre Brillouin possède une largeur à mi-hauteur $\Delta\nu_B = 32\text{MHz}$, la résolution en fréquence de la mesure est de 2 MHz et notre rapport signal sur bruit en début de fibre est de 21 dB, ce qui se traduit par une résolution théorique de 0,055 MHz équivalente à 0,055 °C à une fois l'écart-type. Nous observons sur la Figure II.20 que l'interrogateur présente une répétabilité de mesure à deux fois l'écart-type de près de 0,2 °C soit 0,2 MHz. Cette valeur à 2σ est donc proche de la valeur théorique. Par ailleurs, à une distance de 50 km, le rapport signal sur bruit de la mesure n'est plus que d'environ 11 dB, ce qui se traduit par une répétabilité attendue de 1,16 °C, ce qui est encore une fois proche de nos résultats. L'interrogateur ainsi caractérisé présente des performances à l'état de l'art et en accord avec la théorie.

II.B.2.b Précision de mesure de l'interrogateur

L'interrogateur utilise une architecture optique particulière nécessitant une fibre de référence. La mesure de la fréquence Brillouin de rétrodiffusion de la fibre à tester dépend donc fortement de la fibre de référence puisque l'interrogateur mesure la différence des deux fréquences ($\nu_{Bref} - \nu_{Bs}$). Ainsi, une variation incontrôlée de la fréquence Brillouin de la fibre de référence ν_{Bref} entraîne un biais sur la mesure de différence des deux fréquences et donc sur la mesure de température et de déformation ainsi que sa répétabilité. C'est pour cela que la fibre de référence est continuellement instrumentée en température via une PT100 qui indique sa température à chaque instant. Ceci permet si besoin de corriger la valeur ν_{Bref} et donc la mesure ($\nu_{Bref} - \nu_{Bs}$). De plus, cette fibre est conditionnée dans une mousse protectrice de manière à ne présenter aucune contrainte, et une variation incontrôlée de fréquence Brillouin peut uniquement être causée par de la température. La mousse permet également de faire tampon entre la température ambiante et la température de la fibre pour limiter des variations trop rapides de température (la fibre ne doit pas changer de température durant le temps d'une mesure).

Pour déterminer la fréquence exacte ν_{Bs} , il est également important de savoir parfaitement la fréquence initiale ν_{Bref} de la rétrodiffusion Brillouin de la fibre de référence utilisée. Sans cela, le système ne peut donner une mesure absolue de la fréquence de rétrodiffusion Brillouin. Il faut donc procéder au préalable à une calibration de la fibre de référence utilisée dans l'interrogateur. Cependant, pour la surveillance de structure, ce point n'est pas critique car dans ce contexte, le système B-OTDR réalise une première mesure au moment de son intégration sur site. Cette première mesure représente un état initial qui sera comparé ensuite à toutes les mesures suivantes. Cela permet de déterminer si la structure a évolué à partir du moment où le système de mesure par fibre optique a été implémenté. Dans ce contexte, l'industriel n'a aucun intérêt à connaître la valeur absolue de la fréquence de rétrodiffusion Brillouin. De plus, dans un cas d'application réelle, la valeur absolue de la fréquence de diffusion Brillouin d'une fibre ne donne absolument aucune information sur l'état de déformation initiale de la structure. En effet, cette mesure dépend uniquement de la manière dont a été instrumenté la fibre sur la structure.

II.C Instrumentation d'une structure par un B-OTDR

Bien qu'un système B-OTDR réalise des mesures de température et de déformation avec des performances à l'état de l'art, celui-ci une fois implémenté sur un site industriel pour de la surveillance d'ouvrage ne peut garantir de présenter les mêmes performances qui dépendent fortement de la manière dont a été instrumenté l'ouvrage. En effet, l'interrogateur acquiert et analyse le signal optique issu de la fibre optique pour en donner une mesure de température et déformation fiable. Cependant, la partie en contact direct avec l'ouvrage à instrumenter et que l'on qualifie réellement de capteur au sens métrologique est la fibre optique. Pour des applications industrielles, cette fibre optique est la plupart du temps insérée dans un câble qui présente une géométrie et des armatures différentes suivant la mise en œuvre et qui auront un impact sur les fonctions de transfert entre la variation physique réelle de la structure et celle perçue par la fibre optique dans le câble. Par ailleurs, la position du câble au niveau de la structure à instrumenter est également primordiale pour obtenir une mesure représentative

du phénomène physique réel impactant la structure. Pour illustrer ces propos, nous allons présenter des mesures réalisées dans le cadre d'un projet porté par l'entreprise FEBUS Optics.

II.C.1 Surveillance d'un pipeline enfoui dans un sol gelé

L'expérimentation que nous allons décrire a eu pour objectif d'évaluer la capacité d'un interrogateur B-OTDR à détecter des déformations subies par un pipeline enfoui dans un sol gelé. Ce contexte s'applique particulièrement bien aux pipelines de pétrole et de gaz qui se trouvent dans les régions de grand froid au-dessus du cercle polaire où il y a de nombreux pays producteurs et exportateurs de pétrole. Dans ces régions, le sol est généralement appelé permafrost et correspond à un type de terrain continuellement gelé pendant au moins deux années consécutives. Lors de variations de gel et de dégel du permafrost, ces phénomènes créent des soulèvements ou affaissements de terrains qui sont donc néfastes pour toutes structures enfouies à ce niveau. Dans le cadre de pipelines, cela peut entraîner de fortes déformations de flexion pouvant aller jusqu'à la rupture totale du pipeline. C'est ainsi que la technologie B-OTDR présente un réel avantage en permettant une surveillance continue de l'état de déformation du pipeline sur des dizaines de kilomètres avec une localisation d'un éventuel événement de l'ordre du mètre. Ce projet a donc porté sur la réalisation d'une maquette à l'échelle 1 permettant de simuler le soulèvement d'un pipeline enfoui dans un sol gelé pour ensuite valider la capacité d'un B-OTDR à adresser cette problématique. Ces essais ont permis de démontrer l'impact du choix du type de câble à fibre optique et son positionnement autour de la structure.

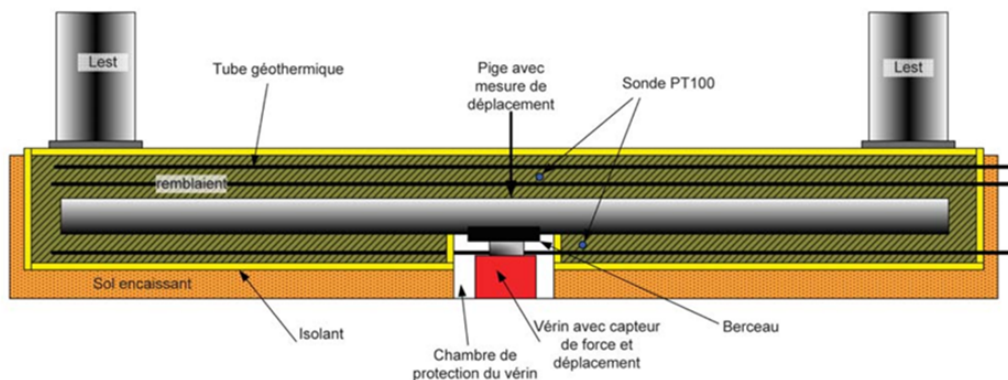


FIGURE II.21 – Banc d'essai mécanique de l'expérimentation d'instrumentation de pipeline

L'expérimentation a été réalisée dans un bâtiment disposant d'une tranchée d'environ 25 m de longueur, 1,2 m de largeur et 1 m de profondeur. Dans cette tranchée a été enfoui un pipeline d'une longueur de 22 m, de diamètre 406 mm et d'épaisseur 25 mm. Ce pipeline y a été positionné au fond, au-dessus d'un vérin hydraulique permettant une élévation jusqu'à 10 cm. La tranchée a été recouverte de terre argileuse compactée et humidifiée pour favoriser la conduction thermique. Il a également été positionné des tubes géothermiques permettant de transporter une solution d'eau glycolée refroidie et permettant de descendre la température du sol dans la tranchée à des températures négatives. La tranchée a été instrumentée en câbles à fibres optiques de différentes natures et positionnés à différentes positions autour du pipeline. La Figure II.21 montre le schéma de la maquette décrit précédemment.

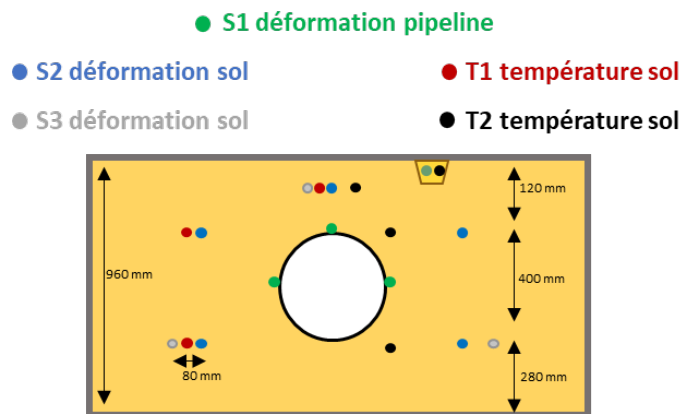


FIGURE II.22 – Schéma de coupe de la tranchée avec l'instrumentation optique

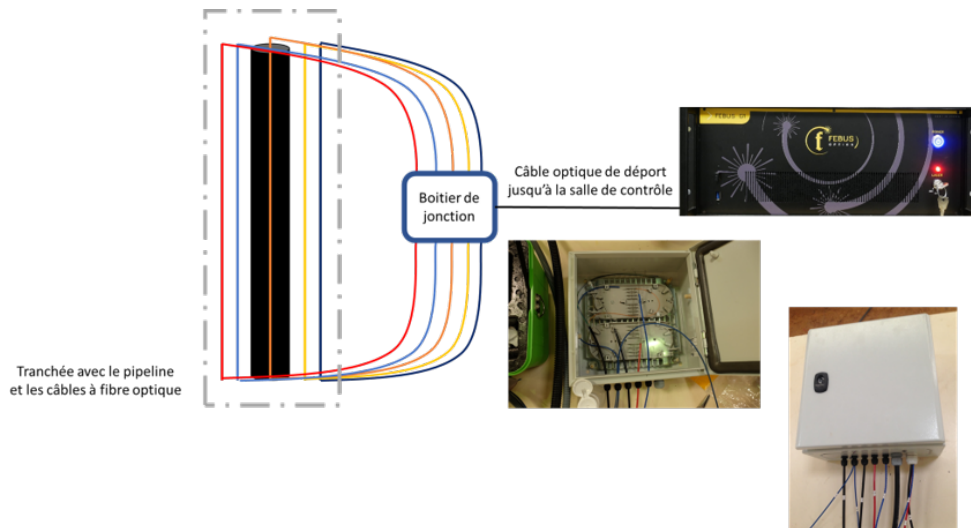


FIGURE II.23 – Schéma général de l'instrumentation du pipeline

Les câbles à fibres optiques ont été placés à différentes profondeurs et à différentes positions autour du pipeline comme le montre la Figure II.22 qui représente le schéma détaillé de la position des câbles dans la tranchée. Cette configuration a pour but d'étudier une grande variété de positionnement pour ensuite déterminer le meilleur emplacement du câble fournissant les résultats les plus

fiables pour une surveillance de mouvements de terrain à proximité d'un pipeline. Tous les câbles enfouis ont été reliés en série dans un boîtier de jonction par des soudures optiques. L'objectif étant de n'avoir qu'une seule ligne optique de mesure pour toute l'expérimentation. Le schéma montrant l'instrumentation optique dans sa globalité, notamment la jonction de tous les câbles, est présentée en Figure II.23. Deux grandes catégories de câbles ont été utilisées, les câbles à gaine serrée et les câbles à gaine libre. Nous allons détailler dans le paragraphe suivant les différences majeures de ces câbles.

II.C.2 Caractérisation des câbles à fibres optiques capteurs

Un des objectifs de cette expérimentation a été de caractériser les deux grandes catégories de câbles citées précédemment pour qualifier leurs performances pour une mesure de déformation avec un système B-OTDR.

II.C.2.a Câbles à structure serrée (tight-buffered)

Ce type de câble est en grande majorité dédié au domaine de la mesure par fibre optique. Il présente la particularité d'avoir la fibre optique totalement solidaire de la gaine extérieure du câble. Ainsi, les déformations mécaniques extérieures sont transmises aux fibres optiques se trouvant à l'intérieur du câble. Ces câbles à gaine serrée sont donc préférés pour la réalisation de mesures nécessitant la surveillance de la déformation d'une structure. Il existe au sein de cette catégorie de câbles plusieurs configurations et géométries disponibles, notamment pour la gaine externe du câble :

- **Non métalliques, avec une gaine extérieure en EPR (éthylène-propylène) :**
Ces câbles sont légers et de petit diamètre. Ils sont bien adaptés lorsqu'ils sont utilisés dans un environnement non hostile en raison de leur fragilité relative. Pour la surveillance de structures, ce type de câble est donc bien adapté lorsqu'il est collé directement sur celle-ci. Ceci est rarement possible dans le cadre d'une surveillance de pipeline, mais existe sur de courtes distances (généralement 1 km ou moins) où le pipeline doit être surveillé mécaniquement, de manière très précise.

- **Métalliques, avec une gaine extérieure en PA (polyamide), blindée et un tube central en métal :**
Ces câbles sont destinés à résister dans des environnements difficiles, avec une résistance élevée aux produits chimiques, une gaine extérieure robuste et résistante à l'abrasion, une bonne protection contre les rongeurs, une bonne résistance à la traction et à l'écrasement. Le câble métallique est moins sensible à la déformation que le câble non métallique avec un transfert de déformation plus faible entre la gaine extérieure, le tube métallique et la fibre optique. Mais pour la mesure de mouvements de terrain comme c'est le cas lors de surveillance de pipelines, la sensibilité à la traction de ces câbles reste suffisante. Ils peuvent être collés sur le pipeline en remplacement des câbles non métalliques si l'environnement nécessite une structure du câble plus résistante.

— **Câbles structurés, avec gaine extérieure en PA structurée, blindée et un tube central en métal :**

Ces câbles sont, comme les câbles métalliques, destinés à être utilisés dans des environnements difficiles. La différence avec les câbles métalliques est liée à la gaine extérieure structurée qui donne au câble une meilleure adhérence au matériau sur lequel il est fixé. Ainsi, ce câble est bien adapté pour des mesures de mouvement de terrain car celui-ci glisse peu dans le sol et présente une meilleure sensibilité à la tension créée par le mouvement du sol. Pour la surveillance des pipelines, ce type de câble peut donc être utilisé directement enterré dans le sol pour détecter les mouvements de terrain et anticiper toute déformation sur les pipelines.

Ces configurations permettent donc le transfert nécessaire de la déformation du câble sur la fibre optique pour réaliser une mesure de déformation précise avec un système B-OTDR. Ces câbles, en plus de transmettre la déformation à la fibre optique, vont également lui transmettre les variations de température. D'autant plus qu'un câble à gaine serrée, par sa nature, engendre une déformation supplémentaire sur la fibre liée à la dilatation thermique du matériau. La Figure II.24 montre des mesures de qualification d'un câble à gaine serrée, le câble V9 de la société Solifos [82], présentant une gaine structurée en PA dans laquelle se trouve une fibre optique monomode serrée dans un tube central en métal. Ce câble, placé dans une enceinte climatique, a subi une rampe de température allant de - 40 °C à 40 °C. Nous avons mesuré, au cours de cette expérience, la variation de fréquence Brillouin du câble de manière à déterminer sa sensibilité aux variations de température.

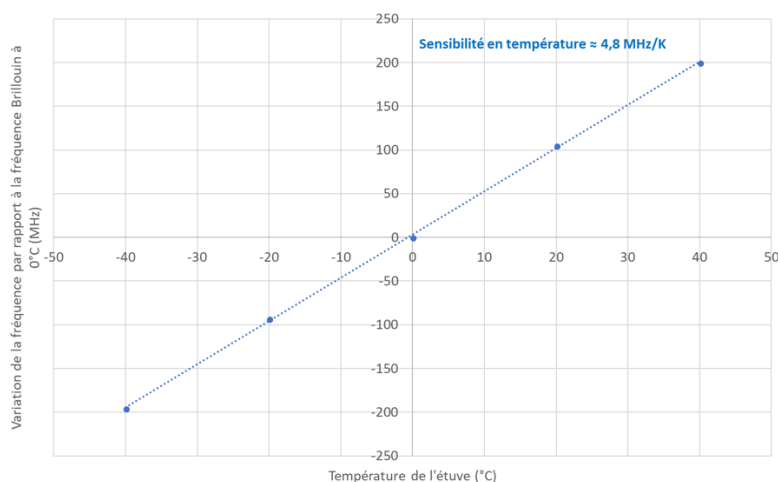


FIGURE II.24 – Mesure de la sensibilité à la température du câble à gaine serrée

Les résultats de cette caractérisation montrent une très bonne linéarité de la mesure mais un coefficient de sensibilité qui ne correspond pas à ceux que l'on peut trouver dans la littérature pour des fibres optiques standards nues. En effet, ce câble présente une sensibilité de 4,8 MHz/°C, ce qui est presque 5 fois plus important que la sensibilité de la fibre optique seule (II.22). Cet écart s'explique par la dilatation thermique de la gaine du câble qui, du fait de la structure serrée, génère de la déformation sur la fibre optique. Dans le cadre d'une instrumentation de structure, il est donc nécessaire d'utiliser une solution de mesure

de température en plus de ce type de câble. Cette mesure de température peut être réalisée avec une technologie à fibre optique, via une solution Raman ou un B-OTDR connecté cette fois-ci sur un câble à structure libre dont la fibre est quasi insensible à la déformation.

II.C.2.b Câbles à structure libre (loose-tube)

Ce type de câble permet de rendre la fibre optique insensible à la déformation subie par le câble. Cela est possible grâce à la configuration spécifique du câble où la fibre optique n'est pas serrée dans l'armature. Ainsi la fibre ne ressent pas la déformation du câble, et cette propriété est également favorisée par l'utilisation d'un gel permettant de réduire encore plus la friction entre la fibre optique et la gaine extérieure. La Figure II.25 représente la sensibilité à la température de ce type de câble suivant le même protocole expérimental que celui en Figure II.24. Le câble testé est ici un câble de la société Solifos, nommé BruSens Temperature [83].

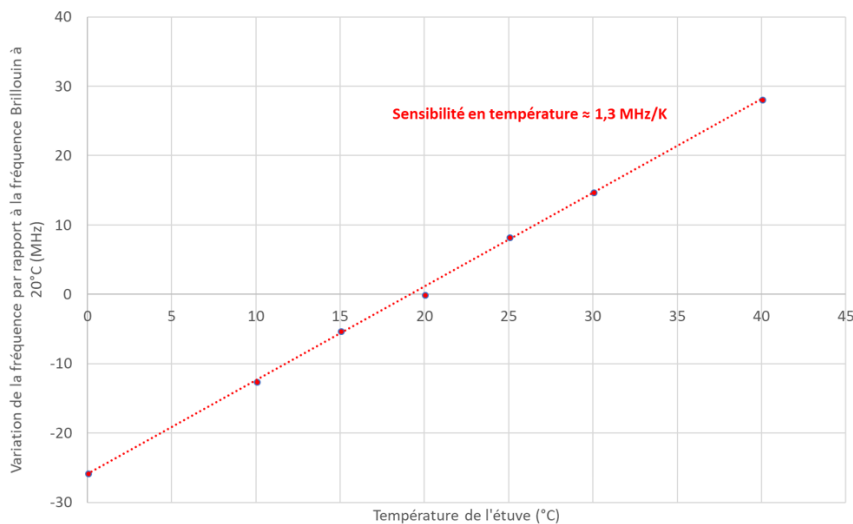


FIGURE II.25 – Mesure de la sensibilité à la température du câble à gaine libre

Sur cette mesure, on observe un coefficient de sensibilité en température de 1,3 MHz/°C, ce qui est proche du coefficient de la fibre optique seule qui est généralement de 1,1 MHz/°C pour ce type de fibre. Ainsi, on constate que ce câble permet bien de limiter les effets liés à la dilatation thermique de la gaine et nous pouvons donc remarquer les bénéfices d'une configuration en structure libre (nous verrons dans la partie suivante que les câbles à structure libre sont malgré tout sensibles à la déformation mais avec une sensibilité dix fois moins importante que les câbles à structure serrée). Les câbles à structure libre sont donc très souvent utilisés pour les mesures distribuées de température au moyen de systèmes Brillouin. Par ailleurs, ce type de structure est également présente sur tous les câbles standards dédiés aux télécommunications. En effet, cela permet une protection supplémentaire de la fibre optique lors du déploiement du câble qui peut ainsi être fortement contraint sans endommager la ou les fibres optiques à l'intérieur. Au cours d'une instrumentation de structure avec des équipements B-OTDR, on utilise donc très souvent ces deux types de câbles en simultanément afin de décorrélérer les paramètres de température et de déformation sur la mesure de rétrodiffusion Brillouin.

II.C.3 Mesure de déformation d'un pipeline dans un sol gelé

Nous avons utilisé pour cette expérimentation les deux types de câbles présentés précédemment : trois câbles à gaine serrée, que l'on nommera S1, S2 et S3, ainsi que deux câbles à gaine libre nommés T1 et T2. Les caractéristiques importantes de ces câbles sont présentées dans la tableau II.2.

Ces câbles ont été implémentés à plusieurs positions autour du pipeline dans la tranchée suivant les Figures II.26 et II.22. Le câble S1 à quant à lui été collé directement sur la structure du pipeline dans le but d'observer la déformation de la tuyauterie causée par les mouvements de terrain simulés. Pour des raisons pratiques, il n'a pas été possible de coller les trois portions de câble S1 à 120° les unes des autres comme il est préconisé de le faire pour surveiller une structure de ce type [27].

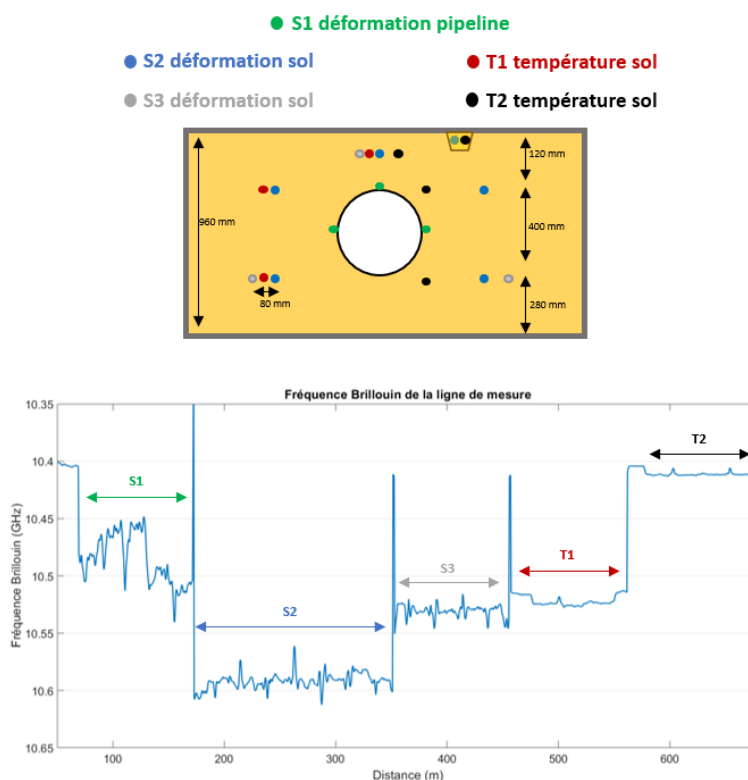


FIGURE II.26 – Mesure distribuée de la fréquence Brillouin de l'expérimentation de surveillance du pipeline. Cette mesure a été réalisée au début de l'expérimentation sans contraintes ni variations de température et servira donc d'état de référence pour le reste des essais.

Cette Figure II.26 montre également une mesure distribuée de fréquence Brillouin réalisée sur toute la ligne optique comprenant les 5 câbles testés. Il s'agit là d'une mesure réalisée après le travail d'instrumentation des câbles mais avant la simulation des mouvements de terrain et qui servira d'état de référence pour toutes les autres mesures qui seront réalisées durant les essais. A première vue, cette figure illustre déjà la différence entre les deux types de câbles utilisés. Les fréquences Brillouin des câbles S1, S2 et S3 présentent de grandes variations liées à l'instrumentation dans la tranchée qui a généré de la déformation sur les câbles lors de l'enfouissement tandis que celles des câbles T1 et T2 ne varient que très peu.

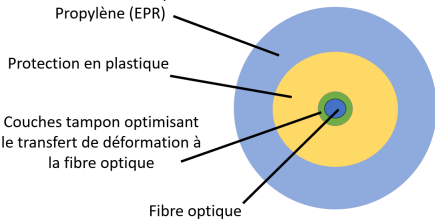
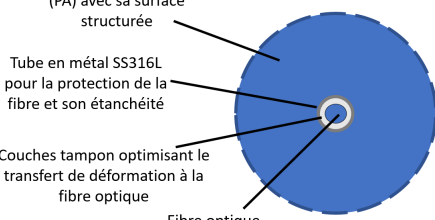
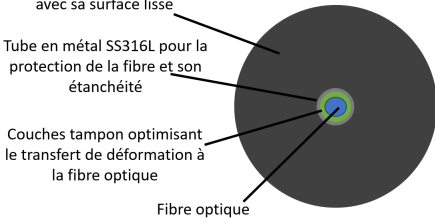
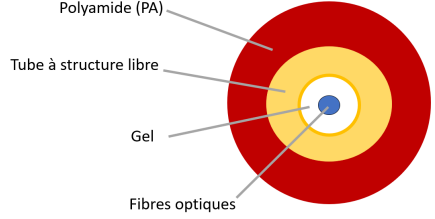
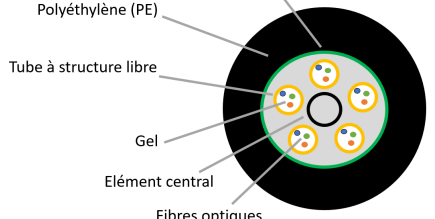
Référence et caractéristiques mécaniques du câble	Représentation graphique du câble	Type de fibre optique	<ul style="list-style-type: none"> • Coefficient de sensibilité Brillouin fournisseur • Coefficient de sensibilité Brillouin mesuré
S1 / Structure serrée, non métallique avec gaine externe lisse en EPR	 <p>Gaine externe en Éthylène-Propylène (EPR)</p> <p>Protection en plastique</p> <p>Couches tampon optimisant le transfert de déformation à la fibre optique</p> <p>Fibre optique</p>	Monomode G657	<ul style="list-style-type: none"> • 4,2 MHz/°C (fournisseur) • 5,0 MHz/°C (mesuré)
S2 / Structure serrée, métallique avec gaine externe structurée en PA	 <p>Gaine externe en Polyamide (PA) avec sa surface structurée</p> <p>Tube en métal SS316L pour la protection de la fibre et son étanchéité</p> <p>Couches tampon optimisant le transfert de déformation à la fibre optique</p> <p>Fibre optique</p>	Monomode G657	<ul style="list-style-type: none"> • 2,0 MHz/°C (fournisseur) • 4,8 MHz/°C (mesuré)
S3 / Structure serrée, métallique avec gaine externe lisse en PA	 <p>Gaine externe en polyamide avec sa surface lisse</p> <p>Tube en métal SS316L pour la protection de la fibre et son étanchéité</p> <p>Couches tampon optimisant le transfert de déformation à la fibre optique</p> <p>Fibre optique</p>	Monomode G657	<ul style="list-style-type: none"> • 1,1 MHz/°C (fournisseur) • 4,0 MHz/°C (mesuré)
T1 / Structure libre, gaine en PA	 <p>Gaine externe en Polyamide (PA)</p> <p>Tube à structure libre</p> <p>Gel</p> <p>Fibres optiques</p>	Monomode G657	<ul style="list-style-type: none"> • 1,1 MHz/°C (fournisseur) • 1,3 MHz/°C (mesuré)
T2 / Structure libre, câble standard de télécommunication avec armature métallique et gaine en PA	 <p>Gaine externe en Polyéthylène (PE)</p> <p>Armature Acier</p> <p>Tube à structure libre</p> <p>Gel</p> <p>Élément central</p> <p>Fibres optiques</p>	Monomode G652	<ul style="list-style-type: none"> • NA (fournisseur) • 1,1 MHz/°C (mesuré)

TABLE II.2 – Tableau des caractéristiques principales des câbles à fibres optiques utilisés pour l'instrumentation du pipeline.

La Figure II.27 montre le déroulement des essais, notamment l'élévation et l'effort de poussée du vérin situé au-dessous du pipeline et ayant pour but de créer de la flexion, type de déformation que l'on observe sur les tuyaux enfouis dans du permafrost.

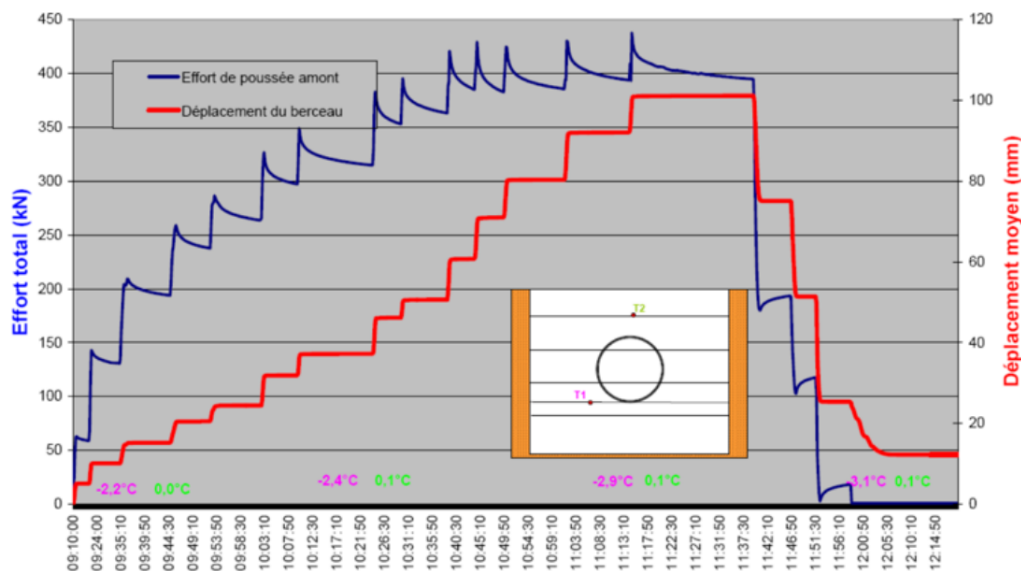


FIGURE II.27 – Graphique du suivi mécanique de l'asservissement du vérin et du suivi en température de la tranchée

La courbe rouge représente le déplacement moyen du vérin tandis que la courbe bleue représente l'effort de poussée du vérin. Les données des sondes de température sont également présentes sur ce graphique permettant de confirmer l'aspect gelé du sol tout au long de l'expérimentation. Une variation de 1 °C a été observée au fond de la tranchée durant l'expérience, ce qui correspond à un biais de mesure sur la déformation de 20 $\mu\text{m}/\text{m}$. Nous avons procédé à une surélévation maximale du pipeline de 100 mm, ce qui est par exemple près de 10 fois plus faible que le soulèvement maximal d'un pipeline observé dans la vallée du Mackenzie [84]. Le soulèvement de notre pipeline s'est fait par paliers de 5 mm jusqu'à un soulèvement de 50 mm puis les paliers ont été de 10 mm jusqu'au soulèvement final de 100 mm. Nous avons, pour chaque palier, réalisé une mesure distribuée de déformation avec un équipement B-OTDR sur tous les câbles optiques présents dans la tranchée.

La configuration de mesure est telle que présentée dans le tableau II.3.

Longueur de fibre optique	800 m
Résolution spatiale	1 m
Résolution d'échantillonnage spatial	0.5 m
Nombre de moyennes	1 000 000
Temps de mesure pour chaque palier	1 min et 30 sec

TABLE II.3 – Configuration de la mesure B-ODTR pour les essais d'instrumentation du pipeline.

La résolution spatiale choisie nous permet de quantifier des évènements localisés au demi-mètre près (résolution d'échantillonnage) dans la tranchée et s'étendant sur un minimum de 1 m autour de ce point de mesure (résolution spatiale). Le temps de mesure a été défini en fonction des performances de notre interrogateur, qualifié comme cela est décrit dans la partie II.B.2.

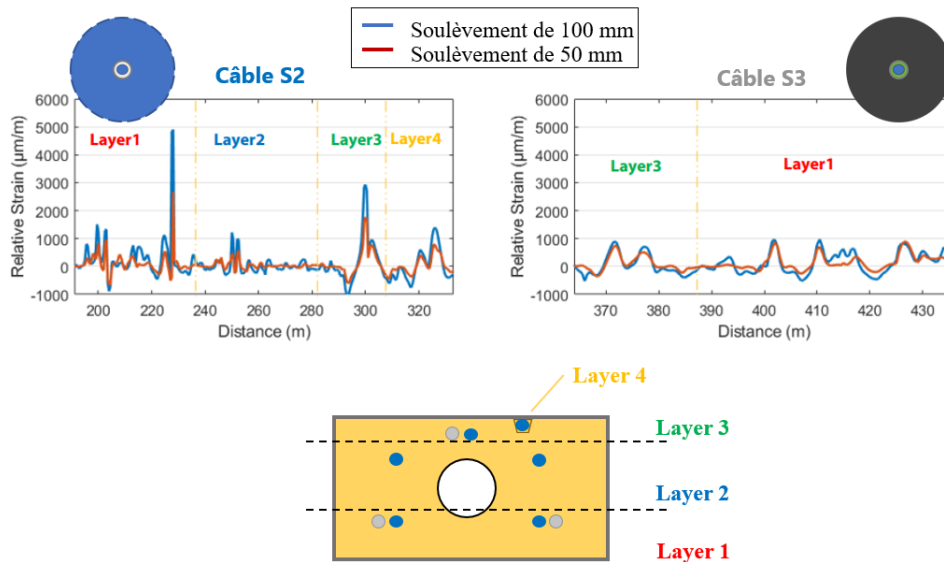


FIGURE II.28 – Graphique du profil de déformation durant l'expérimentation pour les câbles S2 et S3

La Figure II.28 montre l'évolution des profils de déformation des câbles S2 et S3 mesurés par le B-OTDR. Sur les deux graphiques de cette figure, il s'agit de mesures relatives de déformation et non absolues, dont la mesure initiale a été réalisée juste avant le début des essais. D'un point de vue global, ces graphiques montrent bien la différence de sensibilité de ces deux types de câbles. Bien que la résolution spatiale et l'échantillonnage spatial soient les mêmes, nous observons que le câble S2 présente plus de détails de mesure et de plus grandes amplitudes de déformation que le câble S3 qui a un profil de déformation moins résolu. Cette différence est liée à la structure de ces câbles, l'un étant avec une gaine structurée permettant une meilleure accroche au niveau du sol (S2) et l'autre possédant une gaine lisse qui va donc plus facilement glisser dans le sol et présenter un profil de déformation moins détaillé (S3). Ainsi pour de la mesure de déformation via les systèmes B-OTDRs, le choix du câble est important. L'aspect gaine serrée ou gaine libre n'est pas le seul élément à prendre en compte et il est nécessaire de s'assurer de la géométrie du câble en fonction de la sensibilité en déformation souhaitée. Il est également à prendre en compte que dans le cadre de déformations d'amplitudes importantes comme dans le cas de cette expérimentation, un câble comme le S2 présente un plus gros risque de casse du fait du très bon transfert de déformation du sol à la gaine du câble.

La Figure II.29 quant à elle représente l'état de déformation mesuré sur les câbles à gaine libre. Ces mesures confirment le faible transfert de déformation du câble vers la fibre optique. En effet nous pouvons estimer, grâce aux mesures des câbles à gaine serrée, avoir créé des déformations allant jusqu'à plus de 1000 µm/m durant cette expérience. Cependant nous observons sur les mesures des

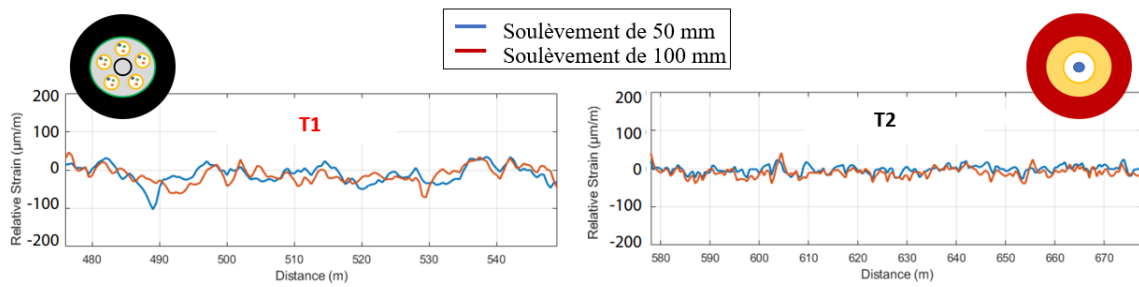


FIGURE II.29 – Graphique du profil de déformation durant l'expérimentation pour les câbles T1 et T2

câbles à gaine libre des déformations maximales de $100 \mu\text{m}/\text{m}$ et en moyenne de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{m}/\text{m}$, ce qui présente au maximum un facteur 10 entre la sensibilité en déformation des câbles à gaine libre et des câbles à gaine serrée. Par ailleurs, la position du câble va être importante puisqu'en fonction de son emplacement par rapport à la structure, celui-ci ne mesurera pas les mêmes types de déformations.

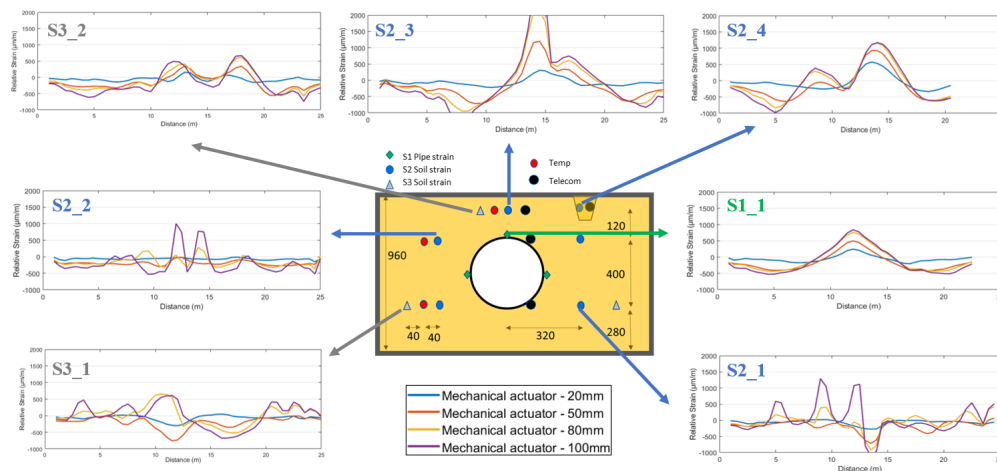


FIGURE II.30 – Graphique du profil de déformation durant l'expérimentation sur la globalité des câbles à gaine serrée

La Figure II.30 représente les mesures de déformation réalisées sur les câbles à gaine serrée positionnés à différents endroits. On constate qu'en fonction de la position du câble, nous n'observons pas la même allure de la déformation. En effet les portions S2_1, S2_2, S2_4 et S3_2 présentent un profil en déformation typique des excavations [85]. Tandis que les portions S2_3 et S1_1 mesurent le phénomène de flexion du pipeline vers le haut.

II.C.4 Conclusion de l'étude

Nous avons donc montré l'importance de bien choisir le câble à fibre optique utilisé dans le cadre d'une instrumentation de structure. En effet, chaque câble a des propriétés mécaniques différentes, ce qui a un impact sur une mesure B-OTDR en déformation dont les résultats sont différents d'un câble à un autre. Par ailleurs, le positionnement du câble est important suivant le type d'événements

attendu, puisque le transfert de la déformation se fait de manière complètement différente d'une position à une autre. Dans le cadre d'une instrumentation de pipelines, il est intéressant de connaître l'état de déformation du sol qui impacte l'état de déformation du pipeline. Pour cela, nous avons montré que même une instrumentation avec un câble à fibre optique placé dans une tranchée creusée au-dessus du tuyau permet d'obtenir des informations sur la déformation du sol impliquant d'éventuelles déformations directement sur le pipeline. Il est relativement aisé de positionner un câble à fibre optique à cet endroit et cette position peut donc être préconisée lorsqu'il y a un besoin de surveiller tout mouvement de terrain pouvant créer des endommagements du pipeline. Par ailleurs, nous avons également montré que coller un câble directement sur la structure permet d'obtenir précisément le profil de déformation de cette dernière. Cependant, ce type d'instrumentation est délicat à mettre en œuvre dans un cas d'application réelle puisque la probabilité de casse du câble durant l'installation du pipeline est forte. Cette mise en œuvre est généralement réservée au domaine du génie civil où le type de collage utilisé est très important puisque c'est lui qui définit la fonction de transfert en déformation entre la structure instrumentée et le câble à fibre optique [86].

II.D Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord défini toutes les caractéristiques et notions nécessaires à la bonne compréhension du fonctionnement des interrogateurs de rétrodiffusion Brillouin. Le fonctionnement optique novateur de l'interrogateur FEBUS G1-R a par la suite été présenté ainsi que le protocole utilisé pour évaluer ses performances de mesure. La combinaison de l'architecture optique du système et de son traitement numérique performant nous permet d'obtenir des répétabilités de mesures à l'état de l'art en un temps de mesure qui n'était jusqu'à présent pas envisageable avec les systèmes B-OTDRs traditionnels. Nous avons également démontré l'importance de la mise en œuvre de l'instrumentation optique pour la surveillance d'ouvrage. Un exemple d'une expérimentation à échelle réelle visant à surveiller les mouvements d'un pipeline enterré dans un sol gelé nous a permis d'évaluer l'intérêt du positionnement et des types de câbles à fibres optiques adaptés pour la mesure souhaitée. Ainsi, nous avons montré que des câbles dits à structure libre ne permettaient pas d'obtenir des mesures fiables de déformation via la rétrodiffusion Brillouin. Cependant ce type de câble est utile et peut même être nécessaire lors d'une instrumentation par fibre optique puisqu'il permet de s'affranchir de la double sensibilité à la température et à la déformation de la mesure de diffusion Brillouin. Par ailleurs, le positionnement du câble capteur au niveau de la structure à surveiller est primordial puisqu'il ne percevra pas les mêmes types de phénomènes en fonction de sa position au niveau de la structure. Tous les résultats de cette expérimentation ont été présentés lors d'une communication dans une conférence [87].

Références

- [18] Arthur HARTOG. *An introduction to distributed optical fibre sensors*. 12 avr. 2017. ISBN : 978-1-4822-5957-5. DOI : [10.1201/9781315119014](https://doi.org/10.1201/9781315119014).
- [23] Robert BOYD. *Nonlinear Optics*. 3rd edition. Academic Press, 28 mar. 2008. 640 p.
- [25] Govind P. AGRAWAL. *Nonlinear Fiber Optics*. 5th. Elsevier, 2013. ISBN : 978-0-12-397023-7. DOI : [10.1016/C2011-0-00045-5](https://doi.org/10.1016/C2011-0-00045-5).
- [27] Damien MARAVAL. « Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR ». Thèse de doct. Télécom ParisTech, 11 mai 2017. 180 p.
- [30] Yolande SIKALI. « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : séparation de la dépendance à température et à la déformation ». Thèse de doct. Télécom ParisTech, 9 oct. 2012.
- [31] Vincent LANTICQ. « Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ». Thèse de doct. Paris : Ecole Doctorale d'Informatique Télécommunications et Electronique de Paris, 2009.
- [32] Y. AOKI, K. TAJIMA et I. MITO. « Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems ». In : *Journal of Lightwave Technology* 6.5 (mai 1988), p. 710-719. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/50.4057](https://doi.org/10.1109/50.4057).
- [33] Andrey KOBYAKOV, Michael SAUER et Dipak CHOWDHURY. « Stimulated Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Advances in Optics and Photonics* 2.1 (31 mar. 2010). Publisher : Optical Society of America, p. 1-59. ISSN : 1943-8206. DOI : [10.1364/AOP.2.000001](https://doi.org/10.1364/AOP.2.000001).
- [34] M.O. van DEVENTER et A.J. BOOT. « Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 12.4 (avr. 1994). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 585-590. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/50.285349](https://doi.org/10.1109/50.285349).
- [35] Sébastien Le FLOCH. « Etude de la diffusion Brillouin stimulée dans les fibres monomodes standard. Application aux capteurs de température et de pression ». Thèse de doct. Université de Bretagne occidentale - Brest, 3 déc. 2001.
- [36] Jean-Charles BEUGNOT. « La diffusion Brillouin dans les fibres optiques microstructurées ». In : (), p. 156.
- [37] C. N. PANNELL, P. St J. RUSSELL et T. P. NEWSON. « Stimulated Brillouin scattering in optical fibers : the effects of optical amplification ». In : *JOSA B* 10.4 (1^{er} avr. 1993). Publisher : Optical Society of America, p. 684-690. ISSN : 1520-8540. DOI : [10.1364/JOSAB.10.000684](https://doi.org/10.1364/JOSAB.10.000684).
- [38] Schadrac FRESNEL. « Lasers à fibre Brillouin multi-Stokes : cohérence et caractérisation en bruit ». Thèse de doct. Université Bretagne Loire, 1^{er} sept. 2017.
- [39] MALLINDER, FP {and} PROCTOR et BA {and} OTHERS. « Elastic constants of fused silica as a function of large tensile strain ». In : *Phys. Chem. Glasses* (1964), p. 91-103.

- [40] J. SCHROEDER et al. « Rayleigh and Brillouin Scattering in K₂O–SiO₂ Glasses ». In : *Journal of the American Ceramic Society* 56.10 (1^{er} oct. 1973), p. 510-514. ISSN : 1551-2916. DOI : [10.1111/j.1151-2916.1973.tb12399.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1973.tb12399.x).
- [41] K. DE SOUZA, P.C. WAIT et T.P. NEWSON. « Characterisation of strain dependence of the Landau-Placzek ratio for distributed sensing ». In : *Electronics Letters* 33.7 (mar. 1997). Conference Name : Electronics Letters, p. 615-616. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19970432](https://doi.org/10.1049/e1:19970432).
- [42] T. R. PARKER et al. « Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Optics Letters* 22.11 (1^{er} juin 1997), p. 787. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.22.000787](https://doi.org/10.1364/OL.22.000787).
- [43] M. NIKLES, L. THEVENAZ et P.A. ROBERT. « Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 15.10 (oct. 1997), p. 1842-1851. ISSN : 07338724. DOI : [10.1109/50.633570](https://doi.org/10.1109/50.633570).
- [44] S. ADACHI. « Distributed optical fiber sensors and their applications ». In : *2008 SICE Annual Conference*. 2008 SICE Annual Conference. Août 2008, p. 329-333. DOI : [10.1109/SICE.2008.4654674](https://doi.org/10.1109/SICE.2008.4654674).
- [45] Xiaoyi BAO et Liang CHEN. « Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors ». In : *Sensors* 12.7 (26 juin 2012), p. 8601-8639. DOI : [10.3390/s120708601](https://doi.org/10.3390/s120708601).
- [46] Avi MOTIL, Arik BERGMAN et Moshe TUR. « [INVITED] State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing ». In : *Optics & Laser Technology*. The year of light : optical fiber sensors and laser material processing 78 (1^{er} avr. 2016), p. 81-103. ISSN : 0030-3992. DOI : [10.1016/j.optlastec.2015.09.013](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013).
- [47] *Fiber-optic Distributed Strain and Temperature Sensor using BOCDA Technology at High Speed and with High Spatial Resolution* | Yokogawa Electric Corporation. Library Catalog : www.yokogawa.com. URL : <https://www.yokogawa.com/library/resources/yokogawa-technical-reports/fiber-optic-distributed-strain-and-temperature-sensor-using-bocda-technology-at-high-speed-and-with-high-spatial-resolution/> (visité le 14/04/2020).
- [48] *fibrisTerre* | *Distributed Fiber-Optic Sensing Solutions*. URL : <https://www.fibristerre.de/> (visité le 14/04/2020).
- [49] *Omnisens*. *Omnisens - Securing asset integrity - Morges*. Library Catalog : www.omnisens.com. URL : <https://www.omnisens.com/> (visité le 14/04/2020).
- [50] *FEBUS OPTICS - Optical fiber based sensor system for monitoring of infrastructures*. URL : <http://www.febus-optics.com/en/> (visité le 14/04/2020).
- [51] K KISHIDA et C-H LI. « Pulse pre-pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system ». In : (), p. 7.
- [52] *Neubrex Co., Ltd. - NEUBRESCOPE NBX-7031 (Specs)*. URL : <https://www.neubrex.com/htm/products/pro-nbx7031.htm> (visité le 27/03/2020).
- [53] Sanghoon CHIN. « A BRILLOUIN OPTOELECTRONIC MEASUREMENT METHOD ». Brev. amér. 2015/0308923 A1. OMNISENS SA. 29 oct. 2015.

- [54] K. SHIMIZU et al. « Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 12.5 (mai 1994), p. 730-736. ISSN : 0733-8724. DOI : [10.1109/50.293961](https://doi.org/10.1109/50.293961).
- [55] Y. KOYAMADA et al. « Novel Technique to Improve Spatial Resolution in Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 19.23 (déc. 2007). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 1910-1912. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/LPT.2007.908651](https://doi.org/10.1109/LPT.2007.908651).
- [56] Yoshiyuki SAKAIRI et al. « Prototype double-pulse BOTDR for measuring distributed strain with 20-cm spatial resolution ». In : *2008 SICE Annual Conference*. 2008 SICE Annual Conference. Août 2008, p. 1106-1109. DOI : [10.1109/SICE.2008.4654823](https://doi.org/10.1109/SICE.2008.4654823).
- [57] Edouard BUCHOUD. « Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique ». Thèse de doct. Université de Grenoble, 13 oct. 2014.
- [58] Vincent LANTICQ. « Spatial Resolution Enhancement on Brillouin Fiber-Optic Sensing for Structural Health Monitoring ». International Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering. International Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering. TINCE 2018, 30 août 2018.
- [59] Qing BAI et al. « Recent Advances in Brillouin Optical Time Domain Reflectometry ». In : *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.8 (18 avr. 2019). ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s19081862](https://doi.org/10.3390/s19081862).
- [60] Daisuke IIDA et Fumihiko ITO. « Cost-effective bandwidth-reduced Brillouin optical time domain reflectometry using a reference Brillouin scattering beam ». In : *Applied Optics* 48.22 (1^{er} août 2009), p. 4302-4309. ISSN : 2155-3165. DOI : [10.1364/AO.48.004302](https://doi.org/10.1364/AO.48.004302).
- [61] Shangran XIE et al. « Polarization dependence of Brillouin linewidth and peak frequency due to fiber inhomogeneity in single mode fiber and its impact on distributed fiber Brillouin sensing ». In : *Optics Express* 20.6 (12 mar. 2012). Publisher : Optical Society of America, p. 6385-6399. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.20.006385](https://doi.org/10.1364/OE.20.006385).
- [62] Xuping ZHANG, Rugang WANG et Yuguo YAO. « Brillouin optical time domain reflectometry using a reference Brillouin ring laser ». In : *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*. OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. T. 8421. International Society for Optics et Photonics, 7 nov. 2012, 84219G. DOI : [10.1117/12.968294](https://doi.org/10.1117/12.968294).
- [63] A. HARTOG. « A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 1.3 (sept. 1983), p. 498-509. ISSN : 0733-8724. DOI : [10.1109/JLT.1983.1072146](https://doi.org/10.1109/JLT.1983.1072146).
- [64] J. ZHANG et M.R. PHILLIPS. « Modeling intensity noise caused by stimulated Brillouin scattering in optical fibers ». In : *(CLEO). Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005*. (CLEO). Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005. T. 1. ISSN : null. Mai 2005, 140-142 Vol. 1. DOI : [10.1109/CLEO.2005.201703](https://doi.org/10.1109/CLEO.2005.201703).

- [65] Wei CHEN et Zhou MENG. « Intensity and phase noise caused by stimulated Brillouin scattering ». In : *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*. 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. T. 7753. International Society for Optics et Photonics, 17 mai 2011, 77532G. DOI : [10.1117/12.885377](https://doi.org/10.1117/12.885377).
- [66] Asaf DAVID et Moshe HOROWITZ. « Low-frequency transmitted intensity noise induced by stimulated Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Optics Express* 19.12 (6 juin 2011), p. 11792. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.19.011792](https://doi.org/10.1364/OE.19.011792).
- [67] G. L. ABBAS, V. W. S. CHAN et T. K. YEE. « Local-oscillator excess-noise suppression for homodyne and heterodyne detection ». In : *Optics Letters* 8.8 (1^{er} août 1983), p. 419-421. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.8.000419](https://doi.org/10.1364/OL.8.000419).
- [68] Vincent LANTICQ. « DISPOSITIF OPTOELECTRONIQUE DE MESURE REPARTIE PAR DIFFUSION BRILLOUIN. » Brev. franç. 3043457. FEBUS OPTICS. 12 mai 2017.
- [69] Marcelo A. SOTO et Luc THÉVENAZ. « Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors ». In : *Optics Express* 21.25 (16 déc. 2013). Publisher : Optical Society of America, p. 31347-31366. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.21.031347](https://doi.org/10.1364/OE.21.031347).
- [70] Sally M. MAUGHAN, Huai H. KEE et Trevor P. NEWSON. « Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter ». In : *Measurement Science and Technology* 12.7 (2001), p. 834. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/12/7/315](https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/7/315).
- [71] Chuankai ZHANG, Yuanhong YANG et Anqi LI. « Application of Levenberg-Marquardt algorithm in the Brillouin spectrum fitting ». In : *Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology : Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration*. Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology : Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration. T. 7129. International Society for Optics et Photonics, 13 oct. 2008, 71291Y. DOI : [10.1117/12.807646](https://doi.org/10.1117/12.807646).
- [72] Lijuan ZHAO, Yongqian LI et Zhiniu XU. « A fast and high accurate initial values obtainment method for Brillouin scattering spectrum parameter estimation ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 210 (1^{er} avr. 2014), p. 141-146. ISSN : 0924-4247. DOI : [10.1016/j.sna.2014.02.022](https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.02.022).
- [73] Xiaobin HONG et al. « A fast method for Brillouin frequency shift estimation ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 284 (1^{er} déc. 2018), p. 6-11. ISSN : 0924-4247. DOI : [10.1016/j.sna.2018.09.020](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.020).
- [74] Simon ZASLAWSKI et al. « Impact of Fitting and Digital Filtering on Signal-to-Noise Ratio and Brillouin Frequency Shift Uncertainty of BOTDA Measurements ». In : *26th International Conference on Optical Fiber Sensors (2018), paper ThE27*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 24 sept. 2018, ThE27. DOI : [10.1364/OFS.2018.ThE27](https://doi.org/10.1364/OFS.2018.ThE27).

- [75] Simon ZASLAWSKI, Zhisheng YANG et Luc THEVENAZ. « On the 2D Post-Processing of Brillouin Optical Time-Domain Analysis ». In : *Journal of Lightwave Technology* (2020). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 1-1. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.2020.2967091](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2967091).
- [76] *Measurement Specification for Distributed Temperature Sensing*. SEAFOM-MSP-01. Jan. 2016.
- [77] BARRY N. TAYLOR AND CHRIS E. KUYATT. *NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results Cover*. Technical Note 1297. Last Modified : 2019-11-15T19 :42-05 :00 Library Catalog : www.nist.gov. NIST, 1994.
- [78] Scott W. TYLER et al. « Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods ». In : *Water Resources Research* 45.4 (2009). ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2008WR007052](https://doi.org/10.1029/2008WR007052).
- [79] Aldo MINARDO et al. « A reconstruction technique for long-range stimulated Brillouin scattering distributed fibre-optic sensors : experimental results ». In : *Measurement Science and Technology* 16.4 (fév. 2005). Publisher : IOP Publishing, p. 900-908. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/16/4/002](https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/4/002).
- [80] Marc NIKLÈS. « Fibre optic distributed scattering sensing system : perspectives and challenges for high performance applications ». In : *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors*. Third European Workshop on Optical Fibre Sensors. T. 6619. International Society for Optics et Photonics, 2 juil. 2007, p. 66190D. DOI : [10.1117/12.738349](https://doi.org/10.1117/12.738349).
- [81] Ander Zornoza INDART. « Investigation into Improving Resolution of Strain Measurements in BOTDA Sensors ». thesis. University of Illinois at Chicago, 28 oct. 2014.
- [82] *Solifos - Fiber Optic Sensing Cables - BRUsens Strain Sensing Cables - BRUsens DSS 3.2mm V9 grip*. URL : <http://solifos.nubosys.com/de/products/product-detail/productgroup/pug-9359/subgroup/current/showproduct/brusens-dss-32mm-v9-grip/> (visité le 19/04/2020).
- [83] *Solifos - Fiber Optic Sensing Cables - BRUsens Temperature Sensing Cables - BRUsens DTS STL PA*. URL : <http://solifos.nubosys.com/de/products/product-detail/productgroup/pug-9357/subgroup/current/showproduct/brusens-dts-stl-pa/> (visité le 19/04/2020).
- [84] JF (Derick) NIXON et Margo BURGESS. « Norman Wells pipeline settlement and uplift movements ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 36.1 (8 août 1999), p. 119-135. ISSN : 0008-3674. DOI : [10.1139/t98-092](https://doi.org/10.1139/t98-092).
- [85] Sylvie DELEPINE-LESOILLE et al. « B-OTDR and OFDR distributed optical fiber strain sensing for sinkhole detection ». In : *International Conference on Optical Fibre Sensors*. 2008. DOI : [10.1117/12.786125](https://doi.org/10.1117/12.786125).
- [86] Jean-Marie 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 ». These de doctorat. Paris Est, 18 nov. 2013.
- [87] Pierre CLÉMENT et al. « Fiber optic monitoring of pipelines in permafrost context ». In : *26th International Conference on Optical Fiber Sensors (2018), paper ThE94*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 24 sept. 2018, ThE94. DOI : [10.1364/OFS.2018.ThE94](https://doi.org/10.1364/OFS.2018.ThE94).

Chapitre III

Accroissement de la portée d'un interrogateur B-OTDR

III.A Limitations en distance de la mesure B-OTDR

Les systèmes de mesure par fibre optique utilisent les propriétés de la fibre qui permet de propager le signal lumineux sur de très longues distances. Malgré tout, la portée de mesure des interrogateurs à fibre optique présente des limites qui sont causées par l'atténuation optique de la fibre. Afin de conserver une sensibilité suffisante, il serait tentant d'accroître la puissance crête des impulsions. Cependant les niveaux de puissance sont limités par des effets non-linéaires qui distordent le signal optique transmis. Nous allons donc présenter dans cette partie les différents effets limitant la portée de mesure des interrogateurs B-OTDRs.

III.A.1 Limitations liées à l'atténuation optique linéaire

Dans toute fibre optique, la propagation de la lumière est atténuée du fait de l'absorption, de la diffusion et des courbures qui ont été évoquées dans la partie [I.B.1.b](#) de ce manuscrit. Toutes ces pertes sont uniformément réparties le long de la fibre et sont exprimées en dB/km. Une fibre optique standard monomode de longueur L , caractérisée par un coefficient de rétrodiffusion r , présente généralement une atténuation α de l'ordre de 0,2 dB/km à 1550 nm. L'expression de la puissance obtenue en réflectométrie P_R suit une loi exponentielle qui peut s'écrire de la manière suivante :

$$P_R = r.P_0 \exp(-2\alpha L) \quad (\text{III.1})$$

Le signal se propageant dans une fibre va perdre progressivement de sa puissance jusqu'à atteindre des niveaux trop faibles par rapport à la sensibilité du réflectomètre. Cela limite donc potentiellement la portée de mesure des interrogateurs à fibre optique. Dans le cas de la réflectométrie optique, nous notons qu'il faut prendre en compte le double d'atténuation puisque le signal optique effectue le trajet aller et retour dans la fibre. Ce phénomène est donc à l'origine de la dégradation du rapport signal sur bruit de la mesure B-OTDR le long d'une fibre optique. C'est ainsi que l'on observe, lors de la qualification des appareils en répétabilité, une dégradation de la mesure suivant une loi exponentielle comme le montre la [Figure III.1](#).

Cette figure, déjà présentée précédemment et que l'on rappelle ici, est une courbe de la répétabilité de mesure pour une fibre optique de longueur 50 km et présentant une atténuation de 0,2 dB/km. Le paramètre que nous souhaitons cette fois mettre en valeur sur ce graphe est la dégradation de la répétabilité liée

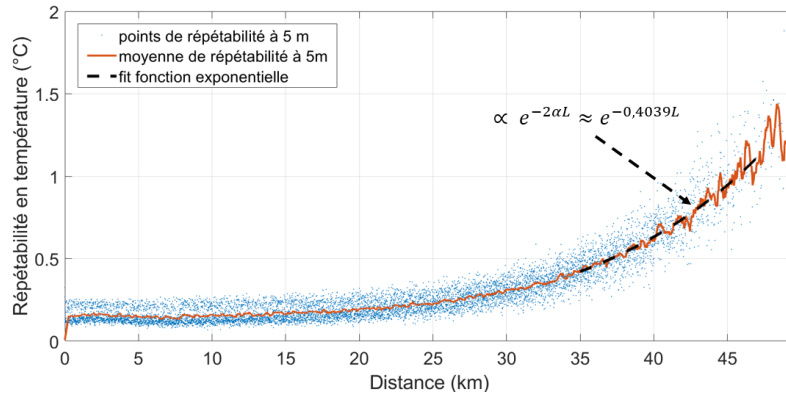


FIGURE III.1 – Evolution exponentielle de la répétabilité de mesure liée à l'atténuation optique dans la fibre

aux pertes optiques dans la fibre. Cette courbe suit en effet une loi exponentielle qui confirme l'influence des pertes optiques sur la qualité de la mesure répartie par fibre optique en fonction de la distance.

Une solution pour résoudre cette limitation sur la portée de mesure serait donc d'augmenter la puissance optique du signal lumineux injecté dans la fibre. Cela permettrait d'allonger la distance pouvant être parcourue par le signal optique. Cependant lorsque de fortes puissances optiques sont injectées dans une fibre, de nombreux phénomènes non-linéaires apparaissent au sein de la fibre perturbant le signal optique et dégradant encore plus fortement la mesure.

III.A.2 Limitations liées aux effets non-linéaires dans la fibre optique

Comme nous l'avons évoqué dans le premier chapitre (I.B.2), certains effets non-linéaires apparaissent lorsqu'un signal lumineux se propage dans une fibre optique. Parmi ces phénomènes, certains seront très importants lorsque l'on souhaite réaliser une mesure distribuée par fibre optique comme l'effet Kerr ou encore le phénomène de diffusion Brillouin stimulée. Nous allons tout d'abord présenter l'effet Kerr qui est le principal effet perturbant la mesure par fibre optique.

III.A.2.a L'effet Kerr

L'effet Kerr est un effet non linéaire du troisième ordre lié à la susceptibilité Kerr $\chi^{(3)}$ qui se produit dans tous les milieux matériaux. Ce phénomène correspond à une dépendance de l'indice de réfraction du milieu non-linéaire en fonction de l'intensité de l'onde qui le traverse. Nous pouvons définir la modulation de l'indice de réfraction par l'effet Kerr optique suivant la relation :

$$n(t) = n_0 + n_2 I(t) \quad (\text{III.2})$$

où n_0 est l'indice de réfraction linéaire du milieu, n_2 l'indice de réfraction non linéaire dépendant de la susceptibilité électrique d'ordre 3 et I l'intensité du champ incident (en W/m^2) dans le temps.

Plusieurs phénomènes vont découler de cet effet physique dont un qui est important à prendre en compte lorsque l'on étudie les capteurs de mesure répartie par fibre optique : l'auto-modulation de phase. D'autres effets tels que la modulation de phase croisée ou encore le mélange à quatre ondes découlent également

de l'effet Kerr mais sont très peu rencontrés dans le domaine de mesure par fibre optique. Nous ne les détaillerons donc pas et invitons le lecteur à se référer au travail de AGRAWAL [25] s'il souhaite plus d'informations sur le sujet.

III.A.2.b L'auto-modulation de phase

L'auto-modulation de phase (SPM pour "Self Phase Modulation") est un effet qui apparaît lors de la propagation d'une impulsion brève dans une fibre [25]. Cet effet est donc particulièrement important dans le cadre de l'instrumentation optique par réflectométrie puisque celle-ci nécessite l'utilisation d'impulsions optiques de durées de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. Nous avons vu que l'effet Kerr induit dans une fibre optique une variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité du champ incident. Cette variation va créer, au cours de la propagation de l'impulsion dans une fibre de longueur z , un décalage progressif de la phase instantanée de l'impulsion ("chirped pulse") telle que la phase non-linéaire additionnelle s'exprime :

$$\phi_{NL}(t) = n_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) z I(t) \quad (III.3)$$

Ce décalage de la phase va induire un élargissement fréquentiel de l'impulsion dont la variation sera donnée par :

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\phi_{NL}(z,t)}{dt} = -n_2 \left(\frac{\omega}{c_0} \right) z \frac{dI(t)}{dt} \quad (III.4)$$

Cette équation montre clairement que l'auto-modulation de phase est susceptible d'impacter les signaux dont l'intensité est constamment en évolution. Typiquement, ce phénomène sera beaucoup plus présent sur une impulsion gaussienne que rectangulaire. Ce qui est le cas pour notre interrogateur B-OTDR dont les impulsions de 10 et 20 ns peuvent être assimilées à des gaussiennes du fait du temps de montée du modulateur acousto-optique.

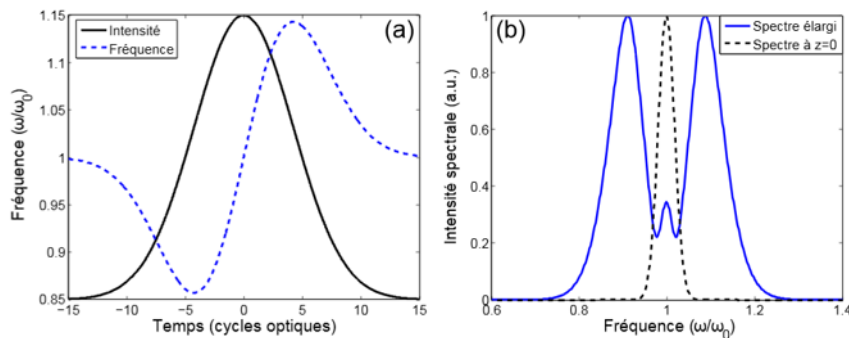


FIGURE III.2 – Variation de la fréquence instantanée (a) et spectre (b) d'une impulsion gaussienne induite par le phénomène de SPM [88]

La Figure III.2, est une simulation représentant en (a) la forme d'une impulsion optique gaussienne (en noir) et son évolution fréquentielle dans le temps liée au déphasage non-linéaire (en bleu). En (b), on observe le spectre optique initial en noir et le spectre optique déformé lié à la SPM en bleu. De plus, ce phénomène s'amplifie avec la longueur de la fibre comme le montre la dépendance en z de l'équation III.3 et les résultats de l'étude de FOALENG et al. [89].

Ce phénomène va avoir un impact sur la mesure B-OTDR puisque l'impulsion optique se propageant dans la fibre étant déformée spectralement, elle voit son interaction avec la fibre modifiée par rapport à une impulsion qui ne subit pas de SPM. Cela entraîne un élargissement du spectre de gain Brillouin puisque celui-ci résulte de la convolution entre le spectre de l'impulsion optique et le spectre naturel de gain Brillouin de la fibre optique. A ce phénomène, nous devons également ajouter le processus de diffusion stimulée Brillouin qui perturbent également la propagation d'un signal optique incident par transfert d'énergie de l'onde optique vers le milieu matériel de la fibre.

Nous allons maintenant présenter l'impact de cette modification du signal sur la mesure B-OTDR et observer à quel point cela perturbe le signal rétrodiffusé.

III.A.3 Impact des effets non-linéaires sur la mesure B-OTDR

Les effets non-linéaires sont à prendre en compte lors d'une mesure B-OTDR et ils entraînent des limitations dans le paramétrage de la mesure dont notamment la portée maximale de l'interrogateur.

III.A.3.a Impact de l'auto-modulation de phase sur la mesure B-OTDR

Nous avons présenté le phénomène d'auto-modulation de phase qui déforme le spectre d'une impulsion optique courte se propageant dans une fibre optique. Les mesures optiques en réflectométrie B-OTDR utilisent des impulsions optiques pour sonder la fibre et sont donc sensibles à ce phénomène qui engendre des limitations sur la puissance injectée dans la fibre par l'interrogateur.

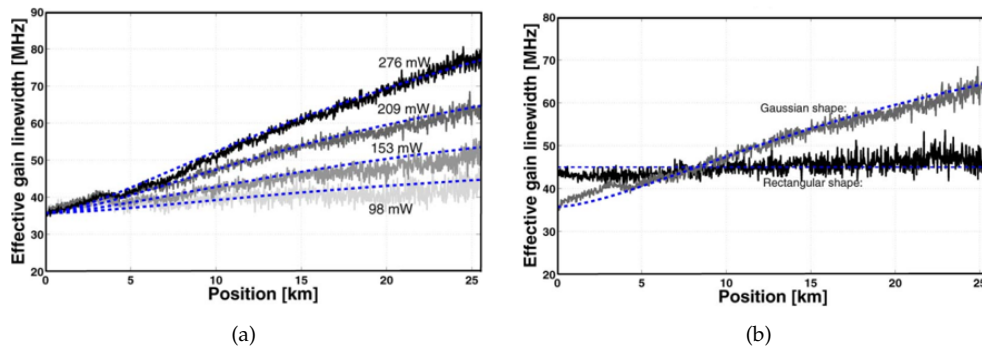


FIGURE III.3 – (a) Évolution du spectre Brillouin en fonction de la distance et de la puissance de l'impulsion incidente pour une impulsion gaussienne de 30 ns. (b) Évolution du spectre Brillouin en fonction de la distance et de la forme de celle-ci pour une impulsion de 30 ns et une puissance crête de 222 mW [89]

La Figure III.3, issue de l'étude de FOALENG et al. [89], montre l'évolution le long de la fibre optique de l'élargissement du spectre de rétrodiffusion Brillouin en fonction de la puissance optique d'une impulsion de 30 ns injectée dans la fibre. Ce graphique montre bien que plus l'impulsion optique est puissante, plus le spectre de gain Brillouin s'élargit durant la propagation. D'après ces résultats, on estime qu'une augmentation de la puissance optique entraîne un élargissement du spectre de diffusion Brillouin pouvant aller jusqu'à 80 MHz de largeur pour une puissance de l'impulsion de 276 mW. Ce qui est plus du double de la largeur initiale. Par ailleurs, le deuxième graphique de cette figure montre l'évolution de la largeur spectrale Brillouin suivant une impulsion gaussienne et une

impulsion rectangulaire. A puissance égale, la forme de l'impulsion peut également entraîner un élargissement du spectre de plus 20 MHz. Il est dans ce cas préférable d'avoir une impulsion rectangulaire qui limite cet effet.

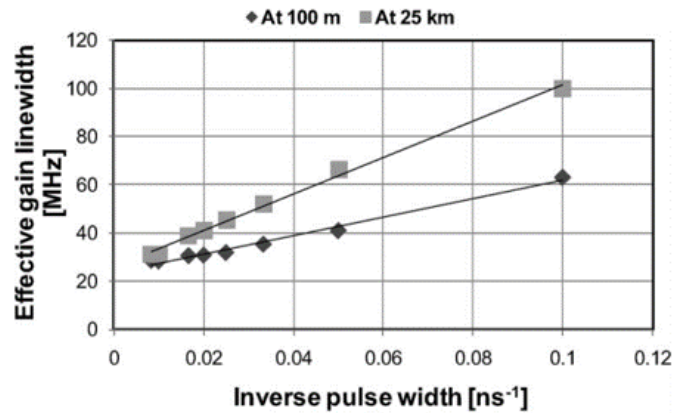


FIGURE III.4 – Variation de la largeur spectral de diffusion Brillouin créée par une impulsion optique de 30 ns et de puissance crête 153 mW en fonction de l'inverse de la taille temporelle du pulse. [89]

La Figure III.4, montre l'élargissement spectral en fonction de l'inverse de la taille de l'impulsion optique à deux distances différentes. Ces mesures ont été réalisées pour une puissance crête de l'impulsion de 153 mW qui équivaut à environ 22 dBm. Nous observons que la largeur temporelle de l'impulsion optique a également un impact sur l'effet de SPM et qu'il est préférable de privilégier des impulsions de durée longue pour réduire ce phénomène. Cependant dans le cadre de mesures par réflectométrie optique, la largeur temporelle de l'impulsion optique correspond à la résolution spatiale de la mesure désirée. Ce paramètre n'est donc pas ajustable. Cette étude menée par FOALENG et al. [89] a été réalisée en étudiant le spectre de gain Brillouin mesuré par un interrogateur B-OTDA. Ces résultats sont cependant transposables à une mesure B-OTDR et nous allons présenter des mesures B-OTDR dégradées par ce phénomène non-linéaire.

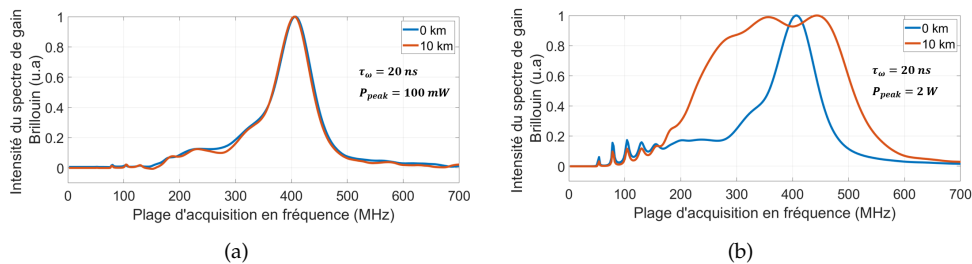


FIGURE III.5 – (a) Spectre Brillouin en début et fin de fibre pour une impulsion de 20 ns à 100 mW de puissance crête. (b) Spectre Brillouin en début et fin de fibre pour une impulsion de 20 ns à 2 W de puissance crête.

Les Figures III.5a et III.5b montrent la mesure du spectre de gain Brillouin réalisée par notre interrogateur sur le premier et dernier point d'une fibre optique de 10 km. Les impulsions optiques utilisées ont une largeur temporelle initiale de 20 ns et des puissances crêtes respectives de 100 mW et 2 W (20 et 33 dBm). La durée d'impulsion choisie est suffisamment faible pour générer de la SPM mais

suffisamment grande pour limiter l'élargissement du spectre de gain Brillouin lié à la convolution entre l'impulsion optique et le spectre naturel de gain Brillouin. Sur la Figure III.5a, nous n'observons quasi aucune différence entre le spectre de gain Brillouin mesuré en début de fibre et celui mesuré à 10 km de l'interrogateur. Nous notons une forme asymétrique du spectre liée à un second pic Brillouin généré par un mode acoustique d'ordre supérieur [31]. En effet, la fibre de test utilisée pour ces mesures est une SMF28e+ fabriquée par Corning qui présente effectivement plusieurs modes acoustiques d'ordre supérieur [90]. Sur la Figure III.5b, on observe un élargissement du spectre Brillouin de 150 MHz entre le début de la fibre et 10 km plus loin. L'élargissement du spectre est d'autant plus grand que la puissance de l'impulsion est importante et dans notre cas, cette puissance est presque 10 fois supérieure à celle utilisée dans l'étude de FOALENG et al. [89].

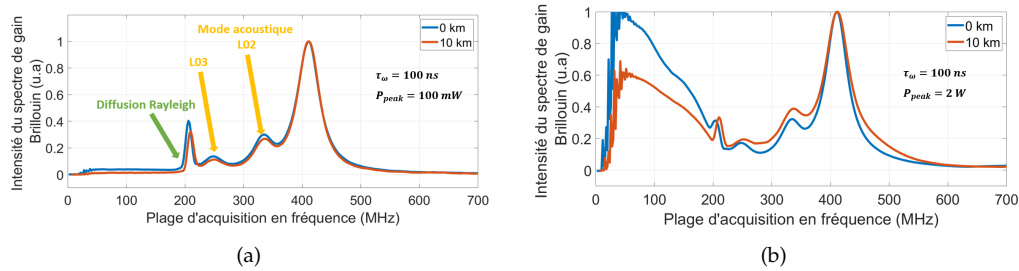


FIGURE III.6 – (a) Spectre Brillouin en début et fin de fibre pour une impulsion de 100 ns à 100 mW de puissance crête. (b) Spectre Brillouin en début et fin de fibre pour une impulsion de 100 ns à 2 W de puissance crête.

Les Figures III.6a et III.6b représentent la même mesure mais cette fois-ci avec une impulsion de 100 ns. On constate tout d'abord que l'augmentation de la taille de l'impulsion, de 20 ns à 100 ns, rend plus visible la contribution des modes acoustiques d'ordre supérieur de cette fibre¹. Cela s'explique par une puissance de signal plus élevée et un spectre mesuré plus fin du fait de la convolution entre le spectre Brillouin de la fibre et celui de l'impulsion. Par ailleurs, on note également un pic à 200 MHz lié à l'apparition de la diffusion Rayleigh sur le spectre comme nous l'avons déjà évoqué en partie II.B.1.e. On observe, entre ces deux figures, un élargissement du spectre de gain Brillouin quasi-nul à mi-hauteur (3 MHz) et un élargissement faible au niveau de la base de la lorentzienne (≈ 20 MHz) lié à la remontée du niveau de bruit par saturation du photodétecteur. Cette saturation est fortement visible à basse fréquence. L'élargissement n'est pas présent sur la partie maximale de la courbe de gain Brillouin et ne perturbe donc pas la mesure fréquentielle du pic Brillouin.

Cette déformation de l'impulsion liée à la SPM est donc responsable d'une incertitude sur la mesure répartie de température qui devient de plus en plus importante avec la distance de fibre mesurée. L'élargissement du spectre Brillouin réduit la fiabilité de la régression parabolique réalisée par le système ce qui implique une incertitude grandissante sur la mesure en fonction de la distance de la fibre.

Cette erreur est observée sur la Figure III.7 où l'on résout correctement la mesure de la fréquence Brillouin lorsque l'impulsion optique est de 100 mW crête à l'inverse de la mesure pour une impulsion de 2 W crête où l'erreur de mesure

1. Les modes acoustiques d'ordre supérieur sont détectés contre-intuitivement à des fréquences inférieures ce qui est lié au processus d'acquisition spécifique de notre interrogateur

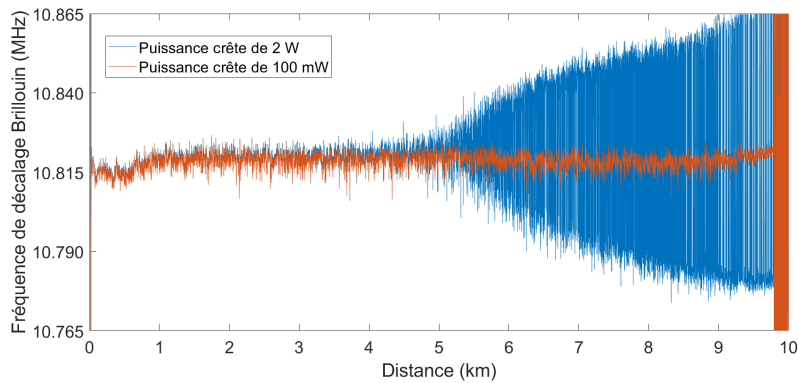


FIGURE III.7 – Mesure distribuée de la fréquence de rétrodiffusion Brillouin pour un impulsion de 20 ns à une puissance crête de 100 mW (courbe rouge). Mesure distribuée de la fréquence de rétrodiffusion Brillouin pour un impulsion de 20 ns à une puissance crête de 2 W (courbe bleue).

de la fréquence est de presque ± 50 MHz. Cette erreur de mesure est causée par l'apparition progressive de deux pics au niveau du spectre, que nous observons en Figure III.8, et qui perturbent la régression parabolique réalisée.

La Figure III.9 présente une comparaison des performances de mesure lorsque le phénomène de SPM est présent et lorsqu'il ne l'est pas. La courbe rouge est réalisée à une puissance d'impulsion de 2 W, et l'on observe une dégradation forte de la répétabilité à partir de 5 km². En comparaison, la courbe bleue réalisée à une puissance d'impulsion de 100 mW ne passe pas au dessus de 1 °C.

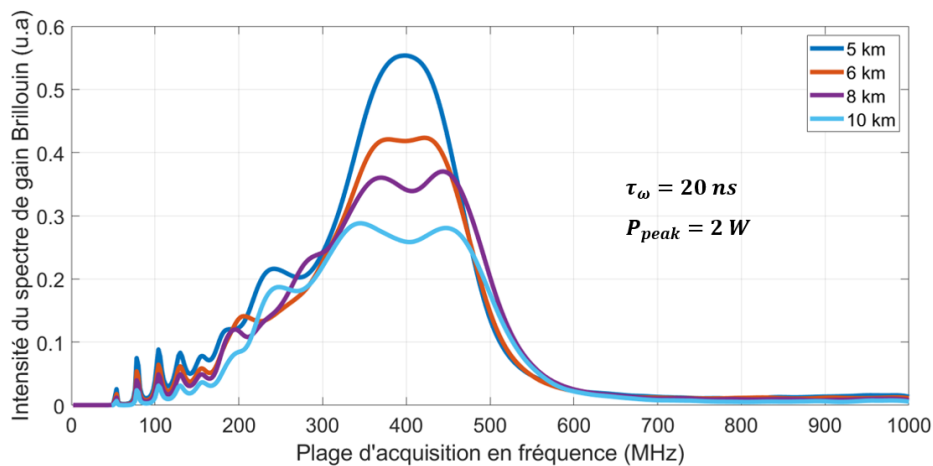


FIGURE III.8 – Évolution de l'effet d'auto-modulation de phase sur le spectre Brillouin mesuré en fonction de la distance de fibre optique pour un impulsion de 20 ns à une puissance crête de 2 W

2. Sur la Figure III.9, la forme de la courbe de répétabilité rouge présente une forme spécifique lié à l'évolution du spectre de gain Brillouin observé en Figure III.8. A partir d'une distance de 5 km les effets de SPM apparaissent dans la fibre optique créant la forme d'un double pic sur le spectre mesuré. Ainsi, la détermination de la fréquence du pic Brillouin suivant l'algorithme défini plus tôt devient de plus en plus incertaine. L'amélioration de la répétabilité entre 6 et 8 km provient de l'élargissement croissant du spectre qui entraîne une meilleure distinction des deux pics présents sur le spectre. La nouvelle dégradation de la répétabilité à partir de 8 km s'explique, comme pour une mesure sans SPM, par la dégradation du signal lié aux pertes optiques linéaires dans la fibre.

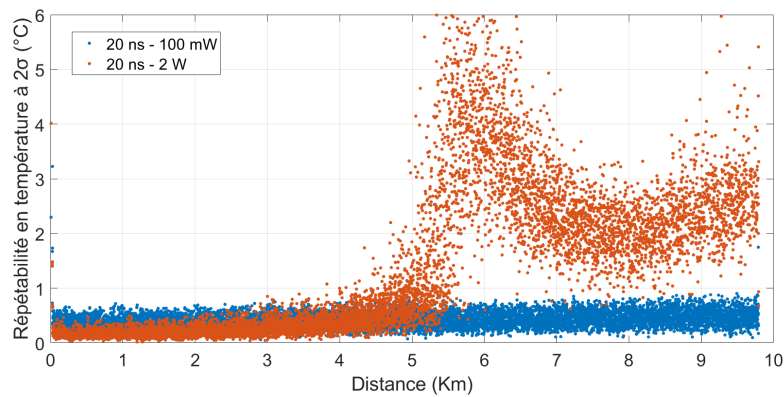


FIGURE III.9 – Impact de l’auto-modulation de phase sur la mesure de répétabilité de l’interrogateur B-OTDR sur une fibre de 10 km avec des impulsions de 20 ns. En rouge l’impulsion optique à une puissance de 2 W et en bleu à 100 mW

III.A.3.b Impact du seuil de diffusion stimulée sur la mesure B-OTDR

Lorsqu’une impulsion optique de faible puissance se propage dans une fibre optique, son interaction avec la matière du milieu génère de la rétrodiffusion Brillouin spontanée. Dans ce cas, la puissance de l’impulsion optique incidente diminue de manière exponentielle en fonction de la distance de fibre parcourue. Par contre dans un régime de rétrodiffusion stimulée, les échanges d’énergie entre l’onde incidente et le milieu de propagation ne sont plus linéaires et l’onde de diffusion Brillouin Stokes va être fortement renforcée au détriment de l’onde de diffusion anti-Stokes.

Ce phénomène apparaît lorsque la puissance seuil Brillouin est atteinte, et donc surtout pour de grandes durées d’impulsion (>20 ns) qui favorisent une puissance optique moyenne importante sur la durée de l’impulsion [91]. Les Figures III.10 et III.11 montrent la comparaison de cette diminution du signal optique dans un régime spontané et dans un régime stimulé sur une fibre de 10 km. La Figure III.10 correspond en (a) à la mesure d’atténuation du signal de diffusion Brillouin le long de la fibre pour une impulsion injectée de 50 ns et de puissance crête 300 mW. La décroissance de l’intensité de diffusion Stokes est uniforme le long de la fibre et suit bien une pente de l’ordre de 0,2 dB/km. Dans ces conditions nous nous assurons d’être dans un régime de diffusion spontanée et ne générons pas d’effet Kerr dans la fibre, comme le montre l’analyse spectrale du signal rétrodiffusé réalisée avec un analyseur de spectre optique en (b). La Figure III.11 représente, quant à elle, la même mesure mais pour une impulsion de 500 ns et une puissance crête de 300 mW. On observe en (a) une plus faible décroissance du signal de diffusion Stokes liée au régime stimulé jusqu’à une distance d’environ 8 km. Au-delà de cette distance, la puissance moyenne de pompe est plus faible, ce qui favorise le régime spontané et la décroissance du signal redevient proche de la valeur traditionnelle de 0,2 dB/km. En (b), on estime, à partir de l’analyse spectrale du signal de diffusion, être dans un régime de diffusion stimulée avec la composante Stokes plus forte de presque 10 dB par rapport à la composante anti-Stokes.

Lors d’une mesure B-OTDR, le régime de diffusion stimulée apparaît donc pour des longueurs d’impulsion importantes générant une puissance moyenne suffisamment forte sur la longueur d’interaction de l’impulsion avec la fibre. Ce

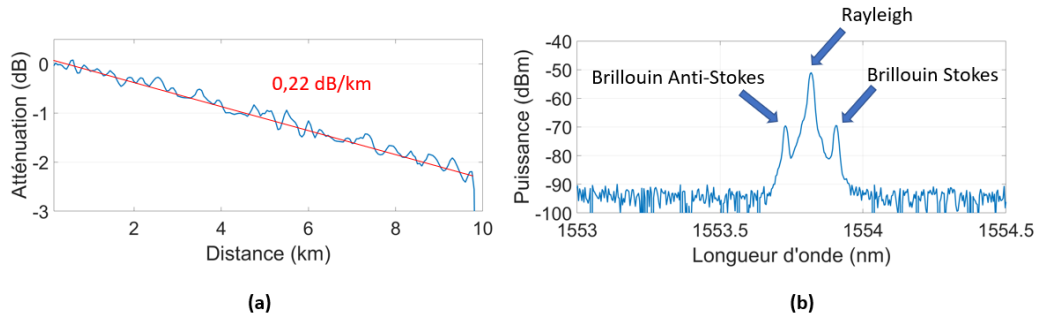


FIGURE III.10 – Courbe d’atténuation de la diffusion Brillouin Stokes dans un régime spontané et analyse spectrale de celle-ci pour une impulsion 50 ns avec une puissance crête de 300 mW.

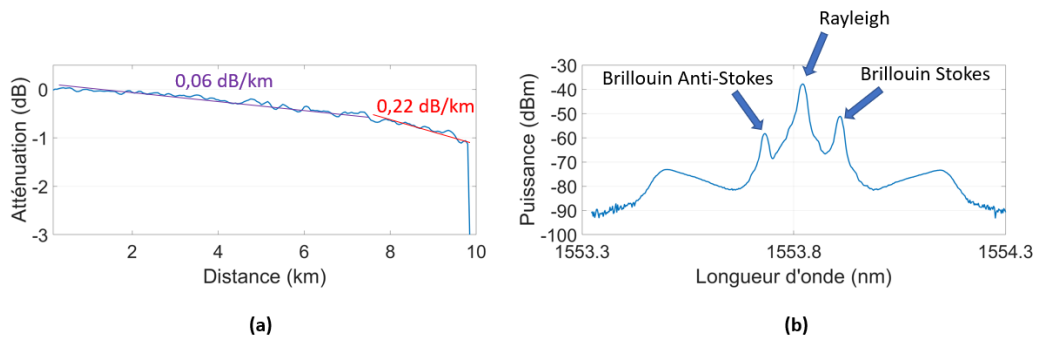


FIGURE III.11 – Courbe d’atténuation de la diffusion Brillouin Stokes dans un régime stimulé et analyse spectrale de celle-ci pour une impulsion 500 ns avec une puissance crête de 300 mW.

phénomène apparaît pour des impulsions de plusieurs dizaines de mètres ce que l’on peut donc rencontrer parfois lors de mesures B-OTDR sur de longues distances. Dans ce cas, la mesure de la diffusion Brillouin Stokes, renforcée par le régime stimulé, est moins perturbée par rapport à la diffusion anti-Stokes, déplétée dans ce régime. La technologie B-OTDR, présentée au Chapitre II, analysant la diffusion Brillouin Stokes nous semble donc adaptée pour des mesures supérieures à 50 km qui nécessitent généralement des résolutions spatiales au-delà de la dizaine de mètres. Pour la suite de ces travaux, nous pouvons donc estimer être peu perturbés par ce phénomène.

III.A.3.c Paramétrage de l’interrogateur pour limiter les effets non-linéaires

La portée des interrogateurs B-OTDRs (mais également de tous les autres types de systèmes optiques fibrés) est donc bridée par les effets non linéaires et l’atténuation linéique dans une fibre optique. Il est donc primordial, lorsque l’on souhaite réaliser une mesure distribuée par fibre optique, de connaître ces limitations en terme de puissance, ce qui permet ainsi d’optimiser les paramètres de l’interrogateur. Le tableau III.1 propose quelques configurations optiques en fonction de la longueur de la fibre et de la résolution spatiale voulue. Ce tableau est établi en connaissance de ces effets dans la fibre et également en fonction des différentes expériences acquises.

Longueur de la fibre	Résolution spatiale	Puissance crête de l'impulsion
< 5 km	<ul style="list-style-type: none"> • ≤ 2 m • ≥ 2 m 	<ul style="list-style-type: none"> • 500 mW • 250 mW
> 5 km	<ul style="list-style-type: none"> • ≤ 2 m • ≥ 2 m 	<ul style="list-style-type: none"> • 250 mW • 100 mW

TABLE III.1 – Tableau des paramètres typiques de la puissance crête utilisée pour limiter les effets non-linéaires.

Lors de la configuration des paramètres de mesure pour un instrumentation, il est généralement défini d'utiliser des paramètres proches de ce qui est proposé dans le tableau précédent. Vient ensuite une phase d'ajustement où la puissance est légèrement modifiée en fonction des caractéristiques de la fibre à instrumenter, comme les pertes optiques présentes ou encore la nature de la fibre pouvant faire varier la puissance de seuil Brillouin.

La contrainte sur les niveaux de puissance des impulsions transmises va induire une limitation de la portée de l'interrogateur B-OTDR. Dans le domaine des télécommunications, l'utilisation de répéteurs optiques, basés sur des technologies d'amplification EDFA, permet de régénérer le signal optique à partir d'une certaine distance de propagation tout en limitant la génération d'effets non-linéaires. Cette méthode pourrait également avoir un réel intérêt dans le domaine de la mesure distribuée par fibre optique comme nous allons le voir dans les paragraphes suivants.

III.B Allongement de la portée de mesure d'un système B-OTDR

Nous venons de voir que l'augmentation de la portée de mesure des interrogateurs Brillouin, notamment les B-OTDRs, ne pouvait être obtenue en augmentant simplement la puissance de sortie de l'interrogateur. Ainsi, la combinaison d'effets non-linéaires qui apparaissent dans une fibre optique est une vraie limite pour la réalisation de mesures distribuées de diffusion Brillouin longue portée au-delà de distances de l'ordre de la centaine de kilomètres. Depuis quelques années, plusieurs études ont été menées par différents groupes de recherche et qui sont présentées en Annexe B. Ce sujet a également été étudié dans le cadre de cette thèse dans le but de proposer un système industriel permettant une augmentation de la portée de mesure sans modification majeure de l'architecture du FEBUS G1-R.

Cette amélioration apporterait un grand intérêt pour le marché de la surveillance de pipelines mais également de câbles de puissance électrique sous-marins, par exemple pour les éoliennes off-shore. Ceux-ci présentant la plupart du temps des longueurs supérieures à la centaine de kilomètres, la limitation en distance de mesure est un des rares freins au déploiement de la technologie à fibre optique dans ce domaine d'application. Une amélioration de la portée de mesure au-delà de 100 km pour un système B-OTDR constituerait une réelle avancée et permettrait à ce type de technologie de se renforcer sur ce marché. Les travaux de cette thèse ont donc eu pour objectif de proposer une solution d'allongement de

la portée, facilement intégrable aux technologies déjà proposées par FEBUS Optics, avec des performances de mesure acceptables pour le marché. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet ANR nommé "SCODE" et porté par FEBUS Optics, Télécom ParisTech et Kraken Subsea Solutions. Le nouveau système mis au point ainsi que les performances de mesure atteintes avec celui-ci seront présentées et commentées.

III.B.1 État de l'art résumé et piste suivie (Annexe B)

La plupart des travaux de recherche réalisés sur le sujet l'ont été en configuration B-OTDA plutôt qu'en configuration B-OTDR, du fait d'un meilleur rapport signal sur bruit. Mais ces études réalisées en configuration B-OTDA restent malgré tout intéressantes à étudier car transposables pour certaines dans une configuration B-OTDR. Nous pouvons classer ces différentes techniques en deux catégories :

— **Les solutions avec modifications de l'interrogateur :**

Nous pouvons citer la technique de codage par impulsions optiques. Cette technique a d'abord été utilisée dans une configuration B-OTDR [92] de manière à augmenter le SNR d'environ 7 dB. Par la suite, la même équipe a cherché à transposer cette technique au B-OTDA, ce qui a permis de réduire la puissance requise sur l'impulsion de pompe afin d'éviter l'effet de l'instabilité de modulation (MI). Ceci a permis également d'améliorer le SNR de l'ordre de 10 dB, sur une distance de 50 km, avec une résolution spatiale de 1 m [93] mais aussi de 0,5 m [94]. Grâce à cette technique de codage par impulsions optiques, la portée de détection a été étendue à 120 km avec une résolution spatiale de 3 m [95] pour un système B-OTDA.

— **Les solutions avec modifications de la ligne optique :**

Afin d'atteindre des portées de plus de 150 km, différentes contributions ont été effectuées en ajoutant des systèmes d'amplification en ligne, en particulier de type EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Le problème est plus complexe dans le cas des capteurs Brillouin car, aussi bien dans le cas des B-OTDAs que des B-OTDRs, l'amplification nécessite d'être bidirectionnelle pour amplifier à la fois l'impulsion et le signal de diffusion. Nous pouvons citer l'ajout d'un EDFA monodirectionnel au milieu de la ligne sur un B-OTDR [96], qui présente l'intérêt d'amplifier le signal impulsionnel mais ne permet pas l'amplification du signal rétrodiffusé ; l'utilisation dans un B-OTDA de différents tronçons de fibre avec des décalages Brillouin différents (pas transposable au B-OTDR) mais surtout l'utilisation d'un système d'amplification bidirectionnelle à base d'EDFAs appliqué au B-OTDA [97, 98] ; l'utilisation d'EDFAs et de trajets différenciés pour la pompe, la sonde et la fibre capteur dans le cas d'un B-OTDA, compliquant nettement le montage mais certainement transposable au B-OTDR [99] ; la mise en place d'une technique de diversité de longueurs d'onde dans le cas d'un B-OTDR, intéressant pour diminuer le temps de mesure dans le cas de très longues distances [100] ; et enfin la mise en place d'un pompage Raman dans le cas d'un B-OTDR [101].

Cette étude bibliographique est détaillée dans l'annexe B de ce manuscrit et nous en présentons ci-après sa conclusion.

Piste suivie durant cette thèse :

L'entreprise FEBUS Optics a observé un réel intérêt des principaux acteurs dans le marché des câbles de puissance électrique sous-marins pour la mesure par fibre optique. Dans ce contexte, l'objectif est de proposer une solution de surveillance en température³ de ce type de câble au moyen de la technologie B-OTDR sur des distances dépassant la centaine de kilomètres avec des résolutions spatiales de l'ordre de 5 ou 10 m, des temps de mesure ne dépassant pas les 15-20 min et une répétabilité de l'ordre de 1,5 °C. Le développement de cette solution a donc été étudié au cours de cette thèse avec comme objectif de limiter la complexité du système et les coûts de développement pour proposer une solution industrielle compétitive. C'est ainsi que nous avons opté pour une technique permettant cette évolution sans que cela ne modifie profondément le fonctionnement et l'architecture des interrogateurs FEBUS G1-R. Nous avons donc décidé d'explorer la technique d'amplification bidirectionnelle au moyen de systèmes EDFAs en nous appuyant sur les travaux réalisés par DONG, CHEN et BAO [97]. En effet cette méthode a démontré des résultats encourageants comme nous l'avons dit dans l'étude bibliographique. Par ailleurs, dans des conditions réelles de déploiement de câbles sous-marins, il est tout à fait envisageable de venir, à plusieurs dizaines de kilomètres d'intervalle, connecter au câble des modules étanches contenant les répéteurs optiques, alimentés électriquement par le câble instrumenté.

III.B.2 Module de ré-amplification du signal sonde et du signal rétrodiffusé

III.B.2.a Conception d'un module de ré-amplification pour une mesure B-OTDR

La solution envisagée a donc été le développement de modules d'amplificateurs bidirectionnels au moyen de systèmes EDFAs.

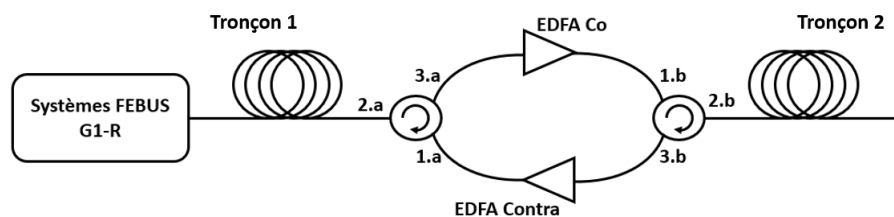


FIGURE III.12 – Schéma optique du module d'amplification bidirectionnelle

La Figure III.12 présente le schéma optique standard d'un module de ré-amplification optique bidirectionnel utilisé durant cette thèse [97]. Un équipement B-OTDR est connecté à une fibre de mesure, et le module de ré-amplification optique est connecté au bout de cette fibre. Celui-ci est constitué d'un premier circulateur dont le port 2 est connecté à l'extrémité de la première fibre de mesure. Le signal impulsionnel est ensuite amplifié par l'EDFA, appelé "EDFA Co",

3. La mesure de déformation des câbles est également une problématique importante pour éviter toute rupture du câble durant son déploiement mais également durant toute la période où celui-ci est en opération. En effet, les dégâts sur les câbles sont responsables de coûts d'assurance représentant des budgets très importants. Cependant la mesure de déformation sur ce type de câble est complexe et nécessite une géométrie et un agencement spécifique pour que les contraintes perçues par l'armature du câble soient transmises à la fibre de manière représentative. Ce sujet n'a pas été traité au cours de cette thèse.

pour être par la suite envoyé dans le second tronçon de fibre à mesurer grâce à un deuxième circulateur optique. Le signal continu qui est rétrodiffusé dans le tronçon 2 est renvoyé dans le deuxième EDFA, appelé "EDFA Contra", par le biais du deuxième circulateur. Le signal rétrodiffusé amplifié est réinjecté dans le tronçon 1 pour être analysé par l'interrogateur Brillouin. On remarque donc que l'amplificateur "EDFA Co" a pour rôle de ré-amplifier un signal impulsionnel tandis que le "EDFA Contra" nécessite de ré-amplifier un signal continu de très faible puissance puisqu'issu de la rétrodiffusion dans la fibre optique. Ainsi, il est possible d'envisager que l'amplificateur co-directionnel (par rapport au signal de pompe) soit un amplificateur optimisé pour un fonctionnement en régime impulsionnel, ce qui présente l'avantage de limiter le bruit ASE généré entre les impulsions. L'amplificateur contra-directionnel est un amplificateur en régime continu avec un faible niveau de puissance en entrée. La suite de cette partie décrit en détail les différentes optimisations apportées au système d'amplification bidirectionnel. La méthodologie a été réalisée de manière empirique où nous avons cherché, dans un premier temps, à déterminer la configuration optimale des EDFAs pour ensuite évaluer les performances de mesure avec un module de ré-amplification puis avec deux modules. Nous nous sommes attachés à étudier les différents verrous à lever :

- distance optimale entre les répéteurs ;
- puissance requise en entrée de ligne ;
- puissance requise en sortie de chaque amplificateur ;
- caractéristiques optimales des amplificateurs requis ;
- besoin ou non de filtrer l'émission spontanée amplifiée générée par les amplificateurs optiques ;
- performances obtenues ;
- améliorations envisageables.

La première question à laquelle nous pouvons déjà proposer un élément de réponse est celle sur la distance optimale entre les répéteurs. En effet pour répondre à cette question, nous nous sommes appuyés sur les performances de l'interrogateur FEBUS G1-R à longue portée pour des résolutions spatiales de 5 m et 10 m et des temps de mesure ne dépassant pas 20 min.

En effet, nous constatons sur la Figure III.13 des performances en répétabilité à 50 km de l'ordre de 1,5 °C pour 5 m de résolution spatiale et 0,5 °C pour 10 m de résolution spatiale, le tout pour un temps de mesure de 10 min et une puissance de l'impulsion optique injectée de 251 mW (24 dBm). De manière à rester dans l'objectif d'une répétabilité inférieure à 1,5 °C pour un temps de mesure ne dépassant pas les 15-20 min, nous avons donc décidé de fixer la distance optimale entre les répéteurs à 50 km. Nous confirmerons ce choix dans la partie III.B.2.b.i. Ces mesures, réalisées pendant un temps de 10 min, peuvent bien évidemment être améliorées en augmentant le temps de mesure et donc le moyennage. Cependant dans le cas d'une surveillance réelle de câble sous-marins, il est préférable que l'opérateur du câble puisse être le plus réactif possible en cas de défaut. Ainsi, la possibilité d'une détection d'un défaut en seulement 10 min, au lieu des 15-20 min maximales acceptées par l'opérateur, est un argument commercial fort et sera donc notre cible pour cette étude.

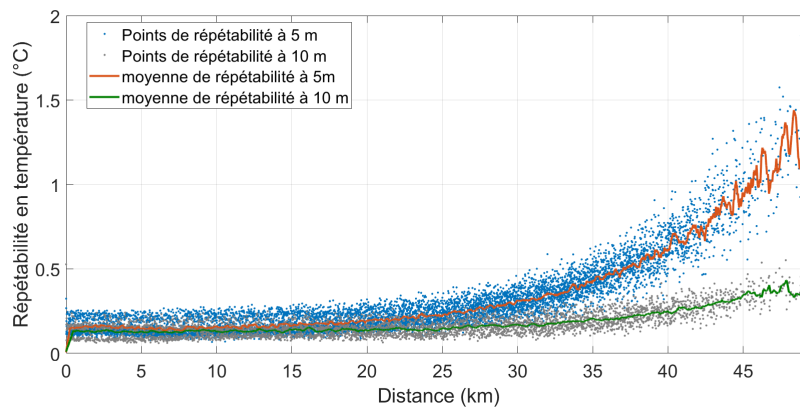


FIGURE III.13 – Répétabilité de la mesure de l'interrogateur FE-BUS G1-R sur 50 km de fibre optique sans module de ré-amplification optique

La configuration optique pour les premiers essais de cette étude sera donc finalement comme présentée sur la Figure III.12 avec des tronçons de fibre optique de 50 km. Cette première configuration a été étudiée dans un premier temps pour ensuite envisager une augmentation plus importante de la portée de mesure en enchaînant les modules répéteurs pour atteindre un objectif de distance de mesure de 150 km.

III.B.2.b Modules de régénération du signal optique

Deux types d'amplificateurs ont été testés durant les travaux de cette thèse. Les premiers sont des amplificateurs de laboratoire de type "tests et mesures". Les seconds sont des amplificateurs compacts et facilement intégrables en un module autonome pouvant par la suite être placé dans des environnements moins cléments qu'un laboratoire. Ces deux types d'amplificateurs reposent sur la technologie EDFA de fibre dopée à l'erbium, technologie la plus commune notamment dans le milieu des télécommunications. Nous avons dans un premier temps utilisé les amplificateurs "tests et mesures" pour la caractérisation du montage optique et l'optimisation des paramètres des EDFAs, car leurs paramètres de fonctionnement peuvent être facilement modifiés (puissance de pompe, niveau de puissance de sortie, gain, ...). Puis nous avons réalisé les essais d'allongement de la portée de mesure avec les amplificateurs compacts qui seront intégrés dans la solution industrielle. Nous détaillons les amplificateurs ci-après.

Amplificateurs "tests et mesures" :

Ces amplificateurs sont dédiés à une utilisation en laboratoire pour des applications dans le domaine des télécommunications. Il s'agit d'amplificateurs fonctionnant en régime CW, avec une fibre dopée erbium et dont la puissance de sortie maximale est fixée à 13 dBm avec un facteur de gain pouvant aller jusqu'à 50 dB. Ce type d'amplificateur présente un régime d'amplification typique avec un gain maximum lorsque la puissance d'entrée est faible (régime petit signal) et une saturation du gain lorsque la puissance augmente.

Amplificateurs compacts intégrables en module :

Ces amplificateurs sont présentés sous forme de modules compacts (150 mm x 125 mm x 25 mm) avec une consommation électrique faible (20 W pour une tension de 24 V) ce qui leur permet d'être facilement utilisables sur le terrain. Ces amplificateurs sont divisés en deux catégories : la première consiste en des amplificateurs CW avec une faible puissance de sortie, typiquement -10 dBm et un gain de l'ordre de 20 dB. Ce type d'amplificateur est destiné, dans notre configuration en Figure III.12, à amplifier le signal de rétrodiffusion. La seconde catégorie est constituée d'amplificateurs pulsés dont l'avantage principal est de permettre l'amplification d'une impulsion sans pour autant avoir un fond continu lorsque le signal est absent. L'amplificateur pulsé permet une puissance crête de sortie de l'ordre de 15 dBm et un gain d'environ 10 dB. Dans notre application, le paramètre pulsé semble pertinent puisque la mesure par réflectométrie consiste en l'envoi d'impulsions optiques dans la fibre. Ainsi, dans notre configuration de ré-amplification, ce type d'amplificateur est placé dans le sens de propagation de l'impulsion.

III.B.2.b.i Étude de la dégradation du signal après propagation dans N km de fibre puis passage dans un amplificateur unidirectionnel

Le but de cette expérience préliminaire est d'étudier l'évolution d'un signal continu au passage d'un module d'amplification unidirectionnel (Figure III.14) en fonction de la longueur de fibre parcourue avant l'amplificateur (tronçon 1). Au fur et à mesure de la propagation, le signal s'atténue, diminuant ainsi la puissance en entrée de l'amplificateur. Nous avons volontairement ajouté dans la ligne de transmission tous les éléments qui seront présents dans le module bidirectionnel, notamment les circulateurs, afin de se rapprocher au mieux de la configuration finale. Comme le montre la Figure III.14, le signal, après avoir été pré-amplifié par l'EDFA 0, est envoyé dans le tronçon 1 de fibre de 50, 60, ou 80 km. L'évolution des OSNRs en différents endroits au cours de la propagation a été relevée (points A et B) grâce à un analyseur de spectre optique avec une résolution de 0,1 nm. Les résultats sont rassemblés dans le tableau III.2 ci-après. Ces mesures ont été réalisées pour deux réglages de la puissance de sortie de l'amplificateur (12,2 dBm et 9,2 dBm), c'est-à-dire en ajustant la puissance de pompe de l'EDFA 1.

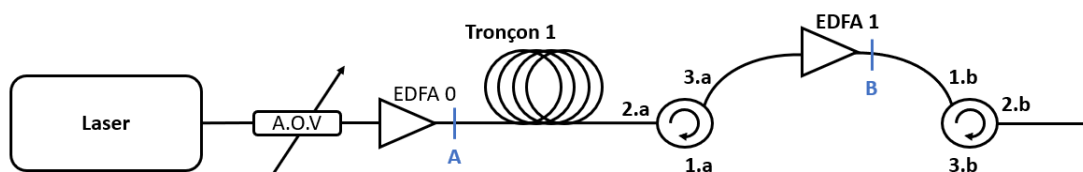


FIGURE III.14 – Schéma des essais d'amplification unidirectionnelle.

Il est intéressant d'étudier l'évolution de la dégradation de l'OSNR en fonction de la longueur du tronçon 1, c'est-à-dire la différence entre l'OSNR au point A et celui au point B. Plus le tronçon est long, plus la dégradation est importante. Pour les tronçons de 50 km et 60 km, cette dégradation est très faible de l'ordre

Longueur de la fibre	50 km	60 km	80 km
EDFA 1 (dBm)	12,2		
OSNR en A (dB)	29,44	27,05	27
OSNR en B (dB)	29,3	26,8	20
EDFA 1 (dBm)	9,2		
OSNR en A (dB)	26,18	26,79	26
OSNR en B (dB)	26	26,6	18

TABLE III.2 – Tableau de la mesure OSNR en différents points du montage de l'amplification unidirectionnelle.

de quelques dixièmes de dB, et ce, quel que soit le point de fonctionnement de l'EDFA 1. Au-delà de cette distance, la dégradation augmente pour être catastrophique à partir de 80 km. Pour notre application, plus l'OSNR se dégrade, plus le rapport signal à bruit en détection se détériore et dégrade fortement le taux de répétabilité des mesures. Cela confirme que des tronçons entre 50 et 60 km semblent raisonnables pour notre application et seront étudiés par la suite compte tenu des pertes linéiques de la fibre de 0.2 dB/km, engendrant des pertes totales entre les répéteurs de 10 à 12 dB. Par ailleurs, cette distance de 50-60 km est en adéquation avec les performances en répétabilité de notre système de mesure illustrées en Figure III.13. En effet, à ces distances-là, les performances de l'interrogateur commencent à dépasser les seuils acceptables et il semble donc judicieux de ré-amplifier le signal optique de manière à retourner à des valeurs de répétabilité de mesure proches de ce que nous avons en début de fibre. Ainsi pour la suite de ces travaux, les tronçons de fibre optique entre chaque module de ré-amplification ont été disposés après des distances de 50 km.

III.B.2.b.ii Performances de l'amplificateur contra-propagatif inclus dans le module d'amplification bidirectionnelle

Le schéma de l'expérience est celui de la Figure III.12. La longueur du tronçon 1 est de 50 km. Les deux EDFAs utilisés sont identiques et ont une puissance de sortie maximale de 13 dBm et un gain petit signal de 30 dB. La résolution spatiale a été fixée à 10 m pour cette étude préliminaire. La puissance en sortie de l'amplificateur "EDFA Co" a été fixée à 10 dBm de manière à compenser les pertes optiques de 0,2 dB/km sur 50 km de fibre. Les cartographies des décalages Brillouin mesurés après détection par l'interrogateur B-OTDR sont présentées ci-dessous (Figure III.15). Seule la puissance en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra" varie entre 3 dBm (a), 0.6 dBm (b) et -1.1 dBm (c) en faisant varier sa puissance de pompe.

Les niveaux de puissance, affichés sur les cartographies par le biais des flèches, ont été relevés aux alentours de 0 km et 50 km sur le signal et sur le bruit afin de déterminer l'évolution du rapport signal à bruit en détection. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant III.3.

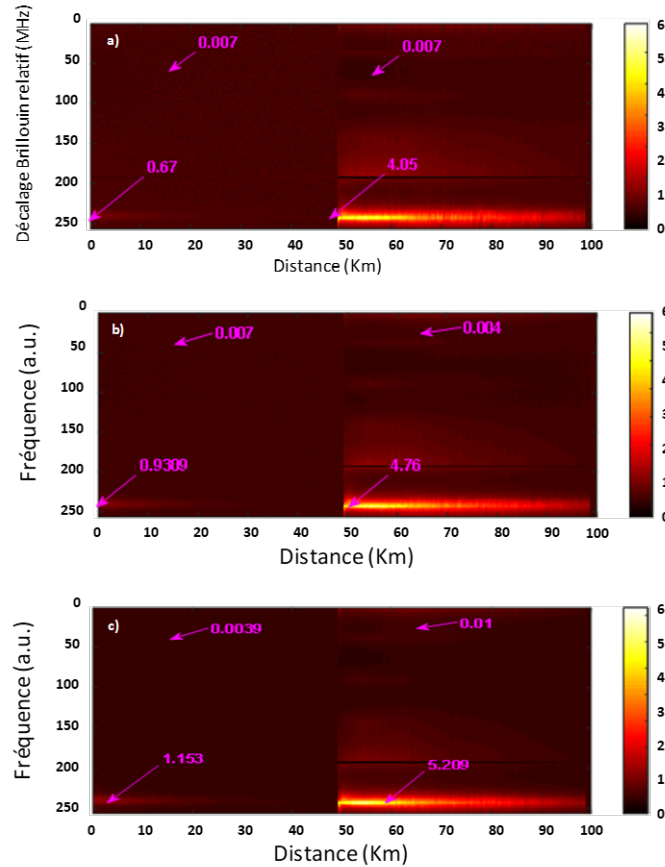


FIGURE III.15 – Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré pour une amplification bidirectionnelle en fonction de la puissance de sortie de "EDFA Contra". Pour -1,1 dBm en (a), pour 0,6 dBm en (b) et pour 3 dBm en (c).

$P_{\text{out_EDFAContra}}[\text{dB}]$	S/N [dB] à 0 km	S/N [dB] à 50 km
- 1,1	24	27,2
0,6	21	30
3	19,1	27

TABLE III.3 – Tableau du rapport signal à bruit de la mesure B-OTDR suivant le paramétrage de l'amplificateur "EDFA Contra"

Conclusion : On constate que lorsque la puissance en sortie de l'amplificateur de retour est trop importante, le SNR en détection sur les cartographies, notamment à 0 km, se dégrade. La puissance trop forte ou l'ASE générée par l'EDFA 2 semblent ajouter du bruit à la détection. Ceci est visible par l'augmentation très nette du bruit en dehors du signal sur les cartographies.

III.B.2.b.iii Variation de la puissance de sortie de l'amplificateur contra-propagatif par ajout d'un atténuateur

Afin de comprendre l'origine de la dégradation du rapport signal à bruit (effets non linéaires, saturation du détecteur ou éblouissement du détecteur par l'ASE générée par les amplificateurs), nous avons étudié l'influence de la puissance de sortie de l'amplificateur "EDFA Contra" sans changer son point de fonctionnement afin de conserver un OSNR constant entre chaque mesure. Nous avons donc introduit un atténuateur variable juste à sa sortie comme on peut le voir sur la Figure III.16. Les puissances de sortie des deux EDFAs sont fixées à 10 dBm. L'atténuateur permet ensuite de diminuer la puissance injectée dans le tronçon 1 de retour, juste avant le détecteur. Des cartographies sont présentées Figure III.17 pour une atténuation de 10 dB (a) et 13 dB (b) avec une puissance de sortie d'amplificateur de 13 dBm. Nous étudierons dans le paragraphe suivant l'influence de l'ASE en insérant un filtre au même endroit.

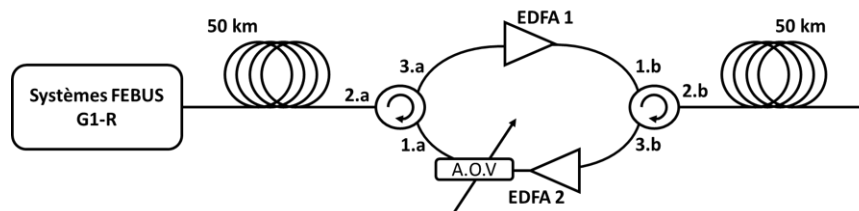


FIGURE III.16 – Schéma de la configuration bidirectionnelle avec l'ajout d'un atténuateur

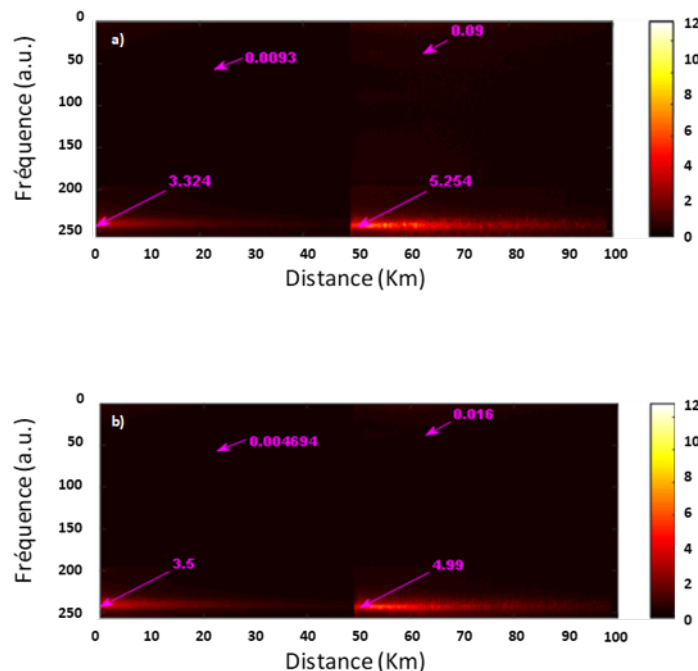


FIGURE III.17 – Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré en fonction de l'atténuation au niveau de la sortie de l'amplificateur "EDFA Contra". En (a), une atténuation de 10 dB et en (b) une atténuation de 13 dB.

Les résultats sont donnés dans le tableau III.4.

Atténuation en sortie de "EDFA Contra"	S/N [dB] à 0 km	S/N [dB] à 50 km
10	25,5	17,6
13	28,72	25

TABLE III.4 – Tableau du rapport signal à bruit de la mesure B-OTDR suivant l'atténuation optique en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra"

Conclusion : On confirme qu'une trop forte puissance en sortie de l'amplificateur de retour dégrade très nettement le rapport signal à bruit sur les mesures, passant de 25 dB à 17,6 dB à 50 km lorsque la puissance est deux fois plus forte, c'est-à-dire quand l'atténuation passe de 13 dB à 10 dB en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra". La raison est la génération d'effets non-linéaires dans la fibre retour quand la puissance injectée est trop forte. Il convient maintenant de voir ce qui se passe si on ajoute un filtre pour supprimer l'ASE afin de savoir si, en plus de la trop forte puissance en entrée de fibre, l'ASE générée par les amplificateurs n'est pas également source de dégradation du SNR des cartographies.

III.B.2.b.iv Ajout d'un filtre en sortie d'EDFA pour filtrer l'ASE

Pour connaître la réelle influence de l'ASE générée par les amplificateurs sur l'OSNR en détection, nous avons ajouté un filtre optique en sortie de l'amplificateur de retour puis regardé l'influence de la largeur de ce dernier (Figure III.18). Nous avons fait varier sa largeur de $\Delta\lambda=1$ nm à $\Delta\lambda=0,4$ nm puis, pour une largeur de $\Delta\lambda=0,4$ nm, fait varier l'atténuation en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra" de 0 à 7 dB. Les puissances de sortie des deux EDFAs sont fixées à 10 dBm. Les cartographies sont présentées Figure III.19.

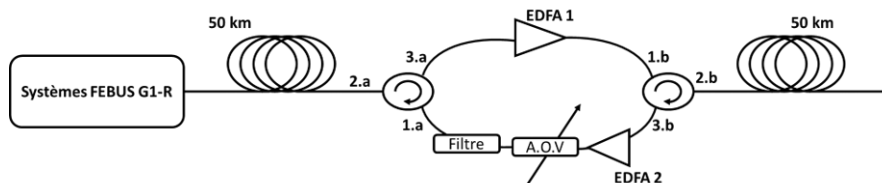


FIGURE III.18 – Schéma de la configuration bidirectionnelle avec l'ajout d'un atténuateur et d'un filtre optique

Les résultats de l'évolution du SNR sur les cartographies en fonction de ces paramètres sont présentés dans le tableau ci-après III.5.

Largeur de filtre et atténuation en sortie de "EDFA Contra" [dB]	S/N [dB] à 0 km	S/N [dB] à 50 km
$\Delta\lambda = 1nm$, Att = 0 dB	21,3	16,6
$\Delta\lambda = 0,4nm$, Att = 0 dB	28,2	28,4
$\Delta\lambda = 0,4nm$, Att = 7 dB	16,1	22,2

TABLE III.5 – Tableau du rapport signal à bruit de la mesure B-OTDR suivant la largeur du filtre optique en sortie de l'amplificateur "EDFA Contra"

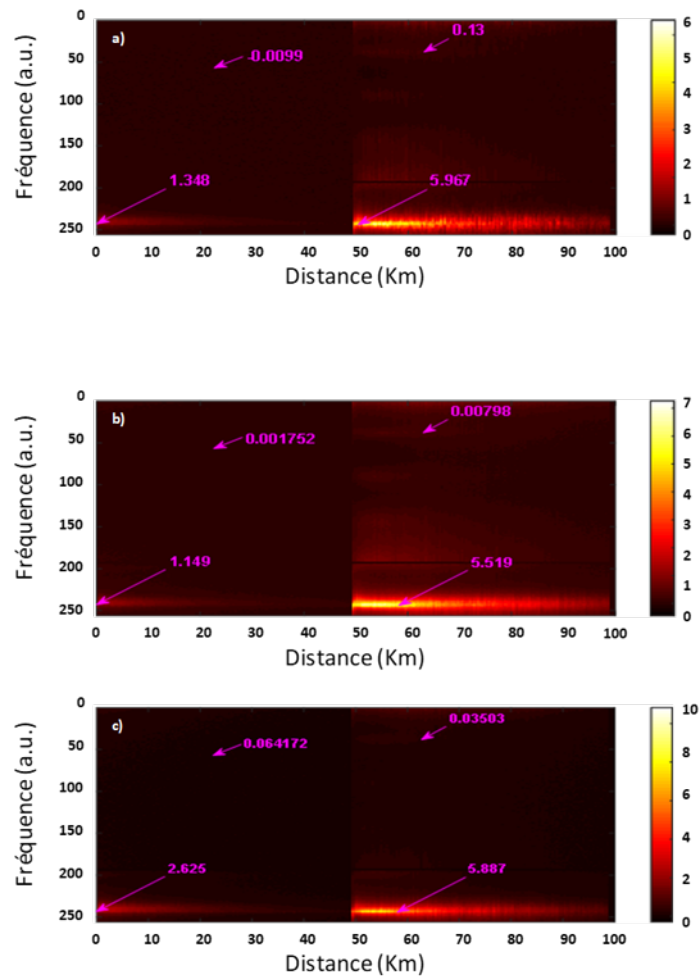


FIGURE III.19 – Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré en fonction de l'atténuation et du filtrage optique au niveau de la sortie de l'EDFA 2

Conclusion : On confirme que l'ASE générée par l'EDFA éblouit le détecteur. Un filtre de 1 nm de large permet de réduire efficacement l'influence de l'ASE. Un filtre plus étroit ne permet pas d'améliorer significativement les mesures et présente de plus le désavantage d'être difficile à centrer sur la longueur d'onde du laser. Cette mesure a été réalisée en plaçant un filtre seulement sur l'amplificateur "EDFA Contra" mais les résultats et conclusions obtenus peuvent également s'appliquer à l'amplificateur "EDFA Co". Nous utiliserons par la suite un filtre de 1 nm à la sortie de chaque EDFA car on peut également supposer que la concaténation de module de ré-amplification risque d'élever le niveau d'ASE généré sur toute la ligne optique.

III.B.2.b.v Paramétrage du module de ré-amplification pour une mesure B-OTDR de 100 km ou plus

Les différents essais réalisés précédemment nous ont permis d'obtenir des réponses sur les questions liées à la configuration des modules de ré-amplification utilisés au niveau de la ligne optique à mesurer. Ces conclusions établies expérimentalement donne une configuration jugée optimale pour notre application et suivie pour le reste des essais réalisés durant ces travaux. Nous présentons dans le tableau III.6 les différents paramètres issus des résultats de ces expérimentations.

Distance de fibre entre chaque module de ré-amplification	50 km
Paramètre de puissance de l'amplificateur "EDFA Co"	≥ 10 dBm
Paramètre de puissance de l'amplificateur "EDFA Contra"	< 0 dBm
Utilisation de filtres optiques en sortie des EDFAs et largeur de ces derniers	Oui / ≤ 1 nm

TABLE III.6 – Tableau du paramétrage préférentiel du module de ré-amplification

III.B.3 Performances métrologiques des modules d'amplification du signal avec le système B-OTDR

Nous avons caractérisé optiquement le système d'amplification bidirectionnel utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche. Nous allons maintenant, en tenant compte des paramètres d'ajustement déterminés précédemment, évaluer les performances de la mesure de température réalisée par l'appareil B-OTDR en présence d'un module de ré-amplification optique. Dans cette partie, nous avons cherché à nous rapprocher le plus possible d'un montage industriel et avons donc utilisé uniquement les amplificateurs compacts. La première mesure a été effectuée sur 100 km de fibre optique avec un module de ré-amplification inséré après une distance de 50 km. Le deuxième essai a cherché à évaluer l'impact d'un deuxième module de ré-amplification sur les performances. Pour cela, la mesure s'est effectuée sur 150 km de fibre avec deux modules de ré-amplification placés tous les 50 km.

III.B.3.a Mesure B-OTDR sur 100 km

Nous avons ici un amplificateur impulsionnel dont l'objectif est d'amplifier l'impulsion optique après propagation dans le premier tronçon de 50 km de fibre, tout en limitant la génération de l'ASE. Puis un amplificateur continu faible puissance dont l'objectif est d'amplifier le signal issu de la rétrodiffusion créée dans le deuxième tronçon de 50 km. Le montage optique utilisé est le même que celui rappelé en Figure III.20 avec tous les ajustements étudiés précédemment, notamment l'utilisation des filtres optiques de largeur 1 nm. Le filtre placé après l'amplificateur "EDFA Co" permet de limiter l'ASE entre deux impulsions optiques. Le filtre placé après l'amplificateur "EDFA Contra" a pour rôle de minimiser l'ASE liée à

la faible puissance de diffusion en entrée de celui-ci. Les amplificateurs sont réglés pour permettre uniquement de compenser les pertes optiques apparaissant sur la bobine de 50 km soit 10 dB de gain optique.

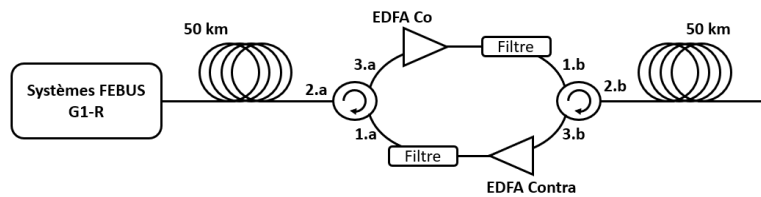


FIGURE III.20 – Schéma optique du module d'amplification bidirectionnel utilisé durant la thèse.

Le spectre optique obtenu par le B-OTDR est présenté en Figure III.21. Il s'agit du spectre distribué le long de 100 km de fibre, l'axe des ordonnées représente les fréquences de la plage d'acquisition tandis que l'axe des abscisses représente la distance le long de la fibre optique. Ces mesures ont été réalisées pour une résolution spatiale de 5 m, un temps de mesure de 10 min et une puissance crête de l'impulsion injectée en sortie de l'interrogateur de 251,2 mW (24 dBm). On observe tout d'abord sur la cartographie le bon fonctionnement du module de ré-amplification bidirectionnel. En effet, la deuxième portion de fibre optique placée après le module est facilement identifiable avec un signal dont l'intensité optique ré-augmente fortement en sortie du module. Par ailleurs, les rapports signal sur bruit, de l'ordre de 14,7 dB, sont sensiblement comparables au début des deux tronçons. Cela nous permet d'estimer que le module de ré-amplification optique ne cause pas de dégradation significative du rapport signal sur bruit de la mesure. Un dernier point à noter sur ce graphique est le signal optique observable sur la plage d'acquisition à 200 MHz. Il correspond à un signal de battement optique basse fréquence entre l'oscillateur local et le bras signal du montage. Malgré l'ajout d'un filtre électrique coupant les basses fréquences à 100 MHz sur le signal électrique issu des photodiodes, nous observons la présence de ce signal qui s'amplifie après le passage dans le module à 50 km. Ce bruit optique est, vraisemblablement, majoritairement lié à la détection du pic de diffusion Rayleigh qui n'est pas totalement éliminé par les différentes méthodes présentées en partie II.B.1.c.

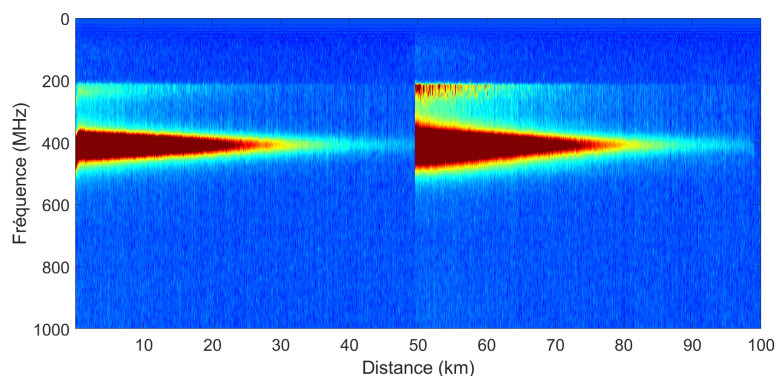


FIGURE III.21 – Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré sur une longueur de 100 km de fibre optique avec un module de ré-amplification

La Figure III.22 présente une cartographie normalisée de la mesure avec le module de ré-amplification. Ce graphique confirme bien que le bruit de mesure est globalement similaire avant et après la position des amplificateurs. Le rapport signal sur bruit est quasi identique pour les deux tronçons et reste très nettement au dessus du bruit de mesure. En effet, dans les deux cas, on a un SNR d'environ 13 dB sur les premiers kilomètres des tronçons et qui, sur les 5 derniers kilomètres, diminue jusqu'à 3 dB.

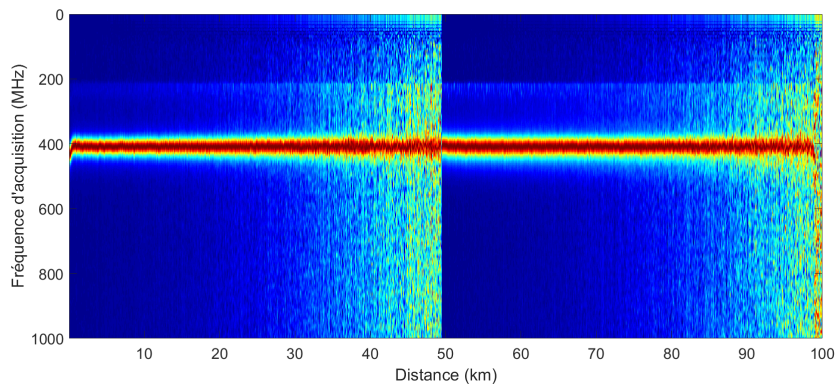


FIGURE III.22 – Spectre normalisé de rétrodiffusion Brillouin mesuré sur une longueur de 100 km de fibre optique avec le module de ré-amplification

La Figure III.23 représente quant à elle la répétabilité de mesure en température sur toute la longueur de fibre mesurée pour une résolution spatiale de 5 m et un temps de mesure de 10 min. Deux mesures sont représentées, une réalisée sur 100 km avec le module de ré-amplification (courbe rouge) et une mesure réalisée sur 50 km sans module de ré-amplification (courbe bleue). Cette comparaison permet d'observer que l'ajout d'un module ne dégrade que très peu la mesure réalisée en amont du module. Par ailleurs, ce graphique confirme bien que la régénération du signal optique par le module permet d'obtenir des performances de mesure très similaires après le module.

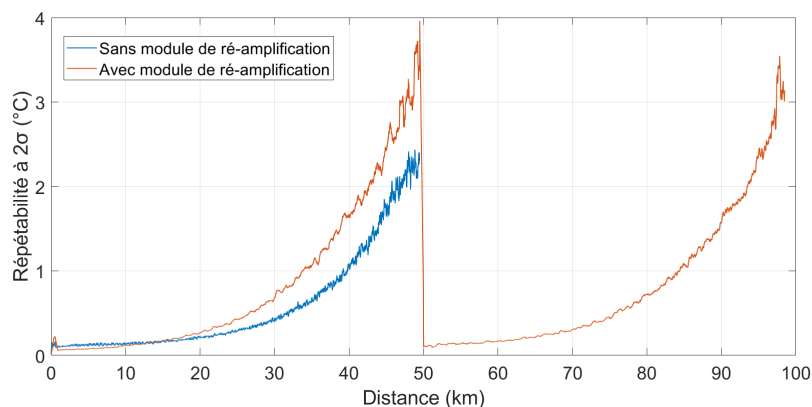


FIGURE III.23 – Répétabilité de mesure en température à 2σ sur 50 et 100 km de fibre optique pour une résolution spatiale de 5 m et 10 min de mesure. La courbe bleue représente la mesure sur une longueur de 50 km sans le module de ré-amplification. La courbe rouge représente la mesure sur 100 km avec le module.

Nous pouvons donc conclure de ces mesures que l'utilisation de modules de ré-amplification pour allonger la portée de mesure des interrogateurs B-OTDRs est tout à fait envisageable pour notre besoin. En effet, ces résultats nous permettent d'obtenir une mesure de 10 min, sur 100 km, avec une résolution spatiale de 5 m et présentant une répétabilité de 3 °C. Comme le montre le tableau III.7, l'utilisation d'un module de ré-amplification nous permet d'améliorer la résolution spatiale de mesure, passant de 20 à 5 m, tout en améliorant de 1 °C la répétabilité en température. Ces amplificateurs compacts permettent donc de ré-amplifier le signal optique sans générer de bruits optiques trop important dégradant la mesure réalisée par l'interrogateur. Nous allons par la suite réaliser une mesure avec deux modules de ré-amplification sur 150 km de fibre, longueur qui n'a jamais été atteinte jusqu'à présent avec un seul interrogateur B-OTDR.

	B-OTDR	B-OTDR + 1 module de ré-amplification
Distance de fibre maximale mesurée	100 km	100 km
Résolution spatiale	20 m	5 m
Performances de répétabilité mesure	4 °C	3 °C

TABLE III.7 – Tableau comparatif des performances de mesure sur 100 km de fibre optique avec une configuration qui inclue un module de ré-amplification et une configuration sans.

III.B.3.b Mesure B-OTDR sur 150 km

La configuration testée est celle présentée en Figure III.24. Deux modules de ré-amplification sont insérés sur une ligne de 150 km, l'un est placé au 50^{ème} kilomètre et le second placé à 100 km.

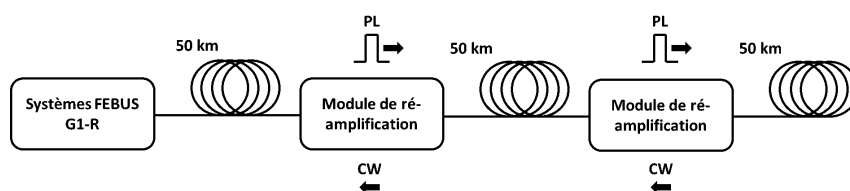


FIGURE III.24 – Schéma de la configuration optique d'une mesure B-OTDR sur 150 km avec deux modules de ré-amplification.

Le spectre optique, normalisé par rapport à l'intensité maximale du pic Brillouin, est présenté en Figure III.25.

On observe cette fois-ci quelques différences entre les trois tronçons de fibre testés où il y a une élévation progressive du niveau de bruit sur le troisième tronçon de fibre. Ce constat nous laisse penser que la concaténation des modules de ré-amplification a un impact sur la mesure.

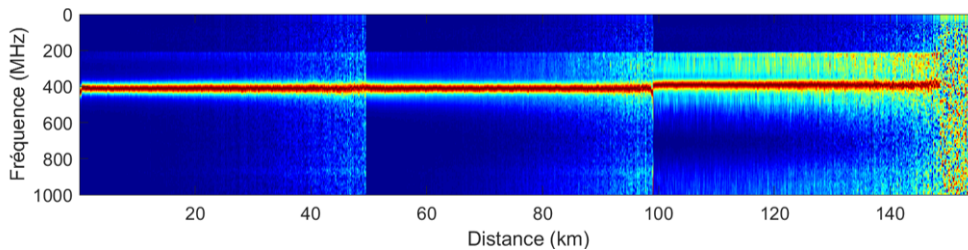


FIGURE III.25 – Spectre de rétrodiffusion Brillouin mesuré sur une longueur de 150 km de fibre optique avec deux modules de ré-amplification.

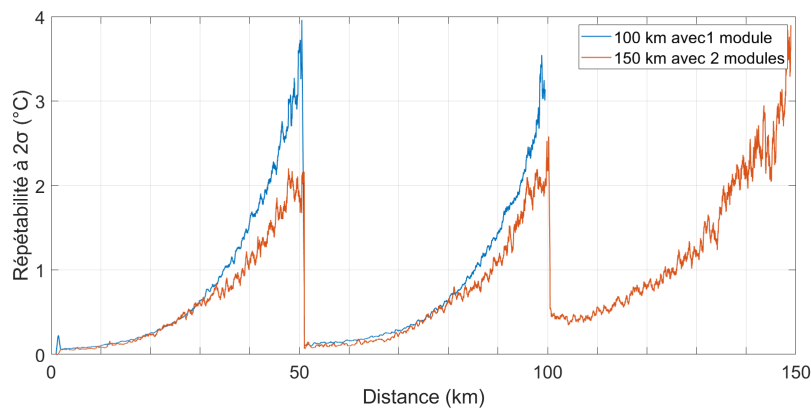


FIGURE III.26 – Répétabilité en température à 2σ sur 150 km de fibre optique pour une résolution spatiale de 5 m et 10 min de mesure.

La Figure III.26 permet de comparer les performances de répétabilité entre la mesure à 150 km avec 2 répéteurs (courbe rouge) et la mesure à 100 km avec 1 répéteur (courbe bleue). Les résultats obtenus nous permettent d'évaluer la répétabilité de notre mesure inférieure à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur une distance de 150 km pour une résolution spatiale de 5 m et un temps de mesure de 10 min. Ces résultats à ce jour constituent, à notre connaissance, les meilleures performances obtenues pour ce type de technologie. Par ailleurs, nous observons une tendance sur les performances moyennes de la courbe rouge qui est globalement similaire entre les deux premiers tronçons mais on observe une dégradation sur le dernier tronçon. Cette dégradation s'observe à la fois sur la valeur moyenne de la courbe mais aussi sur ses fluctuations qui augmentent avec la distance. De plus, il nous est possible de constater que la courbe bleue présente une répétabilité moins bonne que la courbe rouge de près de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'interprétation de ces résultats résiderait dans le mode de fonctionnement des amplificateurs CW de retour. En effet, ce type d'amplificateur émet continuellement un signal optique continu, de faible puissance, qui est collecté par l'amplificateur situé à la suite sur la ligne optique. Sur la courbe bleue, l'amplificateur de retour ne reçoit en entrée que le signal très faible de diffusion dans la fibre. Son gain n'étant pas saturé, ceci est à l'origine d'une montée du bruit ASE qui dégrade la répétabilité de mesure. A l'inverse, sur la courbe rouge, l'amplificateur de retour situé à 50 km reçoit, en plus de la diffusion générée, le signal optique provenant de l'amplificateur CW situé à 100 km. Ceci favorise la saturation du gain et permet donc de limiter l'ASE. Il s'agit ici uniquement d'hypothèses, et une étude plus approfondie, qui n'a pu être réalisée au cours de cette

thèse par faute de temps, est nécessaire pour la bonne interprétation de ces résultats.

Finalement nous avons réalisé, dans le cadre du projet SCODE, une mesure sur 150 km de fibre optique avec deux modules de ré-amplification et avons obtenu des performances en répétabilité inférieures à 1,5 °C sur 150 km, ce qui constitue une performance record pour ce type d'interrogateur.

Les résultats sont présentés en Figure III.27 et ont été obtenus pour un temps de mesure de 60 min⁴ et une résolution spatiale de 10 m. Nous observons également qu'à mesure que l'on enchaîne les modules, les performances et la dispersion de la répétabilité se dégradent à cause du bruit optique croissant créé par les modules de ré-amplification. Ceci nous laisse penser que la concaténation des modules pourrait créer une dégradation de la mesure et qu'il existe une limite sur le nombre de modules utilisables sur une même ligne optique.

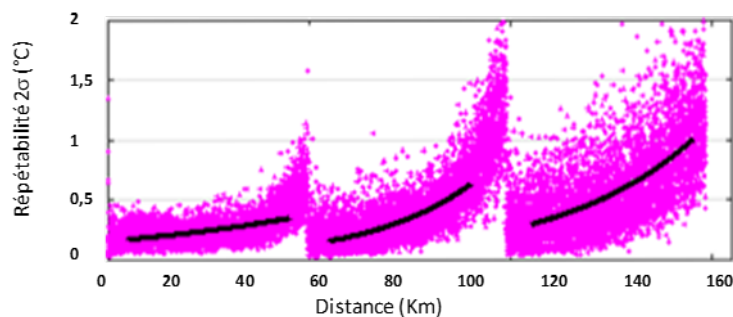


FIGURE III.27 – Répétabilité en température à 2σ sur 150 km de fibre optique pour une résolution spatiale de 10 m et 60 min de mesure.

Ces résultats n'auraient jamais pu être accessibles avec uniquement un interrogateur B-OTDR, ce qui montre bien le réel apport des modules de ré-amplification mis au point durant cette thèse. Ainsi, les performances correspondent au cahier des charges annoncé en début de cette partie et défini par l'industrie. Cependant le temps de mesure, lui, n'est pas respecté puisque l'industrie nécessiterait une mesure en 20 min tandis que la mesure présentée Figure III.27 correspond à 60 min de mesure. Mais, ce paramètre dépendant principalement de la vitesse de calcul informatique, il n'est pas un verrou technologique fondamentale. En effet, il est envisageable de transposer la mesure réalisée en Figure III.27 pour un temps de mesure de 20 min en triplant les ressources de calcul de l'interrogateur et de répondre ainsi aux exigences de l'industrie.

Comme nous avons pu le remarquer sur ces dernières mesures, il nous semble intéressant d'explorer les effets de la concaténation d'amplificateurs supplémentaires sur la mesure distribuée. En effet, il semble qu'à mesure que l'on rajoute des amplificateurs sur la ligne optique, la mesure se dégrade. Notre étude durant cette thèse a été purement empirique et a permis d'élaborer un prototype opérationnel répondant aux besoins de l'industrie. Cependant, cette étude a montré certaines limites au niveau de la solution choisie et nécessiterait donc maintenant d'être approfondie par une approche plus formalisée et analytique du sujet.

4. Le temps de mesure a été fixé à 60 min de manière à réaliser un très grand nombre de moyennes de mesure. Cela dans le but de réaliser une mesure présentant des performances maximales.

III.C Conclusion du chapitre

Nous avons évalué l'intérêt de l'industrie pour une augmentation de la portée de mesure des interrogateurs à fibre optique. Après avoir établi les concepts fondamentaux pour comprendre les limitations physiques de ces interrogateurs, notamment celles liées aux effets non-linéaires qui apparaissent pour des impulsions optiques de forte puissance, nous avons présenté une solution d'allongement de la portée de mesure des interrogateurs, sans modification du montage opto-électronique du système. La solution repose sur la ré-amplification du signal optique de sonde et celui de rétrodiffusion par le biais de modules autonomes, à bas coût et facilement intégrables sur la ligne optique mesurée. Ces modules bidirectionnels d'amplification ont été caractérisés et les premiers résultats obtenus nous laissent envisager le développement d'une solution commerciale d'allongement de la portée permettant de répondre aux besoins de l'industrie. Au cours de cette thèse, nous avons pu atteindre une distance de mesure de **150 km** avec une répétabilité de mesure inférieure à **1,5 °C**, une résolution spatiale de **10 m** et un temps de mesure de 60 min. Ces résultats constituent à ce jour l'état de l'art pour la mesure B-OTDR réalisée sur de longues distances.

Références

- [25] Govind P. AGRAWAL. *Nonlinear Fiber Optics*. 5th. Elsevier, 2013. ISBN : 978-0-12-397023-7. DOI : [10.1016/C2011-0-00045-5](https://doi.org/10.1016/C2011-0-00045-5).
- [31] Vincent LANTICQ. « Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ». Thèse de doct. Paris : Ecole Doctorale d'Informatique Télécommunications et Electronique de Paris, 2009.
- [88] Arnaud MALVACHE. « Optique non-linéaire à haute intensité : Compression d'impulsions laser Interaction laser-plasma ». In : (), p. 214.
- [89] Stella M. FOALENG et al. « Detrimental effect of self-phase modulation on the performance of Brillouin distributed fiber sensors ». In : *Optics Letters* 36.2 (15 jan. 2011), p. 97. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.36.000097](https://doi.org/10.1364/OL.36.000097).
- [90] Sergey AKOPOV et John JAY. *BOTDR Measurement Techniques and Brillouin Backscatter Characteristics of Corning Single-Mode Optical Fibers*. WP5080. Corning, mai 2010.
- [91] Gregory L. KEATON et al. « Stimulated Brillouin scattering of pulses in optical fibers ». In : *Optics Express* 22.11 (2 juin 2014). Publisher : Optical Society of America, p. 13351-13365. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.22.013351](https://doi.org/10.1364/OE.22.013351).
- [92] Marcelo A. SOTO et al. « Brillouin-Based Distributed Temperature Sensor Employing Pulse Coding ». In : *IEEE Sensors Journal* 8.3 (mar. 2008), p. 225-226. ISSN : 2379-9153. DOI : [10.1109/JSEN.2007.913143](https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.913143).
- [93] Marcelo A. SOTO et al. « Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range ». In : *Optics Letters* 35.2 (15 jan. 2010), p. 259. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.35.000259](https://doi.org/10.1364/OL.35.000259).
- [94] Hao LIANG et al. « High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses ». In : *Optics Letters* 35.10 (15 mai 2010), p. 1503-1505. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.35.001503](https://doi.org/10.1364/OL.35.001503).
- [95] Marcelo SOTO, Gabriele BOLOGNINI et Fabrizio PASQUALE. « Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification ». In : *Optics Letters* 36 (15 jan. 2011), p. 232-234. DOI : [10.1364/OL.36.000232](https://doi.org/10.1364/OL.36.000232).
- [96] N. LALAM et al. « Sensing range improvement of Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) using inline erbium-doped fibre amplifier ». In : *2017 IEEE SENSORS*. 2017 IEEE SENSORS. ISSN : null. Oct. 2017, p. 1-3. DOI : [10.1109/ICSENS.2017.8233878](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233878).
- [97] Yongkang DONG, Liang CHEN et Xiaoyi BAO. « Extending the Sensing Range of Brillouin Optical Time-Domain Analysis Combining Frequency-Division Multiplexing and In-Line EDFAs ». In : *Journal of Lightwave Technology* 30.8 (avr. 2012), p. 1161-1167. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.2011.2170813](https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2170813).
- [98] D. M. NGUYEN et al. « Sensitivity enhancement in long-range distributed Brillouin fiber sensor using an anti-Stokes single-sideband probe and a bidirectional EDFA ». In : *2012 Photonics Global Conference (PGC)*. 2012 Photonics Global Conference (PGC). Déc. 2012, p. 1-4. DOI : [10.1109/PGC.2012.6458002](https://doi.org/10.1109/PGC.2012.6458002).

- [99] F. GYGER et al. « Extending the sensing range of Brillouin optical time-domain analysis up to 325 km combining four optical repeaters ». In : *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*. 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. T. 9157. International Society for Optics et Photonics, 2 juin 2014, 91576Q. DOI : [10.1117/12.2059590](https://doi.org/10.1117/12.2059590).
- [100] Wai Pang NG et Nageswara LALAM. « Performance improvement of Brillouin based distributed fiber sensors employing wavelength diversity techniques (Invited Paper) ». In : *2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). ISSN : null. Août 2017, p. 1-3. DOI : [10.1109/ICOON.2017.8121531](https://doi.org/10.1109/ICOON.2017.8121531).
- [101] Muping SONG et al. « 100 km Brillouin optical time-domain reflectometer based on unidirectionally pumped Raman amplification ». In : *Optical and Quantum Electronics* 48 (1^{er} déc. 2016). DOI : [10.1007/s11082-015-0314-z](https://doi.org/10.1007/s11082-015-0314-z).

Chapitre IV

Développement d'un système B-OTDR pour la mesure de température indépendante de la déformation

Nous avons établi dans le chapitre précédent que les systèmes B-OTDRs sont sensibles à la fois aux variations de température et de déformation. Cette double sensibilité de la diffusion Brillouin peut être un réel inconvénient durant l'instrumentation et la surveillance de structures, notamment pour le génie civil mais également pour l'instrumentation de pipelines, de puits et de câbles de puissance électrique. En effet, une variation simultanée de la température et de la déformation entraîne un biais sur l'interprétation de la mesure B-OTDR, qui peut être critique pour la surveillance de ces structures. Beaucoup d'applications pour les systèmes d'interrogation Brillouin sont liées au génie civil pour l'étude des déformations mécaniques, fortement perturbées par les dilatations thermiques des matériaux. De ce fait, il est nécessaire d'utiliser des techniques de mesure permettant de quantifier des déformations mécaniques indépendamment de variations de température.

Nous allons présenter dans ce chapitre un état de l'art des solutions permettant de s'affranchir de cette double dépendance sur la mesure de diffusion Brillouin. Nous détaillerons ensuite le nouvel instrument de mesure commercial développé dans le cadre de cette thèse que nous nommerons par la suite B-OTDR DSTS pour "Distributed Strain & Temperature Sensing". Ce système permet de s'affranchir de la double sensibilité de la diffusion Brillouin avec une unique mesure réalisée sur une fibre optique. Puis nous présenterons les résultats de mesure de ce nouvel appareil lors d'une instrumentation d'un câble descendu dans un puits d'observation de 2 km.

IV.A État de l'art des solutions de séparation de la température et de la déformation de la mesure par fibre optique B-OTDR

Le moyen couramment utilisé pour répondre à la problématique est de fixer un des deux paramètres, soit en plaçant la fibre optique de manière à l'isoler mécaniquement pour pouvoir mesurer seulement la température, soit en l'isolant thermiquement ou enfin en faisant l'approximation que la température est stable

autour de cette dernière dans le but de mesurer seulement la déformation. Cependant, ces approximations sont souvent trop grossières pour pouvoir réaliser convenablement l'instrumentation d'une structure. Nous allons donc présenter dans un premier temps quelques solutions explorées pour la séparation de la température et de la déformation. Puis, nous nous appuieront sur ces différentes études pour proposer une solution pouvant répondre aux exigences de l'industrie avec une répétabilité de mesure de l'ordre de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $20\text{ }\mu\epsilon$ pour une distance de mesure supérieure à la dizaine de kilomètres. La solution proposée s'intègre également dans la stratégie de FEBUS Optics qui est de se rapprocher au maximum d'une solution d'interrogateur déjà développée au sein de l'entreprise.

IV.A.1 Mesures comparatives sur des câbles différents (Annexe C.A) [102, 103, 104]

Nous avons déjà montré dans la partie II.C.2 que différentes configurations de câbles à fibre optique commercialisés présentent des sensibilités à la température et à la déformation bien différentes. En effet, les câbles dits à structure libre ont la particularité de proposer une configuration où la fibre à l'intérieur se retrouve isolée des contraintes imposées à la gaine du câble. Inversement, les fibres insérées dans les câbles à structure serrée sont sensibles à toutes les contraintes perçues par la gaine du câble.

En pratique, un moyen de séparer la température de la composante de déformation réside donc dans l'utilisation simultanée de deux câbles à fibres optiques : un à structure libre et l'autre dont la gaine est serrée à la fibre, et donc sensible aux deux paramètres de température et de déformation. L'équipe de MOHAMAD, SOGA et AMATYA [104] a proposé une étude montrant l'intérêt d'utiliser de manière simultanée ces deux types de câbles pour obtenir une mesure de déformation indépendante de la température et pouvoir anticiper toutes déformations additionnelles liées à la dilatation thermique des matériaux.

Bien que cette solution soit actuellement la plus utilisée, elle présente de nombreux inconvénients comme la nécessité de placer deux câbles différents sur la structure à instrumenter ou encore la déformation résiduelle existant sur certains câbles malgré leur structure libre (II.C.3). Cette technique ne correspond donc pas à la stratégie de FEBUS Optics qui souhaite pouvoir réaliser une mesure à la fois de température et de déformation, fiable, sur une seule et même fibre optique, déjà implémentée sur la structure, sans avoir besoin de compléter l'instrumentation à posteriori avec un second câble.

IV.A.2 Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Raman (Annexe C.B) [105, 106]

Certaines méthodes proposent d'utiliser conjointement deux types d'interrogeurs, l'un pour la mesure Brillouin et l'autre pour la mesure Raman uniquement sensible à la température. Cette méthode relativement facile à mettre en œuvre nécessite malgré tout de procéder à un raccordement métrologique spatial précis des mesures fournies par les deux interrogeurs distincts et également de procéder à l'implémentation, sur la structure à instrumenter, de deux fibres optiques différentes, une monomode et une multimode.

Pour pallier ces deux principales limites métrologiques, ALAHBABI, CHO et NEWSON [105] et BOLOGNINI et SOTO [106] ont mis au point des systèmes opto-électroniques permettant une mesure simultanée des diffusions Brillouin et Raman sur une fibre optique monomode. Cependant, dans les deux cas, la portée de mesure de ces systèmes est de l'ordre de 30 km, ce qui restreint les domaines d'applications. De plus, sans la technique de codage d'impulsion proposée par BOLOGNINI et SOTO, les incertitudes de mesure, de l'ordre de 6°C et 150 $\mu\epsilon$, sont bien trop grandes.

L'utilisation conjointe des mesures de diffusion Brillouin et Raman n'est donc pas une solution que nous avons retenue car elle présente certaines limitations critiques comme la nécessité d'utiliser deux interrogateurs différents sur deux fibres optiques distinctes et sur des distances trop courtes pour certaines applications. Les solutions proposées pour contourner ces limites nous paraissent difficiles à mettre en œuvre dans le cadre d'une solution industrielle. Cette piste n'a donc pas été envisagée pour la suite des travaux de cette thèse.

IV.A.3 Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Rayleigh TW-COTDR (Annexe C.C) [107, 52]

Certains systèmes opto-électroniques utilisent la mesure de rétrodiffusion Rayleigh pour réaliser une mesure distribuée de déformation et de température sur une fibre optique. Il s'agit des interrogateurs TW-COTDR ("Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry") qui permettent, après corrélation croisée avec un état de référence, d'obtenir une mesure à la fois sensible à la température et à la déformation grâce à une analyse fréquentielle de la rétrodiffusion Rayleigh.

KISHIDA, YAMAUCHI et GUZIK [107] ont proposé une méthode combinant les interrogations TW-COTDR et PPP-BOTDA pour obtenir une mesure indépendante des paramètres de température et déformation. Ces travaux ont abouti à un interrogateur commercial, le NBX-7020 de la société Neubrex, présentant des incertitudes de mesure de 10 $\mu\epsilon$ et 0,5 °C pour des distances de mesures de quelques kilomètres.

Dans le contexte de notre travail de recherche, l'intégration de ce type de mesure avec les technologies maîtrisées par FEBUS Optics nous paraît très difficile à mettre en œuvre et demanderait un effort de développement important à l'entreprise. De plus, la technologie TW-COTDR nécessite un montage opto-électronique et une méthode d'acquisition complexes qui peuvent diminuer la fiabilité de mesure de l'interrogateur avec une plus grande probabilité de possibles pannes matérielles. Ce point, en addition avec la relative faible portée de mesure de 10 km [52], nous ont décidé à ne pas suivre cet axe de recherche au cours de ces travaux de thèse.

IV.A.4 Utilisation de fibres optiques spécifiques (Annexe C.D) [108, 109, 30]

Cette méthode repose sur l'utilisation de fibres spécifiques qui, par les propriétés intrinsèques au matériau et à sa géométrie, présentent plusieurs fréquences de diffusion Brillouin (i.e. propagation de plusieurs modes acoustiques longitudinaux). LEE, CHIANG et CHI [108] ont montré l'existence de ces spécificités, en particulier sur la fibre Corning LEAF©. La discrimination se base alors sur les

différences de sensibilité fréquentielle entre chacun des pics de diffusion.

Cependant, les nombreuses études et thèses réalisées sur la fibre LEAF© ont montré de très faibles différences entre les sensibilités de chaque pic [109, 31, 30, 110]. Ces différences, de seulement 9%, entraînent une forte dégradation de l'incertitude sur la mesure lorsque l'on souhaite discriminer la température de la déformation (dégradation d'un facteur 7 pour la température et d'un facteur 4 pour la déformation). D'autres fibres plus spécifiques (fibres à cristal photonique, fortement dopées, ...) permettent d'améliorer cette problématique mais de nouvelles limitations, inhérentes à ces types de fibres, apparaissent [110, 111].

Cette solution de discrimination de la température et de la déformation présente beaucoup d'inconvénients dont le premier est lié à la forte incertitude de mesure. De plus, l'amélioration de cette incertitude nécessite d'utiliser des fibres peu répandues dans l'industrie (fibres à cristal photonique, fortement dopées, ...), coûteuses et avec de fortes atténuations optiques. Ces limitations confortent notre choix d'écarter cette méthode pour le développement de notre solution.

IV.A.5 Double sensibilité en fréquence et en intensité de la diffusion Brillouin (Annexe C.E) [42, 112, 70, 113, 114]

La rétrodiffusion Brillouin présente une sensibilité à la température et à la déformation traduite par un changement de la fréquence Brillouin mais également de son intensité suivant l'équation démontrée expérimentalement par PARKER et al. [42] et que l'on rappelle :

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.046 \text{ MHz}/\mu\varepsilon & 1.07 \text{ MHz}/\text{K} \\ -8.10^{-4}\%/\varepsilon & 0.36\%/\text{K} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

Une mesure simultanée de la fréquence et de l'intensité de rétrodiffusion Brillouin permet de résoudre l'équation matricielle IV.1 et donc d'obtenir des mesures indépendantes de la température et de la déformation. La mesure d'intensité Brillouin nécessite une référence pour ne pas être biaisée par les pertes optiques qui pourraient être interprétées comme une variation de température. Pour cela, WAIT et NEWSON [112] ont proposé d'utiliser le ratio de Landau Placzek, sensible à la température, qui correspond à la mesure de l'intensité de rétrodiffusion Rayleigh divisée par la mesure de l'intensité Brillouin et défini par l'équation IV.2.

$$R_{Lp} = \frac{I_R}{I_B} \approx \frac{T_f}{T} (\rho V_A^2 \beta_T - 1) \quad (\text{IV.2})$$

où I_R et I_B sont les intensités de diffusion Rayleigh et Brillouin, ρ la densité du matériau de la fibre, V_A la vitesse des ondes acoustiques, β_T la compressibilité isotherme à la température fictive T_f et T la température de la fibre.

Plusieurs études ont évalué les performances d'une mesure simultanée de fréquence de rétrodiffusion Brillouin et du ratio de Landau Placzek pour une mesure indépendante de température et de déformation. Les résultats de ces études montrent des performances de mesure intéressantes (une résolution d'environ 4 °C et 100 $\mu\varepsilon$ pour 57 km de fibre optique [70]). Les premières études ont été réalisées en utilisant deux interrogateurs distincts, un OTDR ainsi qu'un appareil

de mesure de rétrodiffusion Brillouin. Depuis, certains appareils industriels intègrent directement cette double mesure [113, 114].

Cette solution nous a paru être la plus à même de répondre à notre problématique. Avec une discrimination des paramètres de température et de déformation sur plus de 50 km et des incertitudes de mesure convenables pour l'instrumentation de structure; nous avons donc décidé de focaliser nos travaux sur cette méthode. De plus, comme nous allons le voir, il nous est possible de concevoir un système d'interrogation pour ce type de solution avec les technologies déjà développées par FEBUS Optics.

IV.A.6 Piste suivie durant cette thèse

Un des objectifs de cette thèse est de proposer une solution qui permet une mesure distribuée indépendante de la température et de la déformation, via la rétrodiffusion Brillouin, et pouvant être facilement mise en œuvre pour la surveillance de structures. Les performances de mesure doivent être suffisantes pour répondre aux spécifications demandées généralement dans ce domaine, soit une mesure indépendante de température et de déformation avec une résolution de 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ et de 1 $^{\circ}\text{C}$. Il nous est donc paru adéquat de privilégier la piste du ratio de Landau Placzek, avec des mesures simultanées et synchrones des diffusions Rayleigh et Brillouin, puisque cette méthode peut s'adapter sur des fibres optiques monomodes standards, ne nécessite pas l'utilisation de plusieurs câbles à fibres optiques et a déjà été utilisée par plusieurs interrogateurs industriels avec des performances de mesure encourageantes. Nous verrons qu'il nous a été possible d'implémenter cette mesure dans une architecture opto-électronique unique d'interrogateur B-OTDR tout en s'appuyant sur les technologies déjà maîtrisées par FEBUS Optics. L'étude bibliographique complète réalisée sur ce sujet est accessible au lecteur dans l'annexe C de ce manuscrit.

IV.B Développement d'un interrogateur pour la mesure distribuée et simultanée des rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin spontanées

Le nouveau système B-OTDR DSTS breveté au cours de cette thèse [115] possède un certain nombre de différences innovantes qui permettent de diminuer l'incertitude et d'améliorer le temps de mesure par rapport aux interrogateurs commerciaux utilisant déjà la méthode du ratio de Landau Placzek. L'atout principal de notre configuration est la possibilité de mesurer, de manière simultanée et avec un unique schéma opto-électronique, les diffusions Brillouin et Rayleigh pourtant espacées spectralement de plus de 10 GHz l'une de l'autre. Ce point est novateur par rapport aux autres interrogateurs qui réalisent de manière distincte la mesure de ces deux diffusions. Ces systèmes nécessitent deux configurations opto-électroniques différentes, l'une réalisant une mesure OTDR classique (mesure que nous avons présentée en partie I.B.3.a du premier chapitre), l'autre permettant une mesure de la rétrodiffusion Brillouin dans la fibre. Ces deux configurations utilisent deux lasers distincts, ce qui peut entraîner des erreurs de référencement sur l'évaluation de l'intensité des diffusions mesurées. De plus, les deux enregistrements ne peuvent pas être effectués simultanément, ce qui peut poser problème si un événement intervient sur la fibre entre les deux mesures.

Le choix de notre configuration optique nous oblige à utiliser une détection cohérente pour la mesure Rayleigh que l'on appelle C-OTDR pour "Coherent Optical Time Domain Reflectometry". Ce type d'interrogation favorise l'apparition d'un bruit de cohérence sur la mesure des pertes optiques (appelé "fading noise" dans la littérature). Ce bruit rend la mesure des pertes bien moins précise qu'avec un interrogateur OTDR classiquement utilisé, ce qui entraîne une forte dégradation de la mesure du rapport de Landau Placzek et donc une forte incertitude sur la mesure de température et de déformation. Nous montrerons que nous avons mis en place des solutions matérielles mais également de traitement de données qui nous ont permis d'obtenir des performances en adéquation avec les besoins de l'industrie. Nous verrons également que le schéma opto-électronique de ce nouvel interrogateur présente quelques améliorations notables par rapport à l'interrogateur B-OTDR présenté précédemment, comme la réduction du bruit RIN sur l'oscillateur local que nous avons qualifié dans la partie II.B.1.c.

Nous avons ensuite évalué les performances du nouvel interrogateur développé qui nécessite une très grande sensibilité de la mesure en puissance, d'au moins 0,3 % du signal mesuré, et une sensibilité en fréquence d'au moins 1 MHz. La sensibilité en fréquence requise est un point déjà maîtrisé par les interrogateurs B-OTDRs, alors que la sensibilité de 0,3 % pour la mesure du ratio de Landau Placzek est un sujet plus complexe notamment à cause du bruit de cohérence présent sur la mesure de diffusion Rayleigh.

IV.B.1 Réalisation d'un système d'interrogation combiné C-OTDR et B-OTDR résolu en fréquence et en puissance

IV.B.1.a Description du schéma optique

Pour obtenir des mesures permettant de séparer la température et la déformation il faut, durant la même mesure, être capable de déterminer le spectre de rétrodiffusion Brillouin mais également le spectre de rétrodiffusion Rayleigh. Pour cela nous avons proposé d'utiliser la base de l'architecture optique déjà existante de l'appareil commercialisé FEBUS-G1 et de la modifier de manière à observer les deux spectres Brillouin et Rayleigh simultanément.

Le schéma optique pour mesurer la diffusion Brillouin anti-Stokes ainsi que la diffusion Rayleigh est représenté en Figure IV.1. Une source laser de largeur 10 kHz émet une onde optique à la fréquence ν_0 divisée en deux par un coupleur 90/10 (CP1). Le premier faisceau est envoyé dans un bras du montage appelé "bras Rayleigh". Le second faisceau dans le bras dit "bras Brillouin" est de nouveau séparé par un coupleur 90/10 (CP2) dont les 90 % sont dirigés vers le bras constituant l'oscillateur local du B-OTDR. Les 10 % restants sont envoyés dans le "bras Brillouin". Ce signal continu est amplifié par un amplificateur EDFA 20 dBm avant d'être envoyé dans la fibre de référence. Comme nous l'avons déjà montré dans la partie II.B.1.c, l'amplification dans la fibre de référence doit être suffisante pour dépasser largement le seuil de diffusion Brillouin et ainsi générer de la diffusion Brillouin spontanée amplifiée à une fréquence ν_{Bref} . L'onde optique revenant de la fibre de référence est injectée dans un troisième coupleur 90/10 (CP3). Ce troisième coupleur a pour but de combiner l'onde issue du "bras Brillouin" de fréquence $(\nu_0 - \nu_{Bref})$ avec l'onde issue du "bras Rayleigh" de fréquence ν_0 . Les deux ondes sont enfin amplifiées par un amplificateur EDFA puis le signal continu est transformé en impulsions par un modulateur acousto-optique qui diminue sa fréquence de 200 MHz, que l'on note ν_{AO} . L'impulsion lumineuse est injectée dans

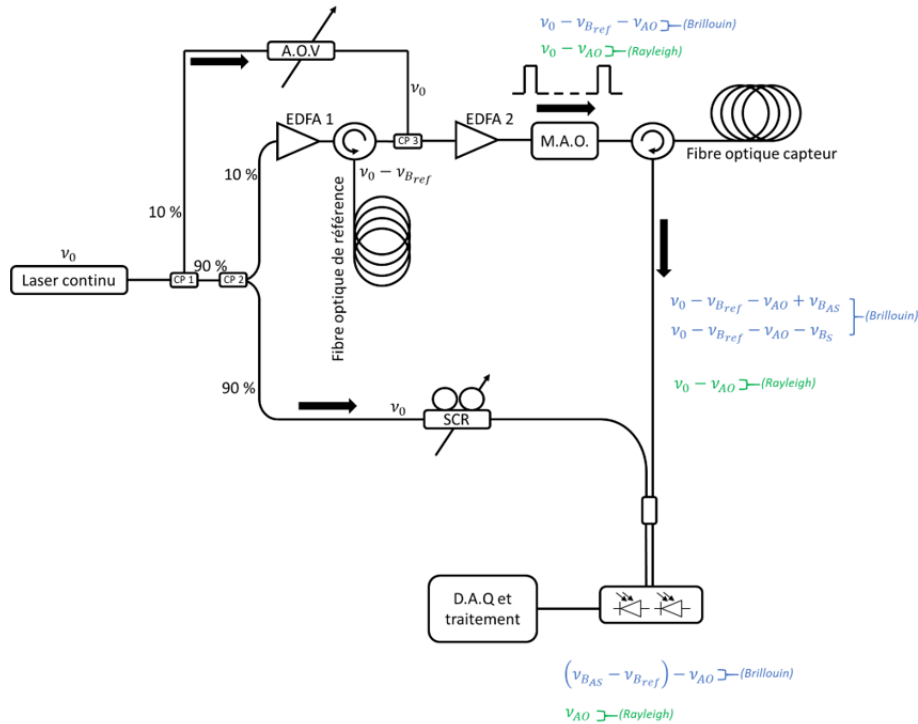


FIGURE IV.1 – Schéma opto-électronique détaillé de l'interrogateur B-OTDR/C-OTDR nommé FEBUS G2-R.

la fibre à mesurer et va générer de la diffusion Rayleigh à la fréquence $(\nu_0 - \nu_{AO})$ mais également de la diffusion Brillouin spontanée Stokes et anti-Stokes aux fréquences $(\nu_0 - \nu_{AO} \pm \nu_{Bs/BA_s} - \nu_{Bref})$. L'onde rétrodiffusée se couple ensuite avec l'onde issue de l'oscillateur local, dont la polarisation a été brouillée au préalable pour maximiser le couplage entre l'oscillateur et l'onde rétrodiffusée de la fibre. Une photodiode PIN InGaAs détecte le signal Rayleigh à la fréquence ν_{AO} et uniquement le signal Brillouin anti-Stokes à la fréquence $(\nu_{BAS} - \nu_{Bref}) - \nu_{AO}$ puisque le battement généré entre l'onde Stokes et l'oscillateur local est à une fréquence supérieure à 20 GHz qui est hors de la bande de détection de la photodiode. Ces signaux sont ensuite acquis par un DAQ et séparés numériquement avant traitement. La Figure IV.2 présente un exemple des spectres Brillouin et Rayleigh obtenus pour chaque point d'échantillonnage spatial le long de la fibre.

On observe donc que ce nouveau schéma optique est relativement proche de celui du FEBUS G1-R et les deux principales différences sont la position de la fibre de référence et l'ajout d'un deuxième bras qui constitue le "bras Rayleigh" du système. Nous verrons dans le paragraphe IV.B.1.b les principaux atouts de cette nouvelle position de la fibre de référence.

De manière à observer les deux spectres (Rayleigh et Brillouin) sur la même mesure, il faut judicieusement choisir une fibre de référence décalée de plusieurs centaines de MHz de manière à éviter tout recouvrement du spectre Rayleigh avec le spectre Brillouin¹. En effet, le spectre Rayleigh se trouve détecté à la fréquence ν_{AO} et le spectre Brillouin à la fréquence $(\nu_{BAS} - \nu_{Bref}) - \nu_{AO}$. Si ν_{BAS} est trop proche de ν_{Bref} , le spectre Brillouin se retrouve donc à une fréquence

1. Il est important que les deux rétrodiffusions centrées sur ν_{AO} et sur $(\nu_{BAS} - \nu_{Bref}) - \nu_{AO}$ ne se recouvrent pas. Leur largeur spectrale correspondent à la convolution entre le spectre de l'impulsion optique envoyée dans la fibre et le spectre naturel de la diffusion mesurée.

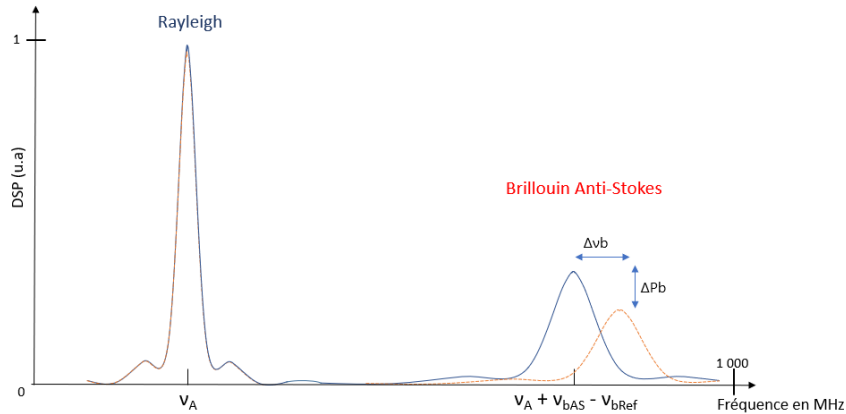


FIGURE IV.2 – Spectre optique mesuré par l'interrogateur B-OTDR DSTS présentant une mesure simultanée des diffusions Rayleigh et Brillouin. Le spectre Brillouin évolue en fréquence et en puissance suivant la température et la déformation.

proche de celle du spectre Rayleigh et il devient impossible de réaliser une mesure correcte car ces derniers se recouvrent. Il est donc nécessaire que la bande passante d'acquisition soit suffisamment large pour obtenir les deux spectres dans la même mesure sans recouvrement de ces derniers. Ainsi, il est préférable d'utiliser une carte d'acquisition avec une bande passante d'au moins 1 GHz et une fréquence d'échantillonnage de 2 GS/s. Le photorécepteur doit lui aussi présenter une bande passante d'au moins 1 GHz pour pouvoir détecter simultanément les contributions Rayleigh et Brillouin. Enfin, on rappelle que les variations d'intensité de la diffusion Brillouin en fonction de la température que l'on cherche à mesurer sont infimes (d'environ 0,3 %/K), il est donc indispensable d'utiliser une carte d'acquisition avec une grande sensibilité verticale. De ce fait, nous avons décidé d'utiliser une carte avec une résolution de mesure de 12 bits sur 1 Volt.

IV.B.1.b Originalités majeures de ce nouveau système par rapport au B-OTDR standard

La différence principale de ce nouvel interrogateur par rapport au B-OTDR présenté dans le chapitre précédent est la possibilité qu'a ce dernier de mesurer de manière simultanée les rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin séparées de plus de 10 GHz l'une de l'autre. Cependant d'autres différences plus subtiles existent entre ces deux systèmes.

— Le positionnement de la fibre de référence :

En fonction de la position de la fibre de référence, les composantes de diffusion Brillouin Stokes ou anti-Stokes peuvent être mesurées. Lorsque la fibre de référence est placée sur le bras de l'oscillateur local, la composante Stokes est détectée. Inversement, lorsque la fibre est placée sur le "bras signal", comme cela est le cas en Figure IV.1, la composante anti-Stokes est mesurée. Nous avons décidé de présenter dans ce chapitre une configuration permettant la mesure de la composante anti-Stokes. Un atout de cette configuration réside au niveau de l'oscillateur local du système qui n'est, dans ce cas, pas généré par de la rétrodiffusion Brillouin spontanée amplifiée provenant de la fibre de référence mais directement

par le signal CW provenant du laser. Cela limite le bruit RIN, associé à l'oscillateur local, au niveau de la détection optique que nous avons caractérisée dans la partie II.B.1.c. La Figure IV.3 montre la différence de répétabilité de mesure sur la température issue de la fréquence Brillouin qui est évaluée, suivant la norme IEC 61757-2-2 (II.B.2), à une distance de 10 km, pour une résolution spatiale de 1 m et un temps de mesure d'une minute. Nous nous intéressons uniquement à la portion de fibre placée dans l'enceinte climatique et représentée dans un carré vert sur le graphique. On observe sur ces résultats une meilleure répétabilité de mesure lorsque la fibre de référence ne se trouve pas sur l'oscillateur local et donc que l'interrogateur mesure la composantes anti-Stokes du signal.

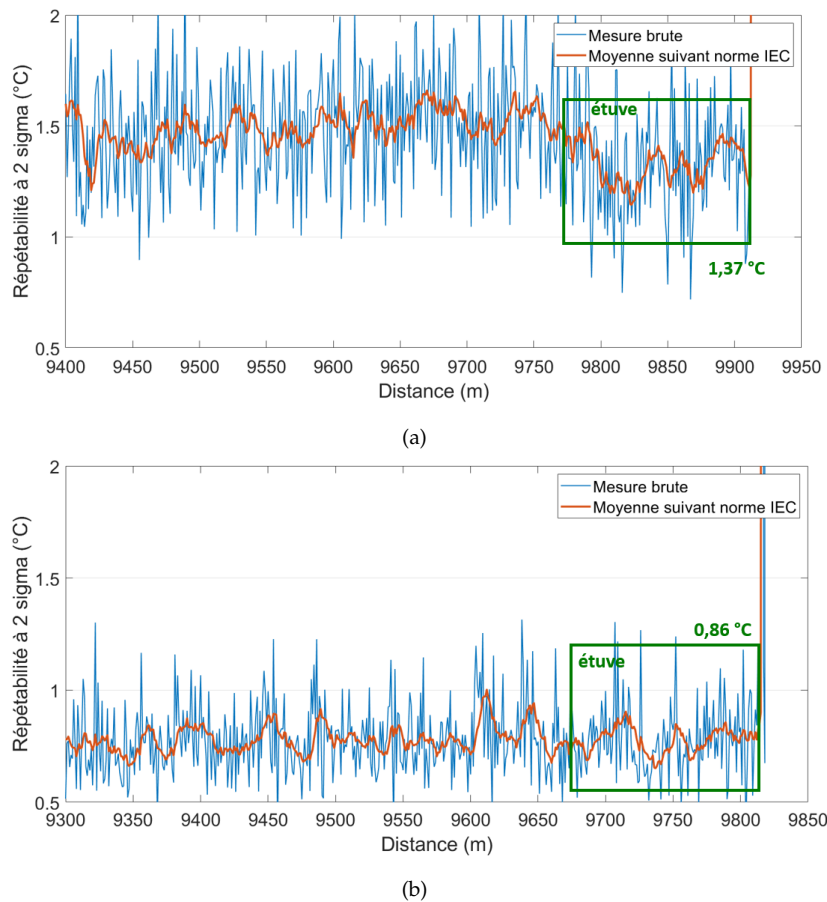


FIGURE IV.3 – Répétabilités en température de la mesure évaluée sur 100 m de fibre placés dans une enceinte climatique et soudés après une longueur d'environ 10 km, pour une résolution spatiale de 1 m et 1 minute de mesure.

(a) La répétabilité en température est évaluée à 1,37 °C lorsque la fibre de référence est sur l'oscillateur local (Stokes). (b) L'interrogateur avec la fibre de référence sur le "bras signal" (anti-Stokes) présente une répétabilité en température de 0,86 °C.

Nous avons donc privilégié, pour l'étude de ce nouveau B-OTDR DSTS, une configuration anti-Stokes qui présente une meilleure répétabilité de mesure. Néanmoins, cette configuration nécessite des précautions particulières à respecter pour la réalisation des mesures, notamment au niveau de la puissance optique de l'impulsion injectée. Nous avons observé précédemment que dans un régime de diffusion spontanée amplifiée il existe un déséquilibre entre les diffusions Brillouin

Stokes et anti-Stokes (II.B.1.c). Cette dernière pouvant être totalement annihilée lorsque le phénomène est important. Dans ce cas, la mesure de la rétrodiffusion Brillouin anti-Stokes se dégrade fortement jusqu'à devenir inexploitable; alors que la rétrodiffusion Brillouin Stokes, bien qu'également perturbée (III.A.3.b), reste moins sensible à ces effets propagatifs. Ainsi, un interrogateur en configuration Stokes réalise des mesures moins précises mais reste plus robuste, en particulier lorsque l'opérateur n'est pas familier avec ce type de technologie. Inversement, un interrogateur mesurant la raie anti-Stokes permet de réaliser de meilleures mesures mais nécessite un réglage précis des paramètres optiques.

— La génération d'impulsions optiques :

Cette nouvelle configuration optique du système présente un inconvénient puisque le signal qui génère l'impulsion optique envoyée dans la fibre de test est cette fois issu de la rétrodiffusion Brillouin spontanée amplifiée générée dans la fibre de référence. Ainsi, le bruit RIN observé dans la fibre de référence est présent dans l'impulsion optique qui est de ce fait moins stable en intensité.

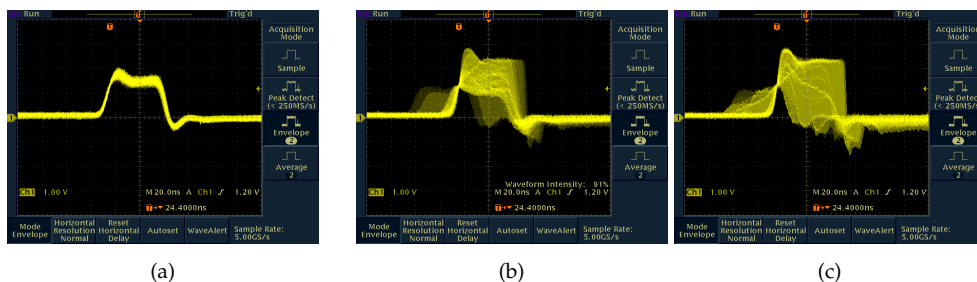


FIGURE IV.4 – Impulsions optiques générées par l'interrogateur en fonction de la puissance injectée dans la fibre de référence. En (a) avec une puissance continue de 7 dBm, en (b) pour 11 dBm, et en (c) pour 20 dBm.

La Figure IV.4 représente les impulsions optiques envoyées dans la fibre de test par l'interrogateur en fonction de la puissance optique continue injectée dans la fibre de référence. Ces mesures ont été réalisées en plaçant une photodiode à la sortie de l'interrogateur, au niveau de l'injection dans la fibre capteur, et le signal reçu par la photodiode a été collecté par un oscilloscope. On observe sur cette figure que plus la puissance optique injectée dans la fibre de référence est importante, plus la forme et l'intensité de l'impulsion optique envoyée par l'appareil deviennent aléatoires. Lorsque aucune fibre de référence n'est connectée et que seul le signal issu du laser génère l'impulsion, alors ce phénomène de fluctuation sur l'impulsion n'est plus observable. Ce point peut être responsable d'une dégradation de la mesure de l'intensité de rétrodiffusion Brillouin que l'on cherche à évaluer pour la séparation de la température et de la déformation. Cependant, nous estimons que le nombre de moyennes effectuées par l'interrogateur durant une mesure est suffisamment important pour réduire ce bruit d'intensité à un niveau négligeable.

IV.B.1.c Mesures préliminaires des intensités de rétrodiffusion Rayleigh et Brillouin distribuées : limites liées au bruit de cohérence

Nous avons réalisé des premières mesures distribuées de l'intensité des rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin avec ce nouvel interrogateur. Une de ces mesures est présentée en Figure IV.5. Nous constatons sur cette figure la décroissance exponentielle de l'intensité Brillouin (courbe rouge) causée par les pertes linéiques de la fibre. Cependant, ce graphique montre des fluctuations d'intensité importantes sur la courbe de diffusion Rayleigh (courbe bleue) où nous distinguons difficilement la décroissance exponentielle du signal. Ce bruit est presque 50 fois supérieur à celui observé sur la mesure d'intensité Brillouin qui est, quant à lui, acceptable pour la mesure que nous souhaitons réaliser. Il s'agit d'un phénomène connu sur la mesure de rétrodiffusion Rayleigh utilisant une source laser dont la longueur de cohérence est plus grande que l'impulsion lumineuse. Ce bruit de mesure, appelé "fading noise", est causé par des interférences optiques intra-impulsion qui se créent au niveau du signal revenant sur le détecteur. Nous observons qu'il est donc inenvisageable d'utiliser le ratio de Landau Placzek dans ce cas. Nous allons détailler plus précisément les origines de ce bruit de fluctuation et les différents moyens de le réduire pour ensuite pouvoir référencer notre mesure d'intensité Brillouin avec celle de l'intensité Rayleigh.

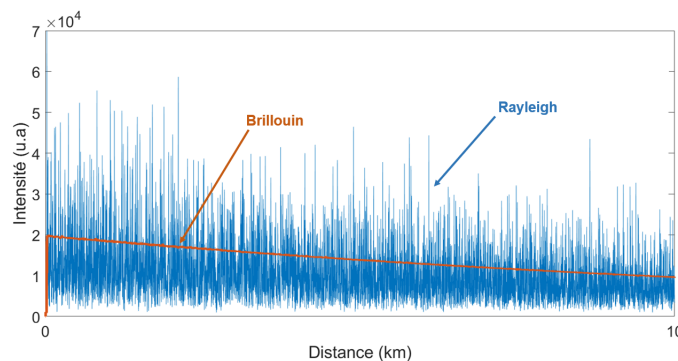


FIGURE IV.5 – Mesure préliminaire issue de la moyenne de 100 000 acquisitions des intensités de rétrodiffusion Brillouin (courbe rouge) et Rayleigh (courbe bleue).

IV.B.2 Évaluation des pertes optiques par un système C-OTDR

Nous avons observé, sur la Figure IV.5, une mesure de l'intensité du signal de rétrodiffusion Rayleigh présentant de fortes fluctuations de l'amplitude du signal. Dans le cadre d'un schéma de détection hétérodyne, comme celui que nous avons présenté en Figure IV.1 et qui compose le B-OTDR DSTS, ces fluctuations d'amplitude peuvent avoir plusieurs origines et nous allons montrer que cet interrogateur en limite de facto la plupart. Cela ne laisse nul doute sur l'origine prépondérante de ce bruit : le bruit de cohérence que nous chercherons à caractériser dans la suite de ce manuscrit.

IV.B.2.a Origine des différents bruits sur l'intensité du signal de rétrodiffusion Rayleigh

- **Bruit aléatoire lié à la mesure** : Il s'agit du bruit intrinsèque à la mesure et à tout capteur optique (bruit quantique associé à l'oscillateur local, bruit thermique, RIN, ...). Ce bruit résulte des contributions de chaque composants optiques et électriques présents dans l'interrogateur. Un moyennage de plusieurs mesures permet donc de réduire ce bruit stochastique. Dans notre cas, et pour la mesure réalisée en Figure IV.5, le moyennage réalisé est de plusieurs centaines de milliers de mesures, ce qui nous permet de considérer que ce bruit, évoluant en $1/\sqrt{n}$, est considérablement limité.
- **Fluctuations liées à l'état de polarisation lors de la détection hétérodyne** : Elles apparaissent au niveau de la détection réalisée par la photodiode équilibrée entre l'oscillateur local et le signal de rétrodiffusion de la fibre. En effet, dans un schéma hétérodyne avec une détection équilibrée, l'état de polarisation des signaux issus de l'oscillateur local et de la rétrodiffusion est primordial. Le signal de rétrodiffusion collecté par le photorécepteur est en pratique pondéré par le produit scalaire des deux états de polarisation. Comme nous l'avons déjà expliqué dans la partie précédente, un brouillage de polarisation durant une mesure moyennée de nombreuses fois permet de limiter ce bruit de mesure. Il existe également d'autres solutions qui proposent des configurations utilisant la méthode de diversité de polarisation [116, 117].
- **Bruit lié à la cohérence du laser** : Il s'agit là du bruit de "fading noise" déjà évoqué et responsable selon nous des fluctuations d'intensité observées sur le graphique précédent. Ce bruit est lié à la cohérence du laser lors d'une détection hétérodyne du signal de rétrodiffusion Rayleigh [118]. Il s'agit d'une contribution de bruit qui n'est actuellement pas réduite intrinsèquement par notre système de mesure et qui est donc responsable de ces grandes fluctuations d'amplitude observées sur le signal de diffusion Rayleigh.

Nous allons présenter plus précisément l'origine de ce bruit de mesure puis nous présenterons la méthode de réduction que nous avons utilisée durant cette thèse pour permettre une mesure performante.

IV.B.2.b Définition du bruit de cohérence sur une mesure C-OTDR

Nous pouvons considérer que le nouveau système DSTS est une combinaison d'un interrogateur C-OTDR et d'un B-OTDR. Nous nous intéresserons ici uniquement à la partie C-OTDR dont l'objectif est de mesurer les pertes optiques afin de référencer la mesure d'intensité Brillouin. La particularité de ce système est la possibilité de réaliser une détection hétérodyne via l'utilisation d'un laser suffisamment fin spectralement. A l'inverse, un système OTDR classique réalise une mesure en détection directe avec un laser qui présente une largeur spectrale plus grande (typiquement plusieurs centaines de MHz). Cette différence de technologie laser crée ce bruit de cohérence uniquement sur les appareils C-OTDRs.

Le bruit de cohérence, que nous appellerons CRN pour "Coherent Rayleigh Noise", est évalué quantitativement par la mesure des fluctuations quadratiques moyennes sur l'intensité, notées σ_I , divisées par la valeur moyenne du signal d'intensité $\langle I \rangle$ suivant l'équation IV.3.

$$CRN = \frac{\sigma_I^2}{\langle I \rangle^2} \quad (IV.3)$$

Il est lié à des interférences intra-impulsions entre les différentes contributions de rétrodiffusion Rayleigh qui sont collectées au niveau du photodétecteur à chaque instant [118]. Le champ électrique $E_s^-(z_0, t)$ arrivant au détecteur est composé, à l'instant t , de la somme des champs générés par chaque point diffuseur de la fibre répartis aléatoirement, autour d'une distance donnée, sur un segment de fibre compris entre $(tv_g - L)/2$ et $tv_g/2$ avec la largeur L de l'impulsion optique et v_g la vitesse de groupe.

$$E_s^-(z_0, t) = E_0^+ \sum_{z_k=(tv_g-L)/2}^{tv_g/2} r_k e^{i(2\pi f_0 t + \phi_k(t))} e^{i(2\beta z_k)} e^{-2\alpha z_k} \quad (IV.4)$$

où f_0 est la fréquence optique injectée dans la fibre, E_0^+ l'enveloppe de l'impulsion se propageant dans la fibre, k correspond au $k^{\text{ème}}$ centre diffuseur, r_k est le coefficient de réflectivité de la rétrodiffusion, $\phi_k(t)$ la phase optique du signal et α et β sont respectivement les coefficients d'atténuation et de propagation du signal.

En simplifiant l'expression IV.4 et suivant GOODMAN [119], chaque point diffuseur réémet un champ électrique d'amplitude a_e^k qui présente une phase ϕ_e^k , distribuée de manière uniforme dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$, fixe dans le temps (lorsque aucune perturbation externe n'est soumise à la fibre) mais aléatoire dans l'espace puisque dépendante de la position aléatoire des centres diffuseurs dans la fibre. On peut donc réécrire le champ électrique total rétrodiffusé $E_s^-(z)$ en un point z de la fibre par :

$$E_s^-(z) = \sum_k a_e^k e^{i\phi_e^k} \quad (IV.5)$$

Lorsque la source de lumière est incohérente, le terme de phase présent dans l'équation IV.5 disparaît et le signal rétrodiffusé est alors égal à la somme des intensités liées à chaque champ électrique. Dans le cas d'une source de lumière cohérente, le champ électrique total de rétrodiffusion en un point n'est pas équivalent à la somme directe de chaque champ du fait des interférences optiques créées au niveau du détecteur, qui est inclus dans le montage optique hétérodyne et qui détecte une intensité optique suivant l'équation IV.6.

$$I = \sum_{k=1}^N (E_0^+ r_k)^2 e^{-4\alpha z_k} + E_{OL}^2 + 2 \sum_{k=1}^N E_0^+ r_k E_{OL} e^{-4\alpha z_k} \cos(2\pi \Delta f t + \Delta \phi_k(t)) \cos(\theta_k(t)) \quad (IV.6)$$

avec E_{OL} le champ électrique provenant de l'oscillateur local, $\Delta \phi_k(t)$ et $\theta_k(t)$ représentent respectivement la différence de phase optique et l'angle de polarisation entre l'oscillateur local et le signal rétrodiffusé par le $k^{\text{ème}}$ centre diffuseur

sur un total de N centres diffuseurs compris dans la portion de fibre éclairée par l'impulsion optique.

Certaines sections de fibre peuvent donc présenter des centres diffuseurs avec des relations de phase proches $[2\pi]$ et dans ce cas, on observe une interférence constructive avec un fort signal de battement mesuré entre le signal diffusé et l'oscillateur local. Dans d'autres cas, la somme des champs électriques s'annule pratiquement, ce qui entraîne un faible signal de battement collecté du fait d'une interférence destructive.

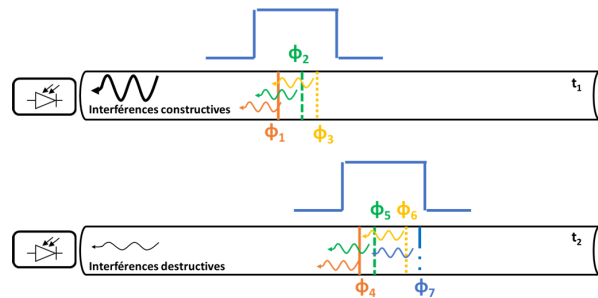


FIGURE IV.6 – Schéma du processus du bruit de cohérence CRN.

La Figure IV.6 montre une représentation simplifiée de deux portions de fibre éclairées à deux instants différents par une impulsion optique d'une largeur donnée. Ces portions étant à deux positions spatiales distinctes de la fibre, nous n'observons donc pas, sur la figure, les mêmes valeurs de phase ϕ_e^k des centres diffuseurs et leur position au sein de l'impulsion est également différente. Ce qui implique dans un cas que la somme des contributions contenues dans la partie de fibre éclairée peut être constructive et dans un autre cas destructive.

Ainsi, la mesure distribuée d'intensité Rayleigh le long de la fibre optique présente une variation aléatoire des rétrodiffusions, d'intensité plus ou moins fortes comme cela est présenté en Figure IV.7a. Ces variations sont stables dans le temps lorsque la fibre est inerte et à température constante, ce qui implique que les positions des centres diffuseurs n'ont pas été modifiées. Cependant, un étirement de la fibre, un échauffement ou encore des vibrations proches de celle-ci ont pour effet de modifier les positions relatives des points diffuseurs et ont pour impact de déplacer la positions des franges d'interférences.

S'agissant d'un processus d'interférences optiques, un changement de la fréquence f_0 de l'impulsion optique va également avoir pour conséquence de modifier la figure d'interférence distribuée le long de la fibre comme on peut l'observer en Figure IV.7b. Sur cette figure, les trois courbes présentées ont été réalisées avec des impulsions de fréquences optiques différentes. Bien que chaque courbe présente une apparence générale similaire, on constate qu'elles sont complètement différentes les unes des autres au niveau des variations d'intensité mesurées.

L'équipe de IZUMITA et al. [120] a réalisé une étude montrant l'efficacité d'une méthode de réduction du bruit de cohérence CRN sur la mesure d'intensité de rétrodiffusion Rayleigh. Cette méthode, appelée FSAV pour « Frequency Shift Averaging », consiste à réaliser de nombreuses mesures d'intensité avec des impulsions optiques de différentes fréquences. L'objectif étant ainsi de moyenniser un nombre conséquent de signaux de rétrodiffusion totalement indépendants les uns des autres et donc de diminuer ce bruit de cohérence. Nous avons suivi cette méthode pour le développement du nouvel interrogateur B-OTDR DSTS.

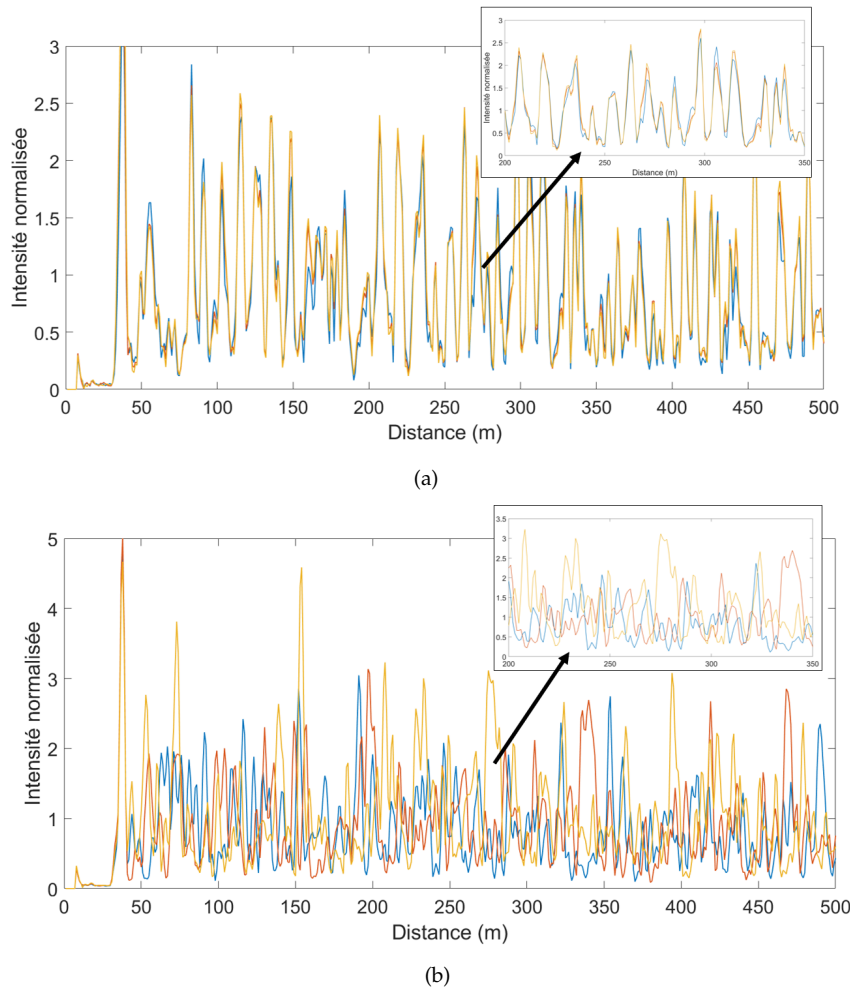


FIGURE IV.7 – Mesures successives de la rétrodiffusion Rayleigh avec une source optique de largeur spectrale 10 kHz. En (a) sur un intervalle de temps inférieur à la minute et avec une fréquence de laser stable. En (b) sur un intervalle de temps inférieur à la minute et à trois fréquences optiques différentes espacées de 100 MHz.

IV.B.2.c Approche théorique de la réduction du bruit de cohérence CRN sur une mesure C-OTDR

Nous avons observé sur la mesure C-OTDR que des impulsions optiques envoyées dans la fibre à différentes fréquences génèrent des figures de rétrodiffusion Rayleigh différentes les unes des autres. Le CRN présent sur la mesure C-OTDR est un processus stochastique qui suit une loi normale proche de la statistique de Rayleigh [121]. La réduction de ce bruit est donc dépendante du nombre d'acquisitions décorréelées qui sont moyennées durant la mesure. On dit que deux acquisitions sont décorréelées lorsque leur signal d'interférence lié à la diffusion Rayleigh ne présente plus aucune correspondance.

Ainsi, comme le montre la Figure IV.8, en augmentant le nombre d'états indépendants (notés " n " sur la figure) durant la mesure, on passe progressivement d'une distribution de bruit exponentielle à une distribution qui devient gaussienne. Ce qui a pour conséquence de réduire progressivement l'amplitude des fluctuations d'intensité du signal de rétrodiffusion mesurées [122, 18]. La densité

de probabilité de l'intensité I du signal rétrodiffusé peut alors s'écrire mathématiquement par l'équation IV.7 [119] :

$$P_I(I) = \frac{I^{n-1}}{(n-1)!} \left[\frac{n}{\langle I \rangle} \right]^n e^{-\frac{nI}{\langle I \rangle}} \quad (IV.7)$$

où n est le nombre de signaux d'interférences totalement décorrélés. Et dans ce cas, l'expression du CRN correspondant à l'écart-type des fluctuations d'intensité s'écrit suivant l'équation IV.8. On peut donc estimer que le CRN est réduit par la méthode de FSAV à mesure que l'on augmente le nombre d'état décorrélés n (i.e. à mesure que l'on varie la fréquence optique de l'impulsion).

$$CRN_{FSAV} = \frac{\sigma_I^2}{\langle I \rangle^2 \sqrt{n}} \quad (IV.8)$$

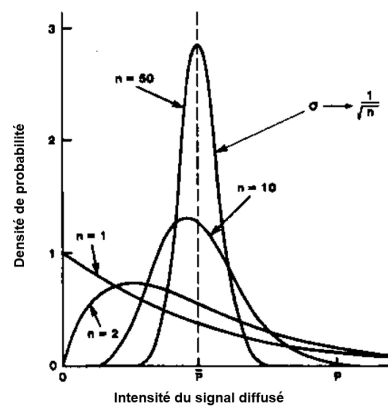


FIGURE IV.8 – Réduction stochastique du bruit de cohérence sur la mesure C-OTDR [122]

SHIMIZU, HORIGUCHI et KOYAMADA [123] ont investigué ce phénomène en définissant un modèle statistique dépendant de la résolution spatiale de mesure et du décalage fréquentiel de l'impulsion optique, de manière à ce que le bruit de cohérence présente une dépendance en $1/\sqrt{\Delta z \Delta \nu}$ où Δz est la portion de fibre éclairée à un instant donné (liée à la résolution spatiale) et $\Delta \nu$ représente l'intervalle fréquentiel dans lequel sont contenus les n impulsions optiques totalement indépendantes. Réaliser un balayage fréquentiel durant la mesure C-OTDR de rétrodiffusion Rayleigh, comme le propose IZUMITA et al. [121], permet d'évaluer l'écart-type des fluctuations σ_R causées par ce bruit de cohérence suivant l'équation IV.9.

$$\sigma_R \approx \left(\frac{v_g}{4\Delta z \Delta \nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (IV.9)$$

On constate donc bien que l'efficacité de la réduction du bruit CRN, via la méthode de balayage fréquentiel, dépend de deux paramètres qui sont l'intervalle des fréquences balayées et la résolution spatiale de la mesure. En effet, une dégradation de la résolution spatiale augmente le nombre de points diffuseurs soumis à l'onde optique. La moyenne des phases optiques comprises dans l'impulsion tend donc vers une valeur nulle, ce qui implique, au niveau du photodétecteur équilibré, que le terme d'interférence tend également vers zéro.

MERMELSTEIN et al. [124] ont démontré par le calcul que la condition pour que deux ondes sondes génèrent des signaux statistiquement indépendants nécessite que les fréquences de ces ondes diffèrent, à minima, de l'inverse de la longueur de l'impulsion telle que :

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{\tau_\omega} \quad (\text{IV.10})$$

où $\Delta\nu_c$ est le décalage fréquentiel nécessaire pour deux états de diffusion indépendants et τ_ω la durée de l'impulsion. Ainsi pour une impulsion de 20 ns (correspondant à une résolution spatiale de 2 m), le décalage fréquentiel entre deux impulsions doit être au minimum de 50 MHz pour que celles-ci génèrent deux signaux de diffusion Rayleigh totalement indépendants le long de la fibre. D'après [18, 124], si l'on souhaite réduire le bruit de CRN pour arriver à des niveaux de fluctuations sur le signal de rétrodiffusion Rayleigh de l'ordre de 0,1 %, il est nécessaire de réaliser une moyenne d'au moins 100 000 acquisitions indépendantes. Soit pour une résolution spatiale de 2 m, chaque signal de diffusion étant généré par des impulsions séparées d'au moins 50 MHz. Cela correspondrait à un balayage du laser $\Delta\nu$ de l'ordre de 5 000 GHz (40 nm), ce qui n'est pas envisageable du fait que, sur cette grande plage de longueur d'onde, l'atténuation intrinsèque de la fibre est complètement différente. De plus, il n'existe pas de technologies laser facilement intégrables dans un interrogateur qui permettent ce type de balayage.

Nous avons cherché à réaliser une étude proche de celle présentée par SOUZA [125] en l'adaptant aux spécifications de notre nouveau système de mesure. Nous verrons qu'avec les composants opto-électroniques dans l'interrogateur DSTS et pour des résolutions spatiales couramment utilisées, nous pouvons espérer réduire le CRN à un niveau d'environ 1,4 % de fluctuations, soit un ordre de grandeur au dessus ce que nous cherchons pour notre application.

IV.B.2.d Caractérisations expérimentales de la réduction du bruit CRN par la modification de la source laser

Nous avons réalisé plusieurs mesures de rétrodiffusion Rayleigh dans l'objectif de reproduire le travail réalisé par SOUZA [125] pour l'adapter à notre configuration optique spécifique, notamment au module laser utilisé dans l'interrogateur. Le module laser est une diode à semi-conducteur qui est accordable sur la bande C (i.e. 1530 - 1565 nm). Elle présente une largeur spectrale de l'ordre de 10 kHz et possède un mode de balayage fréquentiel permettant une modulation en fréquence du laser sans sauts de modes sur une largeur maximale de 250 GHz et avec une vitesse pouvant aller de 1 GHz/sec à 40 GHz/sec. La fibre instrumentée Bendbright-XS, produite par la société Draka, présente un pic de diffusion Brillouin décalé d'environ 10,450 GHz. La fibre de référence connectée au système est une SMF-28 ULL avec une fréquence de décalage Brillouin de l'ordre de 10,975 GHz. Ainsi comme nous l'avons défini en partie IV.B.1.a, ces deux fibres optiques présentent des fréquences Brillouin suffisamment décalées pour que l'interrogateur puisse mesurer les diffusions Rayleigh et Brillouin sans aucun recouvrement de l'une par l'autre. Nous nous intéressons dans cette étude uniquement à la mesure de l'intensité de rétrodiffusion Rayleigh. Nous avons cherché à évaluer l'impact de trois paramètres physiques sur l'évolution du bruit CRN grâce à trois tests distincts :

- évolution du bruit CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel [IV.B.2.d.i](#);
- évolution du bruit CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions successives [IV.B.2.d.ii](#);
- évolution du bruit CRN en fonction de la résolution spatiale de mesure [IV.B.2.d.iii](#).

IV.B.2.d.i Évolution du bruit CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser

Ce test a pour but d'évaluer l'évolution du CRN pour différents $\Delta\nu$ de balayage du laser à temps de mesure constant (nombre d'acquisitions moyennées constant) et pour une résolution spatiale de 2 m. Ainsi, on estime que chaque signal de diffusion est totalement indépendant du précédent lorsque l'écart fréquentiel des impulsions est supérieur à 50 MHz. Nous nous sommes assuré que durant une mesure complète, le laser avait réalisé au moins un cycle entier de balayage $\Delta\nu$. La vitesse de balayage et le taux de répétition des impulsions sont fixés respectivement à 1 GHz/sec et 100 kHz. Ainsi pour chacune des acquisitions, le décalage fréquentiel entre deux impulsions est de 10 kHz. Bien que deux impulsions espacées de 10 kHz ne génèrent pas des signaux de diffusion décorrelés selon MERMELSTEIN et al. [124], le fait de réaliser le balayage du laser sur une plage de fréquence $\Delta\nu$ nous assure d'avoir un certain nombre de signaux de diffusion indépendants. Ce nombre est évalué en fonction du balayage du laser et du décalage fréquentiel nécessaire pour que deux signaux soient décorrelés, comme écrit dans l'équation [IV.11](#). Ainsi, pour un balayage de 250 GHz, des impulsions espacées de 10 kHz et une résolution spatiale de 2 m, nous avons 5 000 signaux de diffusions totalement décorrelés sur un total de 25 millions.

$$n = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_c} \tag{IV.11}$$

Balayage du laser $\Delta\nu$	Temps de la mesure	Résolution spatiale Δz	Nombre de mesures décorrelées
4 GHz	5 min	2 m	80
16 GHz	5 min	2 m	320
64 GHz	5 min	2 m	1280
128 GHz	5 min	2 m	2560
250 GHz	5 min	2 m	5000

TABLE IV.1 – Configurations de mesure de l'interrogateur pour le test d'évaluation du CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser.

La Figure [IV.9](#) confirme que le paramètre $\Delta\nu$ est très important dans la réduction du CRN. En effet, à mesure que l'on augmente la largeur du balayage $\Delta\nu$ on diminue le bruit CRN, et ce, pour un temps de mesure constant. Cette évolution, représentée en Figure [IV.10](#), suit une loi en $1/\sqrt{\Delta\nu}$ en accord avec la théorie présentée par [[125](#), [123](#)].

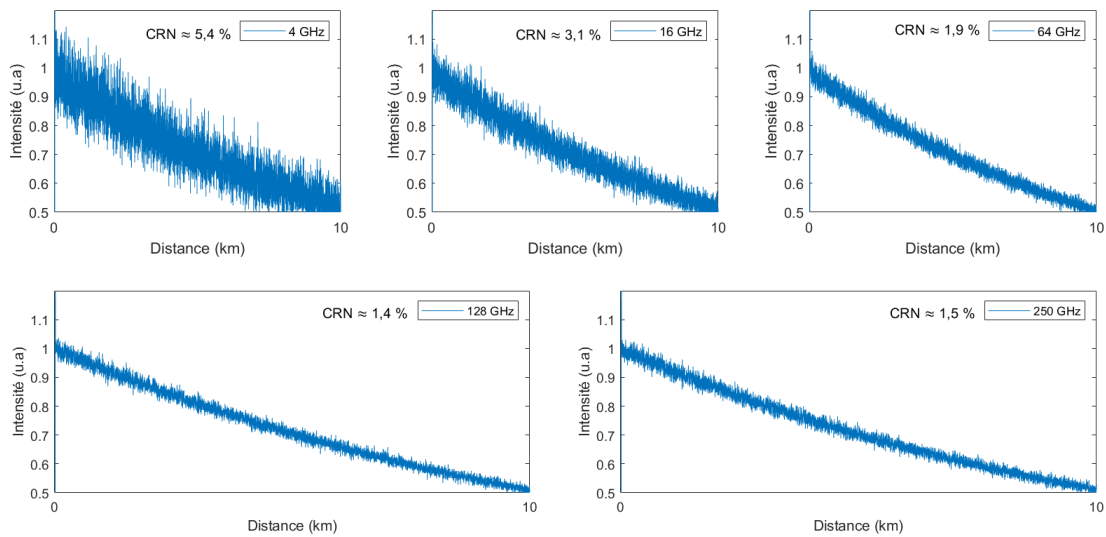


FIGURE IV.9 – Résultats des mesures du test d'évaluation du CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser

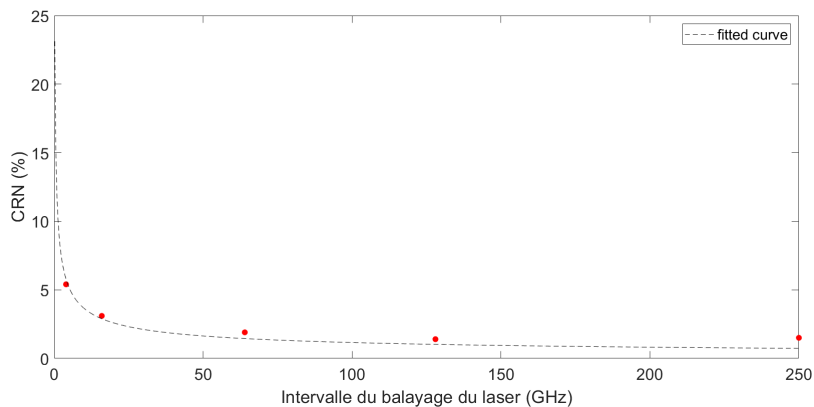


FIGURE IV.10 – Comparaison avec la théorie des résultats du test d'évaluation du CRN en fonction de la largeur du balayage fréquentiel du laser. La régression affichée évolue en $1/\sqrt{\Delta\nu}$

IV.B.2.d.ii Évolution du bruit CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions

Ce test a pour objectif de confirmer l'impact de la différence de fréquence optique entre deux impulsions sur la réduction du CRN. Pour cela nous avons procédé en faisant varier la vitesse du balayage (limitée à 10 GHz/sec avec le laser utilisé) sur une largeur totale de 128 GHz, de manière à contrôler le décalage fréquentiel entre deux impulsions avec un taux de répétition des impulsions fixé à 100 kHz. Le décalage fréquentiel entre chaque impulsion est largement inférieur aux valeurs théoriques pour lesquels deux impulsions distinctes créent des figures d'interférence totalement décorréliées (IV.B.2.c).

Balayage du laser $\Delta\nu$	Temps de la mesure	Vitesse de balayage du laser	Décalage fréquentiel entre deux impulsions	Résolution spatiale Δz
128 GHz	5 min	1 GHz/sec	10 kHz	2 m
128 GHz	5 min	2 GHz/sec	20 kHz	2 m
128 GHz	5 min	5 GHz/sec	50 kHz	2 m
128 GHz	5 min	10 GHz/sec	100 kHz	2 m

TABLE IV.2 – Configurations de mesure de l'interrogateur pour le test d'évaluation du CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions.

Les courbes d'évolution de l'intensité en fonction de la distance, présentées en Figure IV.11, semblent confirmer en partie la théorie proposée par MERMELSTEIN et al. [124]. En effet, on constate que l'échantillonnage fréquentiel du balayage semble peu significatif pour la réduction du CRN lorsqu'il correspond à des valeurs très inférieures à celles permettant d'obtenir une figure d'interférence totalement décorrélée.

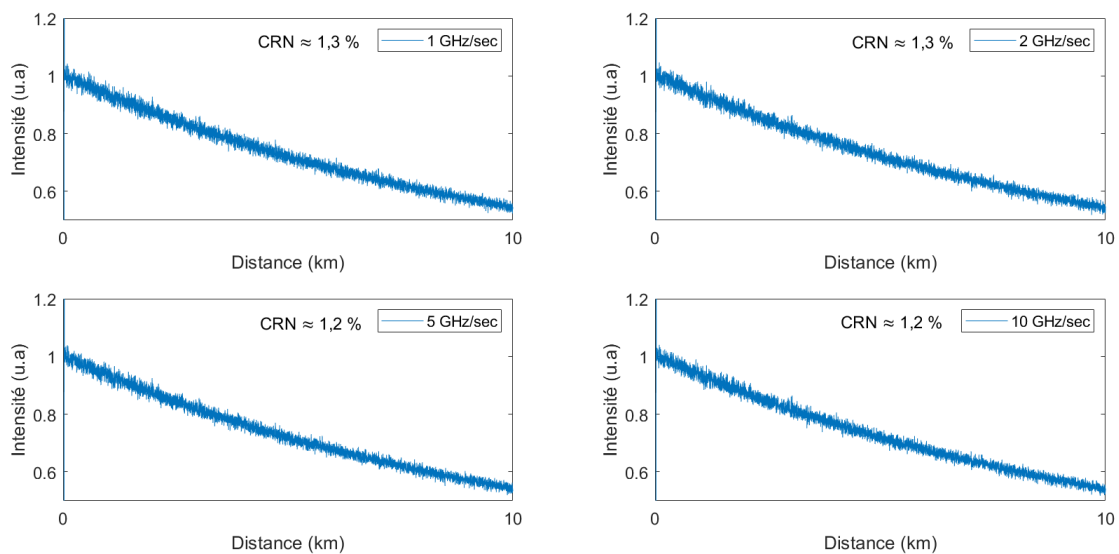


FIGURE IV.11 – Résultats des mesures du test d'évaluation du CRN en fonction de la différence de fréquence optique entre deux impulsions.

IV.B.2.d.iii Évolution du bruit CRN en fonction de la résolution spatiale de mesure

Ce test vise à confirmer les effets de la résolution spatiale sur la réduction du CRN. Pour cela nous avons réalisé des mesures en fixant les paramètres du temps de mesure, du balayage $\Delta\nu$ du laser ainsi que de sa vitesse. Nous avons uniquement fait varier la résolution spatiale de mesure Δz , soit la durée temporelle de l'impulsion optique.

Balayage du laser $\Delta\nu$	Temps de la mesure	Vitesse de balayage du laser	Résolution spatiale Δz
128 GHz	5 min	1 GHz/sec	1 m
128 GHz	5 min	1 GHz/sec	2 m
128 GHz	5 min	1 GHz/sec	5 m
128 GHz	5 min	1 GHz/sec	10 m
128 GHz	5 min	1 GHz/sec	20 m

TABLE IV.3 – Configurations de mesure de l'interrogateur pour le test d'évaluation du CRN en fonction de la résolution spatiale.

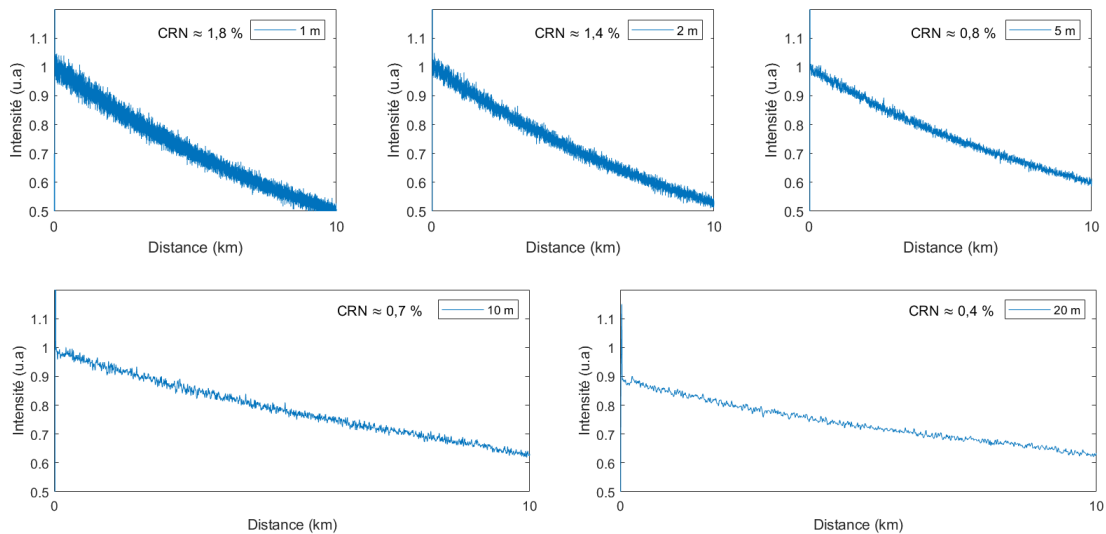


FIGURE IV.12 – Résultats des mesures du test d'évaluation du CRN en fonction de la résolution spatiale.

La Figure IV.12 montre bien une réduction du bruit de cohérence liée à l'augmentation de la durée de l'impulsion utilisée et donc à l'augmentation de la portion de fibre éclairée à chaque instant durant la propagation de l'impulsion lumineuse dans celle-ci.

Nous observons également sur la Figure IV.13, que cette réduction du CRN en fonction de la résolution spatiale évolue bien suivant une loi en $1/\sqrt{\Delta z}$ comme ce qui est avancé par les précédentes études [125, 123].

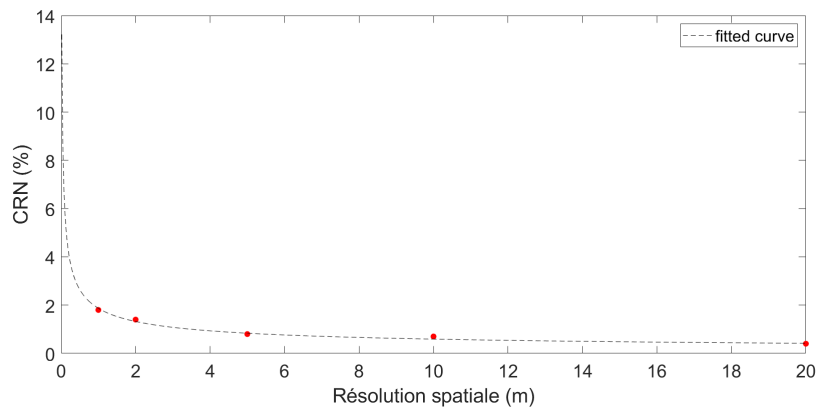


FIGURE IV.13 – Comparaison avec la théorie des résultats du test d'évaluation du CRN en fonction de la résolution spatiale. La régression affichée évolue en $1/\sqrt{\Delta z}$

IV.B.2.d.iv Comparaison des valeurs de CRN expérimentales avec la théorie

En conclusion, nous avons cherché à comparer, de manière quantitative, les valeurs de CRN obtenues durant ces essais par rapport à la théorie proposée par MERMELSTEIN et al. [124]. La comparaison de ces résultats, en fonction du nombre de mesures totalement indépendantes (i.e. présentant une figure d'interférence totalement indépendante selon [124]), est présentée dans le Tableau IV.4².

Balayage du laser $\Delta\nu$	Nombre de mesures	CRN relatif théorique	CRN relatif expérimental	Résolution spatiale Δz
250 GHz	5000	1,4 %	1,7 %	2m
128 GHz	2560	2 %	2,7 %	2m
64 GHz	1280	2,8 %	3,7 %	2m
16 GHz	320	5,6 %	6 %	2m
4 GHz	80	11 %	10,4 %	2m

TABLE IV.4 – Tableau récapitulatif d'amélioration du CRN en fonction de l'intervalle de balayage du laser pour une résolution spatiale de 2 m et un temps de mesure de 5 min.

L'écart entre les valeurs théoriques et expérimentales peut être expliqué par le bruit aléatoire lié à la mesure, présenté en partie IV.B.2.a et pouvant être réduit en augmentant le nombre de moyennes réalisées dans une mesure.

On peut déduire de ce tableau que pour le balayage maximal de notre laser ($\Delta\nu=250$ GHz), il nous est possible d'obtenir un bruit de cohérence relatif de l'ordre de 1,7 %, et ce, pour une résolution spatiale de 2 m et un temps de mesure de 5 min.

2. Le CRN théorique est une valeur relative de réduction du fading par rapport à une mesure où le fading n'est pas réduit. Les valeurs expérimentales de CRN que nous avons obtenues sont les valeurs absolues qui doivent donc être corrigées avec la valeur du CRN mesuré alors qu'aucun balayage du laser n'est réalisé (mesure correspondant à la Figure IV.7a). Cette valeur est de 52 % de fluctuations du signal et, en corrigeant les mesures expérimentales par ce facteur, on obtient l'avant dernière colonne du Tableau IV.4.

IV.B.2.d.v Conclusion de l'étude sur la réduction du bruit de cohérence

Nous avons donc confirmé l'évolution du bruit de cohérence sur la mesure C-OTDR en fonction de la résolution spatiale et de l'intervalle de fréquence utilisé pour réaliser le balayage du laser. Cette réduction suit bien une évolution en $\frac{1}{\sqrt{\Delta\nu}\sqrt{\Delta z}}$ qui est en accord avec la théorie. Ces résultats nous permettent également d'estimer les valeurs de CRN atteignables par notre système. Ainsi, pour des configurations de mesure couramment utilisées (résolution spatiale de 2 m et temps de mesure de l'ordre de 5 min), nous pouvons espérer avoir un bruit de cohérence présentant des fluctuations d'amplitude de l'ordre de 1,7 %. Bien que cette méthode de balayage de la fréquence du laser permette de réduire le CRN d'un facteur 35 par rapport à une mesure sans réduction du bruit de cohérence, ces fluctuations restent malgré tout importantes notamment lorsque l'on souhaite utiliser la mesure du ratio de Landau Placzek pour séparer la température de la déformation. En effet, nous avons vu que la sensibilité de la rétrodiffusion Brillouin à la température est de l'ordre de 0,3 %/K, ce qui est plus d'un ordre de grandeur en dessous du CRN accessible par l'interrogateur. Il est donc difficile, par cette méthode, de réaliser une mesure avec une précision de 20 $\mu\epsilon$ et 1 °C comme ce qu'il nous est demandé dans l'industrie.

Une optimisation matérielle sur le laser comme celle que nous avons réalisée, permet de réduire drastiquement le CRN. Cependant, cette réduction n'est pas encore suffisante et nous avons montré que, même en l'optimisant encore, elle ne pourrait permettre d'atteindre des niveaux de CRN de l'ordre de 0,1 % (IV.B.2.c). Nous avons donc cherché à optimiser encore plus la mesure des pertes optiques dans une fibre par un traitement numérique sur la donnée de diffusion Rayleigh mesurée par l'interrogateur C-OTDR.

IV.B.2.e Algorithme de réduction numérique du bruit de cohérence sur une mesure C-OTDR

De manière à obtenir une meilleure sensibilité sur la mesure du ratio de Landau Placzek, nous proposons de réaliser une méthode supplémentaire de réduction du bruit CRN. Un traitement numérique est réalisé sur les données de diffusion Rayleigh par un algorithme, proche de celui d'un OTDR classique, de manière à éliminer numériquement toutes les fluctuations d'intensité encore présentes sur la mesure, c'est à dire de filtrer la courbe de mesure de diffusion Rayleigh³. La méthode numérique proposée consiste donc à réaliser plusieurs traitements sur le signal de rétrodiffusion obtenu par la mesure C-OTDR utilisant l'optimisation du balayage du laser :

- détection de tous les types d'événements ponctuels présents sur la fibre (perte ponctuelle, réflexion optique, fin de fibre) qui entraînent des variations de puissance Rayleigh supérieures aux variations causées par le CRN (e.g : supérieur à 1,7 % (0,07 dB) pour une résolution de 2 m);

3. Les petites fluctuations locales d'intensité mesurées sur la courbe de diffusion Rayleigh ne sont pas toutes liées au phénomène de CRN et dépendent également du facteur de rétrodiffusion de la fibre [126, 127, 128]. Certaines de ces fluctuations sont intrinsèquement liées à l'état de la fibre lors de sa fabrication, causées par des impuretés et imperfections de ce matériau amorphe, et restent figées dans la silice. A l'inverse du CRN, ces fluctuations ne varient pas dans le temps, et dans le cadre d'une instrumentation de structure ne perturberaient pas la mesure du ratio de Landau Placzek puisqu'il est réalisé des mesures relatives et non absolues. Ainsi, éliminer ces oscillations ne fausse pas la mesure du ratio, d'autant que la courbe de puissance Brillouin ne présente pas ces fluctuations puisque l'interaction lumière-matière n'est pas de même nature.

- découpage de la ligne optique par tronçons contenus entre deux événements ponctuels détectés;
- comparaison point à point des pertes linéiques pour chaque tronçon (permet de déterminer les variations de pente des pertes dans un même tronçon). Nous évaluons, dans chaque tronçon, les pertes linéiques sur une fenêtre glissante d'une taille d'au moins 50 % de celle du tronçon et se déplaçant tous les points de mesure. Lorsque la variation de pertes linéiques entre deux fenêtres glissantes est plus forte que 0,4 dB/km, on estime qu'il y a un changement de pertes au sein-même du tronçon;
- régression linéaire et détermination des différents coefficients de pertes linéiques le long de la fibre (exprimés en dB/km);
- création d'un tableau d'analyse des pertes optiques le long de la fibre.

Pour illustrer nos propos, nous allons prendre une mesure C-OTDR réalisée par l'interrogateur sur une fibre de plus de 600 m. Sur cette mesure, le bruit CRN est déjà optimisé au maximum grâce au processus de balayage du laser. La mesure est présentée en Figure IV.14.

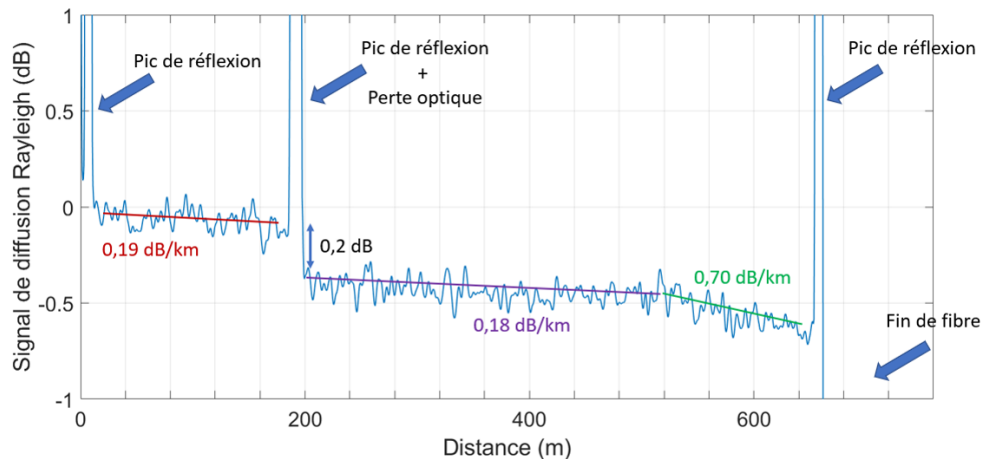


FIGURE IV.14 – Mesure C-OTDR réalisée par l'interrogateur DSTS et analyse de celle-ci.

A partir de cette courbe, l'algorithme définit les différents événements ponctuels qui sont ici au nombre de trois. Il y a donc deux tronçons de fibre à analyser, un premier entre 0 m et 185 m et le second entre 200 m et 655 m. Par la suite, une analyse point à point des pertes linéaires sur les deux tronçons permet d'évaluer un changement de pente sur le deuxième tronçon aux alentours de 525 m et lié à une forte atténuation par micro-courbures causée par un enroulement serré de la fibre à partir de cette distance. Il est ensuite possible de réaliser une régression linéaire sur les trois sections de manière à éliminer les fluctuations du signal. Toutes ces données sont intégrées et catégorisées pour ensuite corriger la mesure de puissance de diffusion Brillouin par la méthode du ratio de Landau Placzek.

Ce traitement numérique permet donc de s'affranchir des fluctuations locales d'intensité sur la mesure C-OTDR. Il est malgré tout nécessaire de limiter au maximum le bruit CRN par le balayage du laser puisque la fiabilité de ce type de traitement numérique dépend fortement des données en entrée.

IV.B.3 Discrimination de la mesure de température et de déformation sur la mesure de diffusion Brillouin

L'étude précédente nous a permis de minimiser le bruit de cohérence sur la mesure C-OTDR avec des améliorations matérielles mais également un traitement des données spécifique. Nous allons maintenant nous focaliser sur la mesure combinée de la fréquence et de la puissance de rétrodiffusion Brillouin par l'utilisation du ratio de Landau Placzek. Pour cela nous avons mis au point un banc d'essai permettant, dans un premier temps, de valider la mesure puis de calibrer le nouvel interrogateur développé.

IV.B.3.a Banc d'essai de validation d'une mesure distribuée indépendante de la température et de la déformation

Le banc d'essai réalisé pour valider cette mesure est constitué de deux cylindres fabriqués à partir de matériaux différents. La Figure IV.15 représente une photographie ainsi qu'un schéma de ce banc.

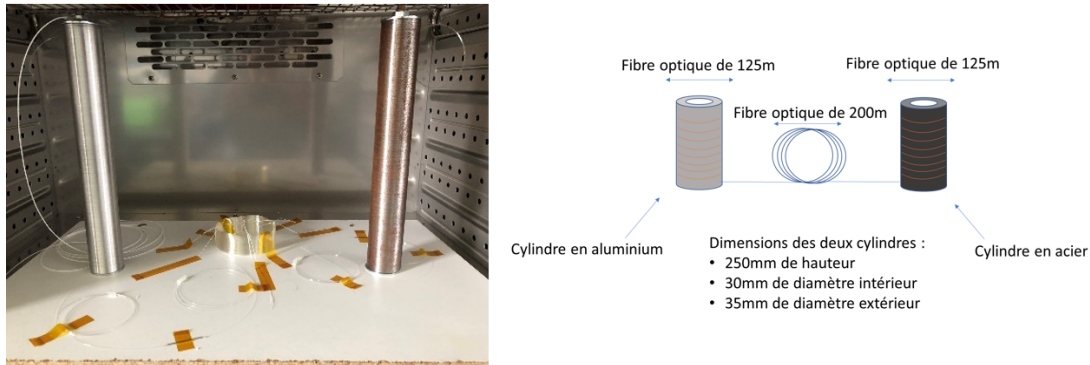


FIGURE IV.15 – Banc d'essai utilisé pour valider et caractériser la mesure indépendante de la température et de la déformation par l'interrogateur.

Les deux cylindres ont une hauteur de 250 mm, un diamètre externe de 35 mm et une épaisseur de 5 mm. Ils sont disposés sur la même plaque. Le premier est entièrement en aluminium, matériau présentant un coefficient de dilatation thermique de l'ordre de $23.10^{-6}K^{-1}$. Le second est en acier avec un coefficient de dilatation thermique de $12.10^{-6}K^{-1}$. La longueur totale de la fibre est de 450 m composée de 125 m de fibre enroulée autour du premier cylindre, puis 200 m de fibre optique non contrainte, et enfin 125 m de fibre enroulée sur le second cylindre. Cette fibre optique est une fibre monomode Draka Bendbright XS, de spécification ITU-T G.657, intrinsèquement résistante aux pertes par courbure. Ce banc d'essai est placé dans une enceinte climatique, ce qui nous permet ainsi de faire varier la température de la totalité du système et donc de créer des contraintes sur la fibre optique par dilatation thermique des cylindres. L'objectif étant de déterminer les coefficients de sensibilité $C_{I_{Be}}$ et $C_{I_{BT}}$ liés à la mesure d'intensité Brillouin.

Comme nous l'observons en Figure IV.16, l'interrogateur DSTS est connecté au banc d'essai placé dans l'enceinte climatique via une fibre d'environ 200 m dans une boîte isolée thermiquement et contrôlée autour de la température du laboratoire. Cette fibre, disponible au laboratoire durant nos mesures, est une

SMF28e+ qui présente un décalage fréquentiel Brillouin d'environ 10,8 GHz. L'intérêt de cette portion de fibre, qui ne subira pas de changement de température, est de montrer durant nos essais la stabilité en puissance de la mesure sur une portion dont les conditions physiques ne varient pas. La fibre de référence connectée à l'interrogateur est une fibre SMF28-ULL que nous avons déjà présentée précédemment.

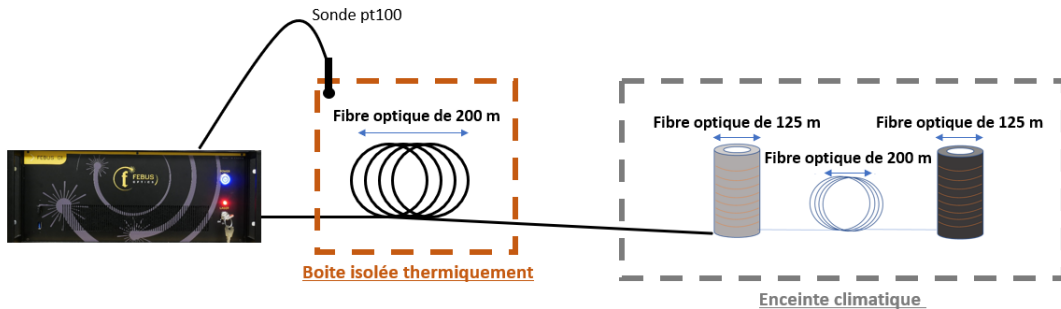


FIGURE IV.16 – Schéma de la ligne optique du banc d'essai pour la mesure indépendante de température et de déformation par l'interrogateur DSTS.

IV.B.3.b Mesure distribuée de température indépendante de la déformation

Nous avons utilisé le banc de test pour valider et caractériser la mesure distribuée du B-OTDR DSTS. L'enceinte climatique a été réglée pour réaliser plusieurs paliers de température et à chacun de ces paliers, une mesure distribuée de diffusion Rayleigh et Brillouin a été réalisée. Les paramètres clés de ces mesures sont définis dans le tableau IV.5.

Résolution spatiale	2 m
Temps de mesure / acquisitions	15 min / 3 500 000 acquisitions
Balayage du laser / Nombre de mesures décorréllées / CRN théorique	250 GHz / 5000 / 1,4 %
Paliers de température testés	22 °C / 23 °C / 25 °C / 35 °C / 45 °C

TABLE IV.5 – Configuration de l'interrogateur pour les essais de validation de la méthode du ratio de Landau Placzek pour une mesure indépendante de température et de déformation.

La Figure IV.17 représente une cartographie du spectre optique distribué en fonction de la distance. Nous pouvons noter plusieurs points :

- la mesure de rétrodiffusion Rayleigh est observée sur la cartographie à une fréquence proche de 200 MHz qui correspond à la fréquence du modulateur acousto-optique présent dans l'appareil. On observe 3 pics d'intensité aux distances correspondant aux 2 connecteurs présents sur la ligne optique qui connectent l'interrogateur à la ligne (0 m) et la fibre dans la boîte isolée à l'enceinte climatique (200 m). Le dernier pic correspond à la réflexion en fin de fibre (650 m) ;

- on observe également un premier spectre Brillouin à partir de 0 m jusqu'à 200 m correspondant à la fibre placée dans la boîte isolée thermiquement. Ce spectre est à une fréquence de battement d'environ 350 MHz. Puis un second spectre Brillouin entre 200 m et 650 m correspond au banc d'essai placé dans l'enceinte climatique. Ce spectre est mesuré à une fréquence autour de 500 MHz.

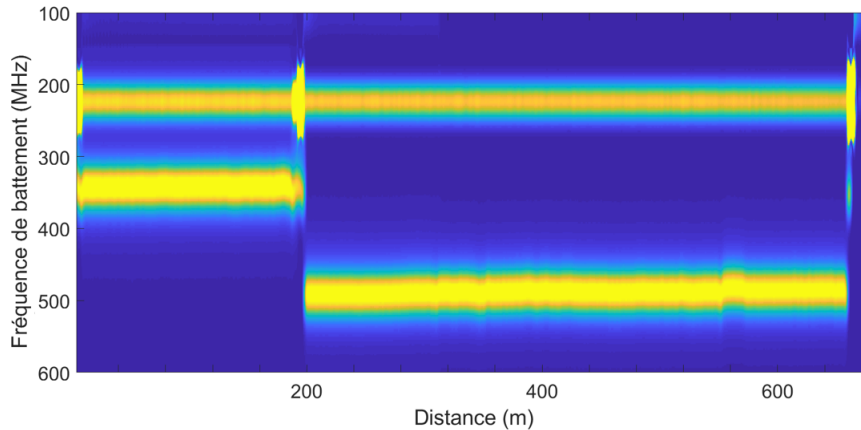


FIGURE IV.17 – Spectre optique distribué des diffusions Brillouin et Rayleigh mesurées simultanément par l'interrogateur.

La Figure IV.18 correspond à un spectre obtenu à 300 m de l'interrogateur. C'est à partir de ce spectre que nous pouvons en déduire les mesures de fréquence et puissance Brillouin ainsi que la mesure des pertes optiques dans la fibre à partir de la rétrodiffusion Rayleigh.

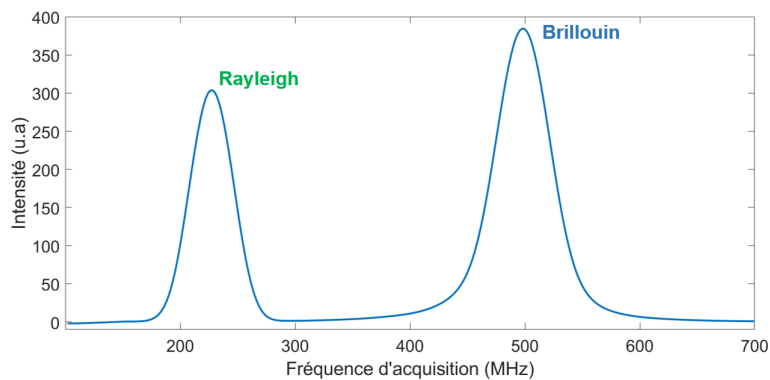


FIGURE IV.18 – Spectres optiques de diffusion Brillouin et Rayleigh mesurés simultanément par l'interrogateur en un seul point de la fibre.

Le traitement de la mesure de l'interrogateur DSTS, encore appelé FEBUS G2-R, est relativement similaire à celui du B-OTDR standard présenté dans le chapitre II. Il consiste en deux étapes :

- **évaluer la fréquence du pic de diffusion Brillouin** : la mesure de la fréquence de diffusion Brillouin de la fibre est très similaire à ce qui est déjà réalisé par l'interrogateur FEBUS G1-R;

- **évaluer la puissance des rétrodiffusions Brillouin et Rayleigh** : la détermination des puissances de diffusion Rayleigh et Brillouin se fait en calculant la moyenne des points d'intensité qui se trouvent au-dessus de la largeur à mi-hauteur des deux diffusions.

La Figure IV.19 montre la mesure en température réalisée par l'interrogateur en analysant uniquement la fréquence de la diffusion Brillouin. Les deux cylindres étant à la même température, on voit sur cette mesure que les effets de la dilatation thermique faussent la mesure absolue de température. En effet, sur une mesure à une température de 40 °C, les portions de fibre sur les deux cylindres sont évaluées comme étant à une température de plus de 45 °C. Ces portions perçoivent à la fois l'évolution de la température mais également l'évolution de leur déformation due à l'expansion des cylindres, ce qui engendre une mauvaise interprétation du B-OTDR. Le pic observé sur le deuxième cylindre est lié à une déformation excessive causée par la colle appliquée sur la fibre pour la maintenir enroulée autour du cylindre. Les petites fluctuations de température observées sont liées à des variations de la fréquence Brillouin qui dépend des caractéristiques locales de la fibre (indice effectif, propriété du matériau,...) mais également à de la déformation résiduelle.

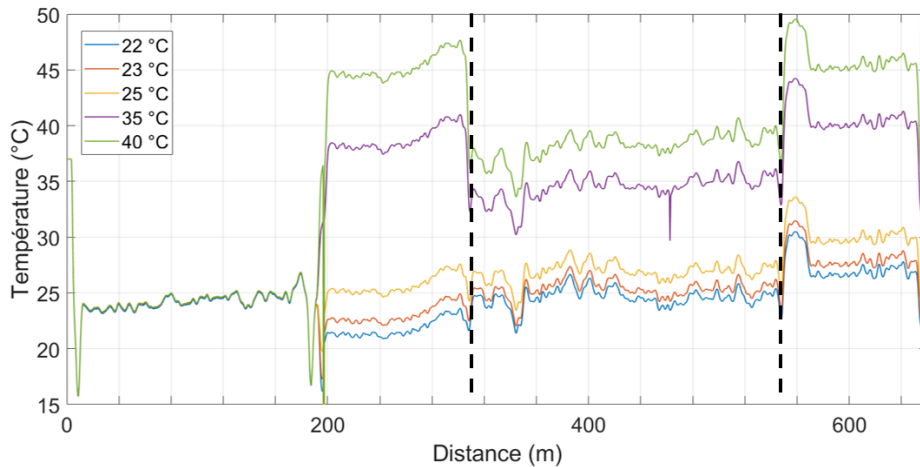


FIGURE IV.19 – Températures de la fibre à différents paliers issues d'une mesure B-OTDR standard résolue uniquement en fréquence.

Les résultats de la mesure des deux puissances de diffusion sont affichés en Figure IV.20 :

- **courbe de diffusion Rayleigh (Figure IV.20a)** : cette figure représente la puissance de diffusion Rayleigh. On observe sur la première portion de 0 m à 200 m, la fibre isolée dans la boîte, en dehors de l'étuve, et dont la température est stable durant tous les essais. La deuxième portion correspond à la longueur de fibre présente sur le banc d'essai dans l'étuve. Ces courbes de diffusion Rayleigh nous montrent une certaine stabilité de la mesure quelque soit la température de l'étuve, ce qui valide la réduction du phénomène de CRN effectuée. Néanmoins, quelques points de mesure varient d'une température à l'autre, signe que le CRN est réduit mais que son influence n'est pas complètement annihilée ;

- **courbe de diffusion Brillouin (Figure IV.20b)** : ce graphique montre quant à lui les courbes de la puissance de diffusion Brillouin qui témoignent de la sensibilité de la diffusion Brillouin à la température. En effet, la mesure sur la fibre placée en dehors de l'étuve ne varie pas durant les essais tandis que la portion de fibre dans l'étuve présente une puissance de diffusion Brillouin évoluant en fonction de la température.

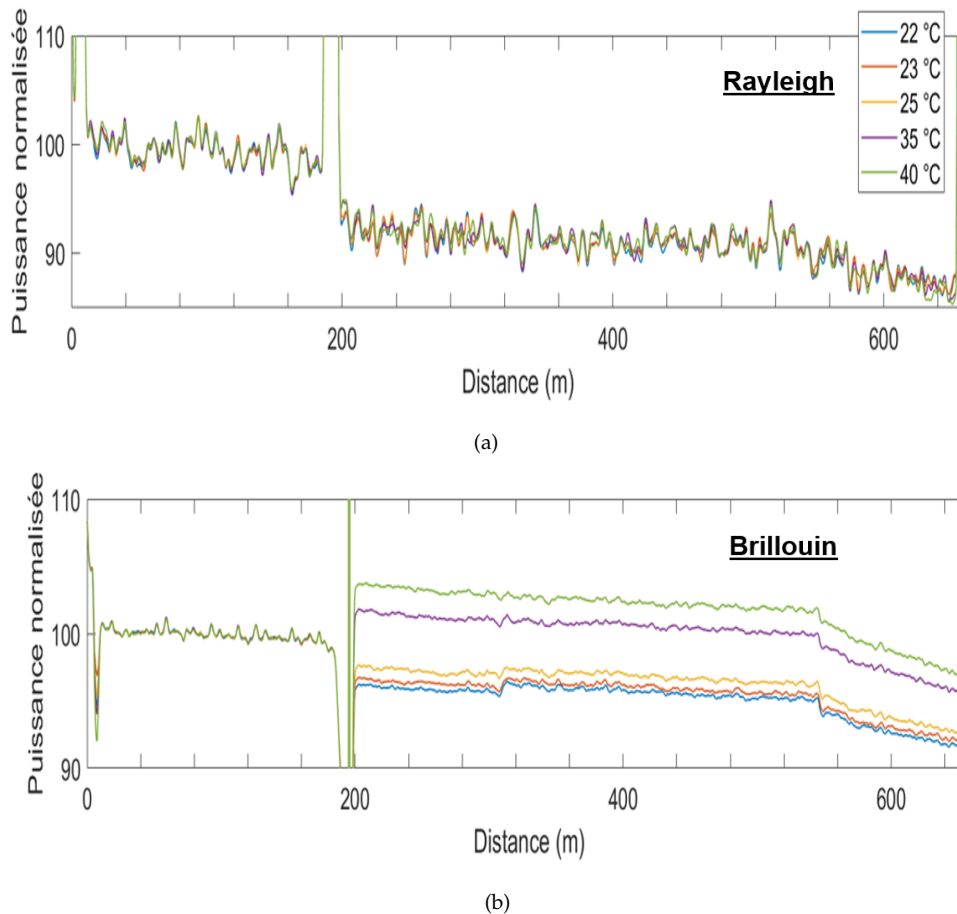


FIGURE IV.20 – Mesure des puissances de diffusion Rayleigh (a) et Brillouin (b) durant les essais à différentes températures de l'étuve.

On observe également sur ces mesures que les fluctuations du signal sont bien plus importantes sur la mesure de rétrodiffusion Rayleigh que sur la mesure de diffusion Brillouin. Cela est causé, en plus du phénomène de cohérence mentionné, par la différence d'interaction lumière-matière, car dans un cas l'interaction de la lumière se fait avec les phonons de la fibre et dans l'autre avec les impuretés présentes dans la silice. Certaines des fluctuations observées sur le signal Rayleigh sont majoritairement liées aux caractéristiques intrinsèques au matériau de la fibre et donc déterministes. Les autres fluctuations sont causées par le bruit de cohérence qui n'est pas totalement éliminé par le système.

IV.B.3.b.i Détermination des pertes optiques sur la fibre et correction sur la mesure de diffusion Brillouin

Nous allons présenter la correction des pertes optiques sur la mesure de diffusion Brillouin pour le premier test effectué avec une température de l'étuve de 22 °C. La mesure C-OTDR est présentée en Figure IV.14 que nous avons déjà montrée lors de la présentation de l'optimisation numérique réalisée (IV.B.2.e). On notera, malgré les spécifications de cette fibre pour la résistance aux courbures, que de fortes pertes à partir de 500 m sont liées à des micro-courbures causées par de la rouille apparue sur le cylindre en acier.

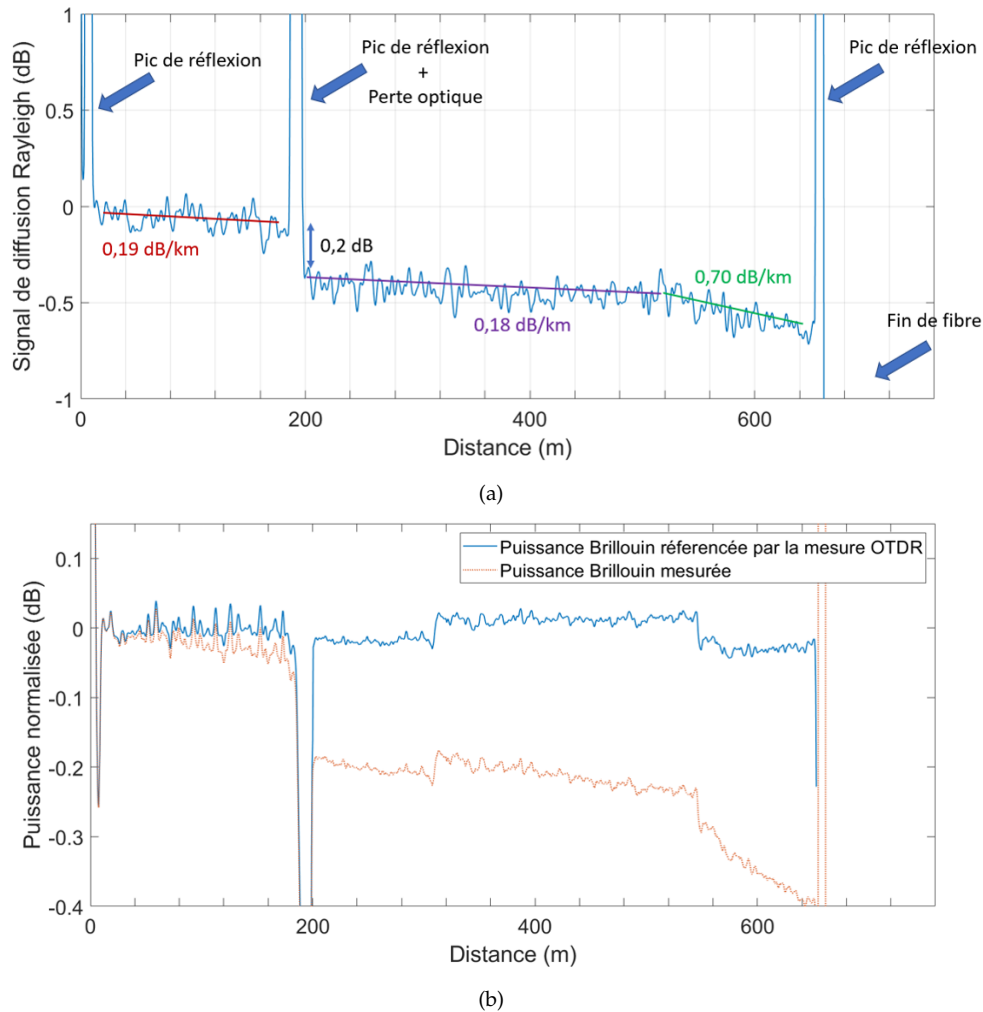


FIGURE IV.21 – Détermination des pertes optiques sur la mesure de diffusion Brillouin. (a) Rappel de la Figure IV.14 : Mesure et analyse des pertes optiques par le C-OTDR. (b) Mesure de la puissance de diffusion Brillouin corrigée par l'analyse de la trace OTDR.

A partir des données issues de la trace C-OTDR, il est possible de corriger toutes les pertes optiques sur la mesure de la puissance Brillouin et notamment celles liées aux pertes linéiques dans la fibre. Les résultats sont présentés en Figure IV.21b avec, en pointillés, la mesure non corrigée et, en trait plein, la mesure corrigée.

IV.B.3.b.ii Mesure distribuée du ratio de Landau Placzek

Nous avons procédé à la mesure de la puissance de diffusion Brillouin en fonction des différents paliers de température appliqués à l'expérimentation. Le référencement de cette mesure de puissance s'est donc fait via la méthode du ratio de Landau Placzek : I_R/I_B (voir l'expression IV.2).

La Figure IV.22 correspond aux mesures sans optimisation numérique de l'algorithme présenté en partie IV.B.2.e. Il s'agit de mesures relatives pour différents deltas de température par rapport à un état de référence qui correspond au palier en température à 22 °C. On estime une résolution de presque 3 °C à cause des fluctuations importantes sur la mesure. Nous observons également que plus le delta de température est important, plus les courbes présentent des fluctuations. Cette erreur de mesure supplémentaire est proportionnelle au delta des deux ratios. S'agissant de mesures relatives, ce bruit de mesure provient majoritairement des variations du niveau de puissance de diffusion Brillouin qui augmente ou diminue avec la température.

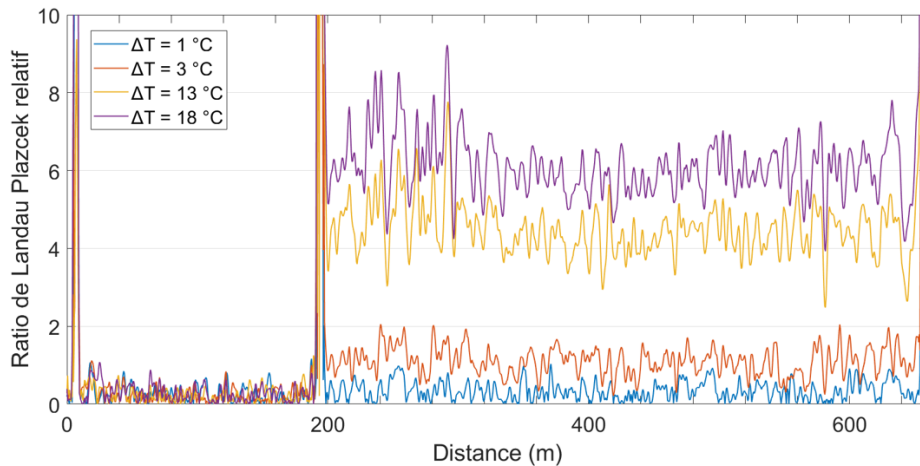


FIGURE IV.22 – Mesure du ratio relatif de Landau Placzek sans optimisation numérique de la mesure d'intensité Rayleigh.

La Figure IV.23 représente la mesure optimisée numériquement par la régression linéaire réalisée sur la mesure de diffusion Rayleigh. On observe dans ce cas les différentes variations de température avec une résolution en température proche de 1 °C, ce qui correspond à la sensibilité voulue pour ce type d'interrogation. Ces premiers résultats laissent malgré tout apparaître une sensibilité de la puissance Brillouin à la déformation. Cet aspect est notamment visible avec l'apparition d'un plateau au niveau du premier cylindre lorsque l'on est à des deltas de température de 13 °C et plus. Nous discuterons plus en détail de ce point dans le paragraphe suivant.

Ces figures confirment dans un premier temps la sensibilité du ratio de Landau Placzek à la température mais également l'avantage d'utiliser le traitement numérique spécifique appliqué à la mesure C-OTDR. A partir de ces résultats, nous pouvons obtenir les informations sur la sensibilité de notre interrogateur à la température et à la déformation. Nous pouvons également comparer cette sensibilité avec l'état de l'art et notamment les résultats obtenus par PARKER et al. [42].

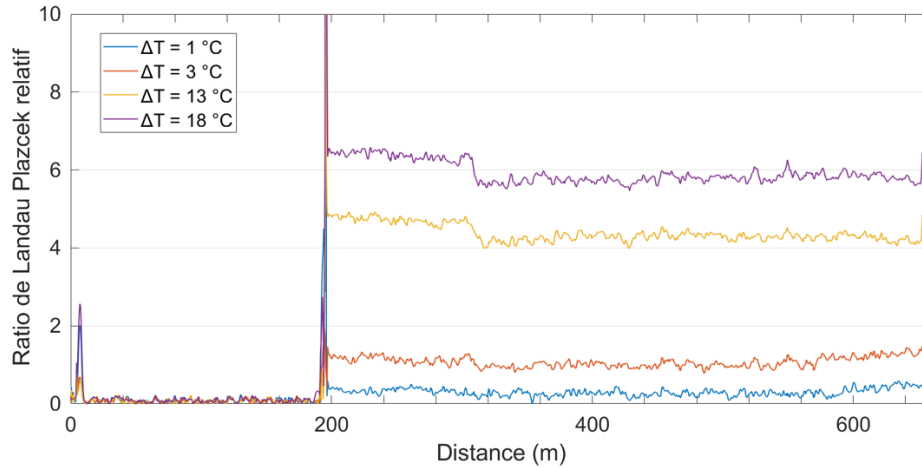


FIGURE IV.23 – Mesure relative du ratio de Landau Plazcek issu du traitement d'optimisation de la mesure d'intensité Rayleigh.

IV.B.3.c Détermination des coefficients de sensibilité en température et en déformation de l'interrogateur

En corrélant les deux mesures de fréquence et d'intensité Brillouin, il nous est possible d'en déduire les coefficients de sensibilité de notre interrogateur à la température et à la déformation. En effet, notre banc de test est conçu spécifiquement dans ce but.

Coefficient de sensibilité en température de l'intensité Brillouin

Nous connaissons un des deux paramètres qui est la température appliquée sur le banc puisque celle-ci est définie par l'enceinte climatique que nous contrôlons durant ces essais. La Figure IV.24 représente la sensibilité à la température de la puissance Brillouin sur la fibre testée. Pour réaliser cette courbe, nous avons relevé la moyenne des variations de puissance Brillouin uniquement sur la partie de fibre se situant entre les deux cylindres où celle-ci est totalement libre de contraintes.

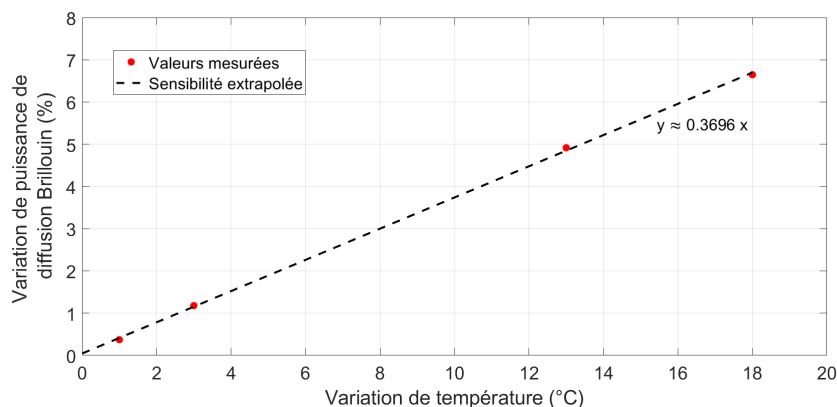


FIGURE IV.24 – Courbe de sensibilité à la température de la puissance de diffusion Brillouin. Les moyennes des variations de puissance Brillouin, en fonction de la température ont été relevées sur la fibre libre de contraintes et placée entre les deux cylindres.

On obtient une sensibilité de la puissance Brillouin $C_{I_B T} \approx 0,37 \pm 0,074\%/^{\circ}\text{C}$, en prenant en compte l'incertitude liée à l'enceinte climatique.

Coefficient de sensibilité en déformation de l'intensité Brillouin

Le banc de test a été conçu suivant la méthode de YAMAUCHI [129] qui permet de définir les coefficients de sensibilité suivant les systèmes d'équations IV.12 et IV.13. Ces équations, valables sur les portions de fibre enroulées sur les deux cylindres, sont vraies dans le cas où l'on considère que seule de la dilatation thermique est présente et qu'il n'existe aucune déformation additionnelle sur les deux cylindres (A et B).

$$\begin{aligned}\Delta\nu_B^A &= (C_{\nu_B T} + \alpha_{alu}C_{\nu_B \epsilon}) \Delta T \\ \Delta I^A &= (C_{I_B T} + \alpha_{alu}C_{I_B \epsilon}) \Delta T\end{aligned}\quad (IV.12)$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_B^B &= (C_{\nu_B T} + \alpha_{acier}C_{\nu_B \epsilon}) \Delta T \\ \Delta I^B &= (C_{I_B T} + \alpha_{acier}C_{I_B \epsilon}) \Delta T\end{aligned}\quad (IV.13)$$

où $C_{\nu_B \epsilon}$ et $C_{I_B \epsilon}$ sont les coefficients de sensibilité en déformation de la fréquence et de l'intensité de diffusion Brillouin. $C_{\nu_B T}$ et $C_{I_B T}$ sont les coefficients de sensibilité en température de la fréquence et de l'intensité Brillouin. α_{alu} et α_{acier} sont respectivement les dilatations thermiques des cylindres en aluminium et en acier de notre expérimentation.

En maîtrisant les variations de température ΔT au niveau de l'expérimentation, en connaissant les coefficients $C_{I_B T}$, $C_{\nu_B T}$, $C_{\nu_B \epsilon}$, ainsi qu'en mesurant les variations de fréquence et d'intensité $\Delta\nu_B$ et ΔI sur chaque cylindre; il nous est possible de résoudre ce système d'équation et d'en définir le coefficient $C_{I_B \epsilon}$ de sensibilité en déformation de l'intensité Brillouin. Nous avons calculé ce système d'équations, pour chaque valeur ΔT (1 °C, 3 °C, 13 °C et 18 °C) réglée pendant l'expérimentation avec l'enceinte climatique. Les solutions du système nous permettent de présenter nos mesures expérimentales de sensibilité dans l'équation IV.14.

$$[C_{I_B \epsilon} \quad C_{I_B T}] = [5 \pm 8.10^{-4} \%/ \mu\epsilon \quad 0.37 \pm 0.074 \%/K] \quad (IV.14)$$

Nous constatons que la valeur du coefficient pour la température est relativement similaire à ce qu'on peut trouver dans la littérature [42, 70]. Cependant, le coefficient pour la déformation, malgré le fait qu'il soit du bon ordre de grandeur, est de signe opposé à ce que l'on peut trouver dans la littérature. Par faute de temps au cours de cette thèse, nous n'avons pu étudier de manière approfondie la raison de cette différence qui se porterait sûrement sur un phénomène supplémentaire apparaissant sur le banc d'essai et qui n'a pas été pris en compte lors des mesures.

Cette erreur étant en contradiction avec les résultats antérieurs, nous avons décidé, pour la suite de ces travaux, de n'utiliser que les coefficients de sensibilité que l'on peut trouver dans la littérature [42, 70].

$$[C_{I_B \epsilon} \quad C_{I_B T}] = [-8.10^{-4} \%/ \mu\epsilon \quad 0.36 \%/K] \quad (IV.15)$$

A partir de ces coefficients, nous avons pu résoudre l'équation matricielle reliant la fréquence et la puissance de diffusion Brillouin aux paramètres de température et de déformation. La Figure IV.25 présente les résultats de mesure obtenus avec l'interrogateur sur le banc de test pour deux paliers de température distincts. On observe sur les courbes de déformation, en rouge, que le premier cylindre se déforme plus que le second sous l'effet de la température. Ce point confirme bien la différence de dilatation thermique de l'aluminium qui est plus importante que celle de l'acier. Par ailleurs, les courbes noires de température montrent les deux paliers en température de l'enceinte climatique, à 22 °C et 40 °C.

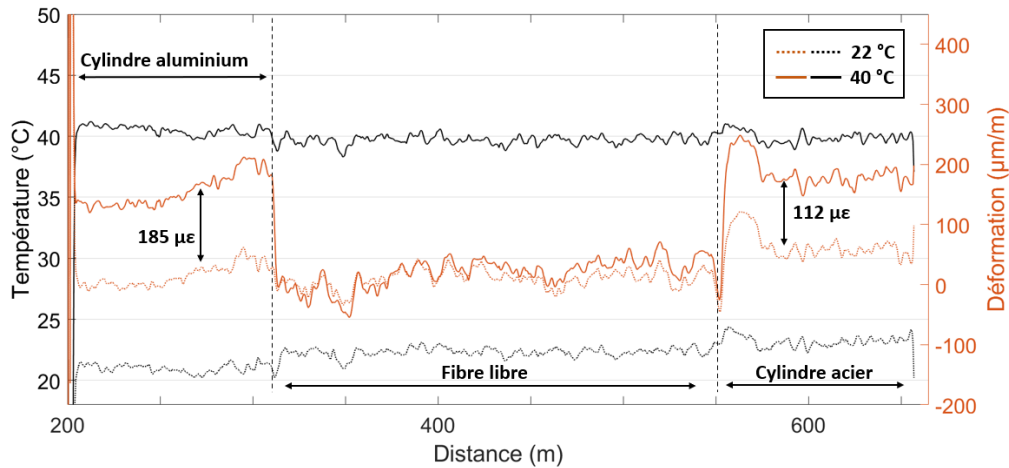


FIGURE IV.25 – Courbe de température et de déformation obtenue avec l'interrogateur DSTS sur le montage expérimental composé par les deux cylindres.

IV.B.4 Performances de la mesure répartie de déformation indépendante de la température par rétrodiffusion Brillouin spontanée

Nous avons évalué les performances de ce nouvel interrogateur de la même manière que pour l'interrogateur FEBUS G1-R et suivant la norme IEC 61757-2-2 décrite en partie II.B.2. Nous avons procédé à une succession de 20 mesures dans des conditions totalement identiques et mesuré le double de l'écart-type pour toutes ces mesures en chaque point spatial de la fibre.

L'évaluation de la répétabilité de mesure a été réalisée sur une bobine de 1 km puis sur 10 km. Nous avons évalué à la fois la mesure de la fréquence de diffusion Brillouin mais également la mesure de la puissance de diffusion Brillouin corrigée par l'algorithme spécifique appliqué à la diffusion Rayleigh. A partir de ces valeurs de répétabilité en fréquence et en puissance, nous en déduisons donc la répétabilité de l'interrogateur en température et en déformation.

Performances de l'interrogateur sur 1 km de fibre

Grâce aux mesures réalisées sur la puissance et la fréquence de diffusion Brillouin nous avons pu déduire la répétabilité de mesure de l'interrogateur à la fois en déformation et en température. La Figure IV.26 représente la répétabilité distribuée le long d'une fibre de 1 km. Nous nous intéressons uniquement aux valeurs maximales en fin de fibre, comme il est recommandé de le faire suivant la norme. Nous observons sur ces courbes une répétabilité de notre interrogateur de l'ordre de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $20\text{ }\mu\text{m/m}$, pour une fibre de 1 km, avec une résolution spatiale de 2 m, et un nombre de moyennes de 10 millions. Comme nous allons le voir, ces performances sont moins bonnes que celles obtenues avec l'interrogateur standard B-OTDR. Cela s'explique par la nécessité de réaliser une mesure de la puissance Brillouin, moins précise qu'une mesure en fréquence. Néanmoins ces résultats correspondent aux besoins de l'industrie qui peut consentir à une dégradation des performances de mesure si cela permet de séparer les deux paramètres physiques.

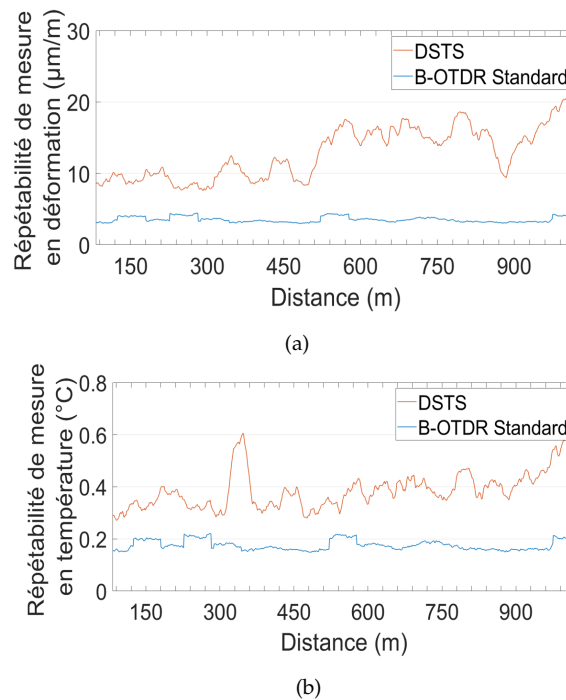


FIGURE IV.26 – Répétabilité de la mesure de diffusion Brillouin en déformation (a) et en température (b) pour une distance de 1 km et 2 m de résolution spatiale.

Performances de l'interrogateur sur 10 km de fibre

Nous avons, de la même manière, évalué la répétabilité de mesure sur une fibre de 10 km avec une répétabilité obtenue de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $75\text{ }\mu\text{m/m}$ qui est, là encore, moins bonne que celle d'une mesure B-OTDR classique. Cependant, ces performances de mesure correspondent à une majorité des besoins dans l'instrumentation de structure.

Conclusion sur les performances de mesure de l'interrogateur

Nous pouvons conclure que le nouvel interrogateur DSTS développé durant cette thèse répond à un réel besoin en proposant une mesure indépendante de température et de déformation avec la possibilité de découpler les deux paramètres physiques en une seule mesure et sur une seule fibre optique. Les performances obtenues avec cet appareil sont en adéquation avec les besoins de l'industrie, notamment pour le génie civile et les forages, où une répétabilité de mesure de 1 °C sur de courtes distances de fibre est attendue. De plus, la détection simultanée des diffusions Brillouin et Rayleigh, avec la même chaîne de mesure opto-électronique, évite intrinsèquement toute dérive spatiale et temporelle de la mesure, ce qui est un des points novateurs du système. Une comparaison des performances de mesure du nouvel interrogateur entre un mode B-OTDR standard (i.e. mesure uniquement basée sur la fréquence de diffusion Brillouin) et le mode DSTS est présentée dans le Tableau IV.6. La possibilité de réaliser une mesure simultanée de la fréquence et de la puissance Brillouin, ne restreint pas l'opérateur qui, s'il le souhaite, peut seulement obtenir une mesure standard B-OTDR pour de meilleures performances mais sans la décorrélation de la température et de la déformation. Nous avons présenté certains points d'améliorations comme l'utilisation d'un laser permettant une meilleure réduction du bruit de cohérence, avec une plage de balayage fréquentiel plus grande, ou encore une augmentation de la rapidité de calcul informatique et des optimisations de la chaîne de détection (photodiode, carte d'acquisition) pour améliorer le rapport signal sur bruit, très important pour la mesure de puissance Brillouin.

Mesure B-OTDR / Mesure DSTS	Distance de 1 km	Distance de 10 km
Répétabilité en température	0,2 °C / 0,6 °C	0,3 °C / 3 °C
Répétabilité en déformation	4 µm/m / 20 µm/m	6 µm/m / 75 µm/m

TABLE IV.6 – Comparaison des performances de mesures de l'interrogateur, pour une résolution spatiale de 2 m, entre un mode B-OTDR standard et le nouveau mode DSTS.

IV.C Déploiement du système pour une application de forage

Nous allons présenter une mesure réalisée sur un puits destiné à des essais de recherche et développement en géophysique avec le nouvel interrogateur DSTS. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons donner beaucoup de détails sur le puits et sur l'infrastructure autour de celui-ci.

IV.C.1 Présentation du contexte

Nous sommes intervenus sur un puits d'une profondeur d'environ 2 km pour réaliser une mesure distribuée de son gradient de température, dans l'objectif de valider le nouvel interrogateur DSTS. Un câble "wireline"⁴ a été déployé au fond

4. Un câble wireline est un câble principalement utilisé pour descendre des outils en fond de puits. Ce câble est en acier, généralement de diamètre compris entre 1 et 2 cm, et contient de nombreux conducteurs électriques et des fibres optiques pour permettre l'alimentation et le transfert de données provenant des outils fixés à son extrémité. Les fibres à l'intérieur sont à structure libre pour limiter au maximum de les solliciter.

du puits via une unité de "logging"⁵. Ce câble est standard avec 2 fibres monomodes et 2 fibres multimodes, insensibles aux déformations car libres dans la gaine. Le câble contient par ailleurs des conducteurs électriques pour l'alimentation et la collecte des données de l'instrumentation traditionnelle (capteur de température, capteur de profondeur, etc...). Cette instrumentation est placée dans un outil fixé à l'extrémité du câble, situé au fond du puits, qui sert également de poids et permet la descente du câble. Sur cet outil, un système d'accroche permet d'ancrer le câble sur les parois du puits pour que celui-ci reste statique durant la mesure mais également pour diminuer la tension exercée.

Une campagne de mesure a été réalisée avec pour objectif de qualifier le nouvel interrogateur DSTS dans le cadre d'une application présentant un réel intérêt pour une mesure distribuée indépendante de température et de déformation. Pour valider ces mesures, nous avons également utilisé un interrogateur Raman OTDR connecté à une des fibres multimodes du câble. Trois types de mesures ont donc été effectuées durant cette campagne :

- une mesure B-OTDR standard réalisée avec le nouvel interrogateur mais en analysant seulement la fréquence de diffusion Brillouin ;
- une mesure DSTS de température et de déformation réalisée par le même interrogateur en utilisant cette fois la méthode du ratio de Landau Placzek ;
- une mesure Raman OTDR, réalisé par le second interrogateur, uniquement sensible à la température de la fibre dans le câble.

Nous rappelons qu'un câble "wireline" est soumis à plusieurs forces en régime statique dans un puits, ce qui va entraîner une déformation de celui-ci souvent très difficile à prédire et quantifier [130] :

- le poids de l'outil ainsi que le poids propre du câble : l'outil est suspendu au câble créant une force importante sur toute sa longueur déployée dans le puits, à laquelle s'ajoute le poids propre du câble qui est de moins en moins important à mesure que l'on se rapproche de l'outil ;
- la force de friction : le câble ainsi que l'outil sont insérés dans un puits d'un certain diamètre qui présente des parois parfois rugueuses. Cela engendre, à la fois sur l'outil mais aussi sur le câble, une force de friction qui est contraire au poids ;
- la poussée d'Archimède : un puits est généralement rempli de différents fluides, dépendants de la nature du forage, qui présentent des propriétés de densité spécifiques. Ces fluides créent donc une force de poussée en direction de la surface du puits ;
- la dilatation thermique : la température dans un puits augmente linéairement avec la profondeur si bien que les températures peuvent généralement dépasser les 100 °C en fond de puits. Cette augmentation génère de la dilatation thermique qui entraîne une déformation du câble descendu dans le puits. Cette déformation peut être une élongation ou, de manière contre-intuitive, une contraction en fonction de la configuration géométrique du câble [130]. En effet, certains câbles présentent une âme centrale faite de matériaux se dilatant beaucoup plus que l'armature externe du câble. Le cœur du câble étant contenu dans cette armature, celui-ci pourra seulement s'expandre radialement ce qui entraîne un raccourcissement du câble ;

5. Le terme logging correspond à l'action de descendre des outils au fond d'un puits via des câbles de type wireline.

- la force de pression hydrostatique : à mesure que la profondeur augmente dans un puits, la pression hydrostatique du fluide dans celui-ci augmente elle aussi. Les effets de la pression sur un câble "wireline" semblent la encore dépendants de la configuration géométrique de celui-ci. Quelques études ont été réalisées sur le sujet dont certaines se contredisent [131, 132]. D'autres études seraient nécessaires pour réellement expliquer le vrai comportement du câble avec la pression. Malgré tout, il semble que l'impact de la pression hydrostatique sur ce type de câble descendu dans un puits soit relativement faible.

Toutes les contributions énumérées précédemment ont un impact sur la longueur du câble réellement déployée dans le puits et donc sur la localisation en profondeur qui peut varier de plusieurs mètres ou dizaines de mètres pour un puits de quelques kilomètres de profondeur. Il est très difficile de prédire l'élongation du câble puisque tous ces paramètres ne sont pas homogènes en fonction de la profondeur du puits qui n'est pas non plus parfaitement vertical. Il s'agit donc d'un problème avec de nombreuses inconnues qui n'est soluble qu'en faisant de nombreuses approximations, ce qui souvent nous éloigne de la réalité. Pour cela des capteurs sont intégrés au niveau du câble permettant une mesure précise de la profondeur. Dans notre cas, où nous souhaitons réaliser une mesure distribuée par fibre optique, il est donc nécessaire d'avoir conscience de ce phénomène qui peut engendrer de la déformation, plus ou moins importante, sur le câble suspendu dans le puits. Il y a donc un réel intérêt pour l'industrie de pouvoir mesurer l'état de déformation de ce type de câbles en opération.

Un schéma de l'instrumentation de la campagne de mesure est présenté en Figure IV.27 et, pour des raisons de confidentialité, celui-ci est peu exhaustif. On observe sur la partie de gauche le schéma de l'installation en surface. L'interrogateur est connecté à une des extrémités du câble, enroulé sur un touret pour ensuite être inséré à la vertical dans le puits par des poulies et des élingues. Comme on peut le voir en tête de puits, le câble est fixé par un système de serrage pour qu'il ne puisse plus bouger. Au fond du puits, l'outil contenant toutes les sondes d'instrumentation est connecté à l'autre extrémité du câble. Cet outil possède également un système d'accroche aux parois du puits de manière à permettre un mou du câble de l'ordre du mètre. Cela permet de limiter au maximum les contraintes sur le câble et donc d'éviter une fatigue prématurée de celui-ci.

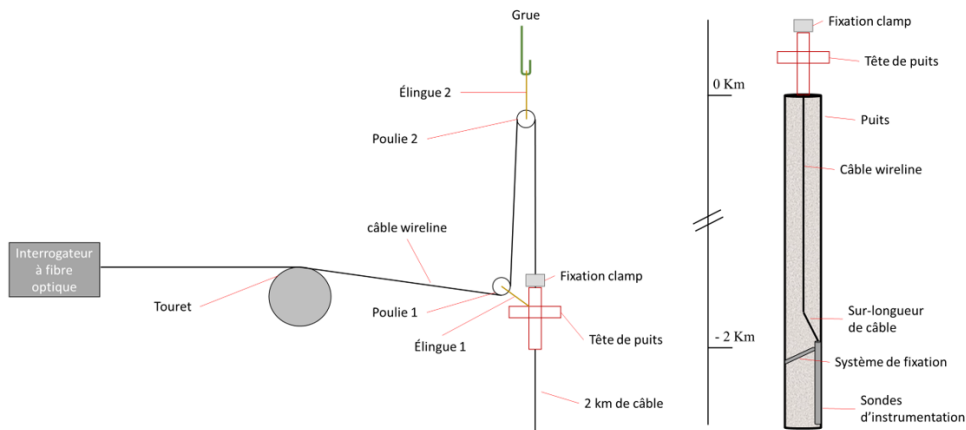


FIGURE IV.27 – Schéma de l'instrumentation du puits pour une mesure distribuée de température et de déformation.

IV.C.2 Mesures B-OTDR standard et Raman OTDR

Nous avons comparé dans un premiers temps la mesure B-OTDR standard et la mesure Raman OTDR sur le câble déployé à une profondeur de 2 km. Cette mesure a été réalisée au moyen de deux interrogateurs distincts : le B-OTDR DSTS, développé durant cette thèse, réalisant une mesure B-OTDR standard sensible simultanément à la température et à la déformation ; et un Raman OTDR analysant la diffusion Raman dans la fibre qui ne dépend que de la température dans la fibre.

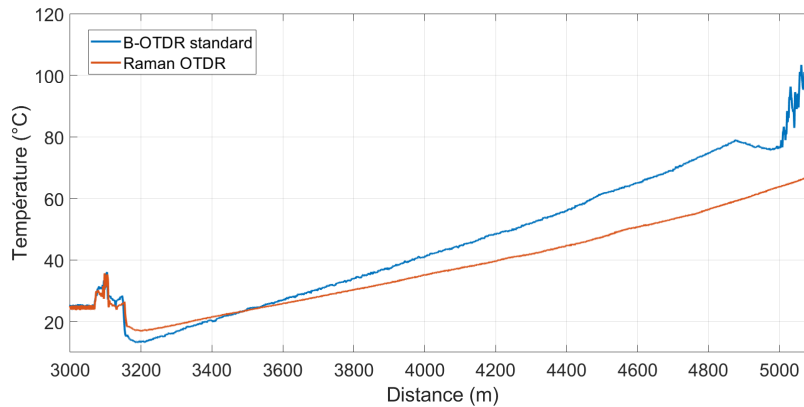


FIGURE IV.28 – Mesure B-OTDR et Raman OTDR de la température du câble inséré dans le puits et présentant un gradient thermique d'environ 26 °C/km .

La Figure IV.28 représente la superposition des courbes obtenues avec les deux interrogateurs. Les trois premiers kilomètres ne sont pas affichés sur ce graphique car correspondant à la portion de câble à l'extérieur du puits et enroulée sur le touret de l'unité de "logging". A une distance d'environ 3100 m, on observe une augmentation brusque de la température qui correspond à la sortie du câble du touret et à son cheminement jusqu'à la tête de puits comme nous l'avons montré sur la Figure IV.27. A cet endroit, la forte augmentation de température est liée à l'échauffement du sol par le soleil, cette mesure ayant été réalisée à la fin de l'été. Au niveau de la tête de puits, la mesure de température diminue ponctuellement puis on observe une nouvelle augmentation de la température, cette fois progressive, et liée au gradient thermique existant dans le puits et évalué entre 25 et 30 °C/km . Au fond du puits, la mesure Raman indique une température du câble de près de 65 °C , ce qui est confirmé par une sonde de température placée dans l'outil vers 5 km de profondeur. Nous observons que les deux courbes ne se superposent pas sur toute la longueur du câble ce qui nous laisse suggérer que de la déformation est présente sur la fibre insérée dans le câble. En effet, la mesure B-OTDR standard présente un biais avec une température mesurée supérieure de 10 °C par rapport à la vraie valeur. Le gradient thermique ainsi mesuré par l'interrogateur est de presque 40 °C/km , ce qui est une valeur impossible pour la configuration de ce puits. De plus, on observe sur la mesure Brillouin, peu avant l'outil, un autre biais sur la mesure de la température qui n'est pas présent sur la trace Raman. Cette forte variation de la fréquence Brillouin, de plus de 35 MHz (soit un décalage présumé de $\approx 35\text{ °C}$), semble sûrement causée par de la déformation présente sur le câble qui équivaut à une élongation potentielle de $700\ \mu\text{m/m}$.

Ces résultats laissent suggérer la présence de deux types de déformations :

- une déformation continue sur toute la longueur du câble avec un gradient lié au déploiement du câble dans le puits ;
- une déformation ponctuelle qui laisserait penser que l'ancrage de l'outil de fond de puits aurait finalement créé une elongation du câble au lieu justement de le détendre comme cela était prévu.

Cette campagne de mesure est donc une opportunité pour valider le fonctionnement de la technologie DSTS que nous avons développé et caractérisé durant cette thèse.

IV.C.3 Mesure B-OTDR DSTS de température et de déformation

Cette seconde mesure a été réalisée avec le nouvel interrogateur dans son mode DSTS permettant une séparation de la mesure de température et de déformation. Nous présentons en Figure IV.29 la cartographie des spectres de rétrodiffusion Rayleigh et Brillouin mesurés.

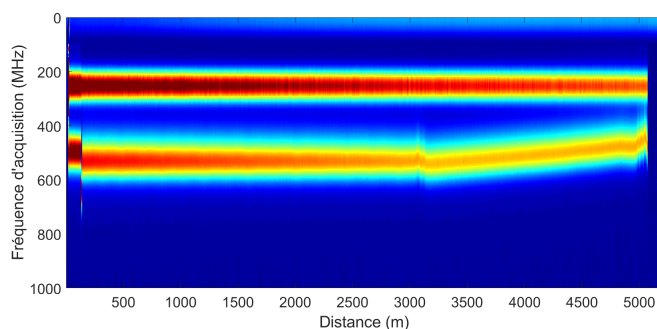


FIGURE IV.29 – Spectre des rétrodiffusions Brillouin et Rayleigh mesurées par l'interrogateur B-OTDR DSTS sur le câble inséré dans le puits sur 2 km de profondeur.

On observe, sur le début du spectre, 200 m de fibre optique directement en sortie de l'interrogateur qui correspondent à la fibre placée dans une boîte isolée thermiquement et servant de référence à la mesure. Cette fibre est ensuite connectée au câble qui a été déployé dans le puits. Les paramètres de mesure de l'interrogateur sont définis dans le Tableau IV.7.

Résolution spatiale	2 m
Temps de mesure / moyennes	4 min / 500 000 moyennes
Balayage du laser / Nombre de mesures décorréliées / CRN	250 GHz / 5000 / 1,7 %
Vitesse de balayage du laser	1 GHz/sec

TABLE IV.7 – Paramètres de configuration de l'interrogateur DSTS pour la mesure distribuée de température et de déformation sur le câble dans le puits.

La Figure IV.30 montre l'évolution des signaux de diffusion Rayleigh et Brillouin le long du câble issu du spectre optique détecté par l'interrogateur. On observe entre ces deux courbes une différence des fluctuations d'amplitude liée

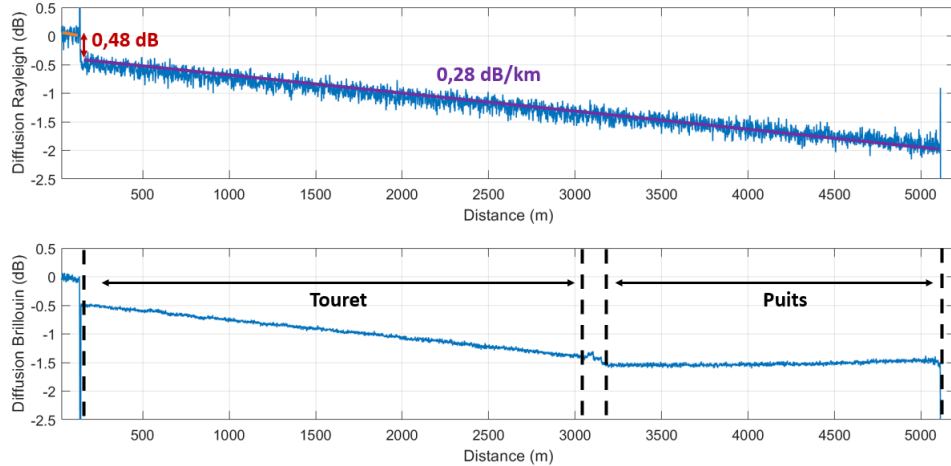


FIGURE IV.30 – Mesure des puissances de diffusion Brillouin et Rayleigh sur la fibre optique dans le câble.

au bruit de cohérence de la mesure de diffusion Rayleigh. Grâce au traitement numérique spécifique présenté en partie IV.B.2.e, nous pouvons mesurer une perte optique linéaire le long du câble de l'ordre de 0,28 dB par kilomètre. Cette valeur, plus conséquente que l'atténuation généralement observée pour une fibre optique nue, s'explique par les micro-courbures créées lors de l'insertion de la fibre optique dans le câble, ce qui peut être assez courant lors de la production de câbles. On observe également, sur le début de la ligne optique, une perte de 0,48 dB liée au connecteur présent entre le câble "wireline" et la portion de fibre optique servant de départ entre l'interrogateur et le câble. Les valeurs des pertes optiques observées sur la courbe de diffusion Rayleigh sont également présentes sur la courbe de diffusion Brillouin. Les différences entre les deux courbes sont dues aux variations de température sur le câble créant une augmentation de la puissance de diffusion Brillouin.

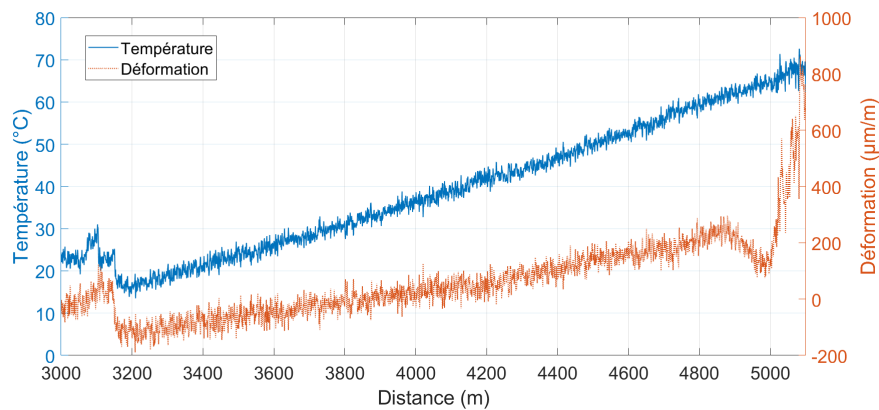


FIGURE IV.31 – Mesure indépendante de température et de déformation réalisée par l'interrogateur le long du câble descendu dans le puits.

A partir du traitement numérique présenté précédemment dans ce manuscrit, nous avons pu résoudre l'équation matriciel reliant la fréquence et la puissance Brillouin aux paramètres de température et de déformation. Pour cela nous avons

utilisé les coefficients de sensibilité présents dans la littérature et explicités dans l'équation IV.15. Les solutions de cette équation nous permettent de présenter deux courbes indépendantes, une de température et une de déformation telles qu'affichées en Figure IV.31.

Sur cette figure, la courbe en pointillé rouge correspond à la mesure de déformation tandis que la courbe en trait plein bleu correspond à la mesure de température. Nous observons l'augmentation progressive de la température le long du câble jusqu'à une température d'environ 65 °C au niveau de l'outil en fond de puits et un gradient thermique de 26,2 °C/km. Cette valeur est très proche de ce qui a été mesuré par l'interrogateur Raman et confirmée par la sonde de température placée dans l'outil du câble. Nous observons par ailleurs une compression de l'ordre de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ à l'entrée du puits et une augmentation progressive de la déformation jusqu'à plus de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ à une centaine de mètres avant l'outil. Cette variation pourrait être causée par une combinaison des différentes forces citées au début de cette partie et qui seraient : le poids propre du câble, la poussée exercées par le fluide du puits sur le câble, la dilatation thermique du câble, le poids de l'outil au bout du câble qui ne serait pas totalement neutralisé par l'ancrage. Ces raisons expliquent ainsi l'erreur sur la mesure du gradient thermique lorsque l'on se base uniquement sur la mesure standard B-OTDR (Figure IV.28).

A une distance de 4,8 km depuis l'interrogateur, qui correspond à une position proche de celle où l'outil est accroché dans le puits, on remarque un niveau de déformation important de la fibre, allant jusqu'à plus de 800 $\mu\text{m}/\text{m}$, et pouvant donc potentiellement conduire à une fatigue mécanique de la fibre si celle-ci reste soumise plusieurs jours à ces niveaux de déformation. Nous notons par ailleurs que les valeurs mesurées correspondent à la déformation perçue par la fibre, qui est sensiblement plus basse que la déformation du câble du fait de sa configuration laissant la fibre libre dans la gaine. Le motif de déformation à cet endroit est en accord avec ce que l'on observe sur la mesure B-OTDR DSTS, avec tout d'abord une relaxation de contrainte de la fibre de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ puis une traction ponctuelle de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$.

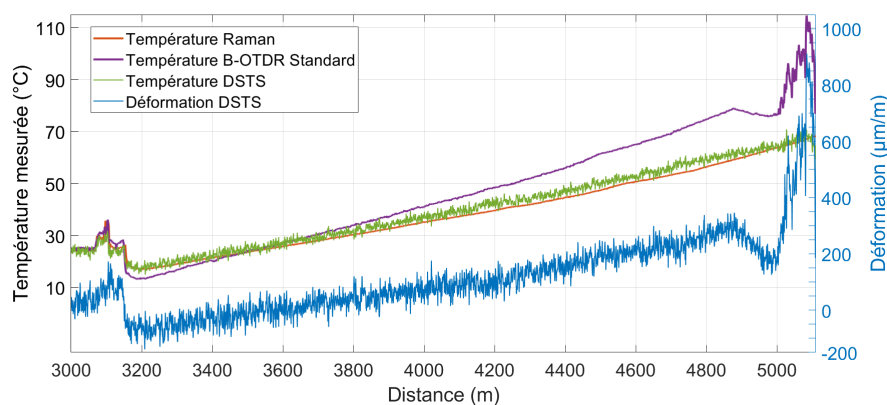


FIGURE IV.32 – Courbes comparatives d'une mesure de température entachée de la mesure de déformation réalisée par le B-OTDR standard, d'une mesure uniquement de température réalisée par le Raman OTDR et des mesures indépendantes de température et de déformation réalisées par le B-OTDR DSTS.

La Figure IV.32 représente les quatre courbes obtenues durant cette campagne et déjà montrées précédemment en Figures IV.28 et IV.31. Ce graphique compare les mesures Raman OTDR, standard B-OTDR et DSTS. Cette courbe illustre bien le biais de mesure que représente l'interrogateur B-OTDR standard dans un cas d'application comme celui-ci et qui est lié à la déformation présente sur le câble. L'erreur sur la mesure du gradient thermique est dans notre cas de 13,8 °C/km, ce qui peut entraîner une erreur conséquente sur plusieurs kilomètres de câble. Dans certaines conditions et pour des déformations importantes apparaissant sur de longs linéaires, la configuration loose-tube des câbles pourrait donc être remise en cause à la vue de ces résultats.

IV.D Conclusion du chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre le défaut principal des appareils B-OTDRs lié à la sensibilité simultanée à la température et à la déformation. Dans beaucoup d'applications, cette double sensibilité engendre des biais de mesure pouvant parfois être critiques lorsqu'il s'agit de surveiller l'état d'une infrastructure.

Un nouvel interrogateur a donc été développé durant cette thèse, basé sur la méthode du ratio de Landau Placzek et la double mesure de fréquence et de puissance de la diffusion Brillouin. Cette méthode nécessite une mesure simultanée de la diffusion Rayleigh et de la diffusion Brillouin ; la mesure de diffusion Rayleigh permettant d'évaluer les pertes optiques présentes sur la fibre de manière à les corriger sur la mesure de puissance de diffusion Brillouin. L'interrogateur mis au point est basé sur l'architecture optique, mécanique et informatique de l'appareil FEBUS G1-R, ce qui a permis d'obtenir à l'issue de cette thèse une solution industrielle et brevetée [115]. Cet interrogateur a été caractérisé, calibré et qualifié pour répondre aux exigences de performances demandées par l'industrie. Au cours de sa caractérisation, nous avons peu à peu abandonné l'idée d'une mesure directe du ratio de Landau Placzek qui ne permettait pas d'avoir les performances voulues à cause d'un bruit de fluctuation d'amplitude bien connu sur la mesure de diffusion Rayleigh avec un laser cohérent. Nous avons donc opté pour une analyse algorithmique de la trace OTDR générée par la diffusion Rayleigh pour ensuite réaliser une correction de la mesure de diffusion Brillouin.

Cette méthode nous a permis de réaliser des mesures **indépendantes de température et de déformation**, avec une répétabilité sur la température inférieure à 1 °C et sur la déformation de 20 $\mu\text{m/m}$, pour des longueurs de fibre de 1 km et 2 m de résolution spatiale. Pour 10 km de fibre, nous avons obtenu une répétabilité de l'ordre de 3 °C et 75 $\mu\text{m/m}$, ce qui reste exploitable dans un bon nombre d'applications. Nous envisageons plusieurs améliorations possibles des performances via l'augmentation de la rapidité de calcul informatique ou encore via une optimisation de la chaîne de détection (photodiode, carte d'acquisition) pour améliorer la sensibilité du système.

Enfin, nous avons eu l'opportunité de réaliser une mesure distribuée de température et de déformation avec ce nouvel interrogateur sur un câble "wireline" placé dans un puits de plus de 2 km de profondeur. Ces mesures nous ont permis d'observer et de quantifier de la déformation présente sur le câble, ce qui a donné des informations clés à l'opérateur du puits. Ces résultats ont été communiqués durant un workshop sur la thématique de la géophysique [133].

Références

- [18] Arthur HARTOG. *An introduction to distributed optical fibre sensors*. 12 avr. 2017. ISBN : 978-1-4822-5957-5. DOI : [10.1201/9781315119014](https://doi.org/10.1201/9781315119014).
- [30] Yolande SIKALI. « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : séparation de la dépendance à température et à la déformation ». Thèse de doct. Télécom ParisTech, 9 oct. 2012.
- [31] Vincent LANTICQ. « Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ». Thèse de doct. Paris : Ecole Doctorale d'Informatique Télécommunications et Electronique de Paris, 2009.
- [42] T. R. PARKER et al. « Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Optics Letters* 22.11 (1^{er} juin 1997), p. 787. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.22.000787](https://doi.org/10.1364/OL.22.000787).
- [52] Neubrex Co., Ltd. - NEUBREScope NBX-7031 (Specs). URL : <https://www.neubrex.com/html/products/pro-nbx7031.htm> (visité le 27/03/2020).
- [70] Sally M. MAUGHAN, Huai H. KEE et Trevor P. NEWSON. « Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter ». In : *Measurement Science and Technology* 12.7 (2001), p. 834. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/12/7/315](https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/7/315).
- [102] Hiroshige OHNO et al. « Application of Brillouin Scattering-Based Distributed Optical Fiber Strain Sensor to Actual Concrete Piles ». In : *IEICE TRANSACTIONS on Electronics* E85-C.4 (1^{er} avr. 2002). Publisher : The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, p. 945-951. ISSN : , 0916-8516.
- [103] P.j BENNETT et al. « Distributed optical fibre strain sensing in piles ». In : Conference : International Conference on Re-use of Foundations for Urban Sites. Library Catalog : www.researchgate.net. Watford, UK, jan. 2006.
- [104] Hisham MOHAMAD, K. SOGA et B. AMATYA. « Thermal Strain Sensing of Concrete Piles Using Brillouin Optical Time Domain Reflectometry ». In : *Geotechnical Testing Journal* 37 (24 mar. 2014), p. 20120176. DOI : [10.1520/GTJ20120176](https://doi.org/10.1520/GTJ20120176).
- [105] M. N. ALAHBABI, Y. T. CHO et T. P. NEWSON. « Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering ». In : *Optics Letters* 30.11 (1^{er} juin 2005), p. 1276-1278. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.30.001276](https://doi.org/10.1364/OL.30.001276).
- [106] Gabriele BOLOGNINI et Marcelo SOTO. « Optical pulse coding in hybrid distributed sensing based on Raman and Brillouin scattering employing Fabry-Perot lasers ». In : *Optics express* 18 (12 avr. 2010), p. 8459-65. DOI : [10.1364/OE.18.008459](https://doi.org/10.1364/OE.18.008459).
- [107] Kinzo KISHIDA, Yoshiaki YAMAUCHI et Artur GUZIK. « Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh system ». In : *Photonic Sensors* 4.1 (mar. 2014), p. 1-11. ISSN : 1674-9251, 2190-7439. DOI : [10.1007/s13320-013-0136-1](https://doi.org/10.1007/s13320-013-0136-1).

- [108] C.C. LEE, P.W. CHIANG et S. CHI. « Utilization of a dispersion-shifted fiber for simultaneous measurement of distributed strain and temperature through Brillouin frequency shift ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 13.10 (oct. 2001). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 1094-1096. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/68.950746](https://doi.org/10.1109/68.950746).
- [109] M. ALAHBABI, Y. T. CHO et T. P. NEWSON. « Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors ». In : *Optics Letters* 29.1 (1^{er} jan. 2004). Publisher : Optical Society of America, p. 26-28. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.29.000026](https://doi.org/10.1364/OL.29.000026).
- [110] Lufan ZOU et al. « Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber ». In : *Optics Letters* 29.13 (1^{er} juil. 2004). Publisher : Optical Society of America, p. 1485-1487. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.29.001485](https://doi.org/10.1364/OL.29.001485).
- [111] Y. CHEN et al. « Demonstration of an 11km Hollow Core Photonic Band-gap Fiber for Broadband Low-latency Data Transmission ». In : *Optical Fiber Communication Conference Post Deadline Papers (2015), paper Th5A.1*. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 22 mar. 2015, Th5A.1. DOI : [10.1364/OFC.2015.Th5A.1](https://doi.org/10.1364/OFC.2015.Th5A.1).
- [112] P. C. WAIT et T. P. NEWSON. « Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing ». In : *Optics Communications* 122.4 (1^{er} jan. 1996), p. 141-146. ISSN : 0030-4018. DOI : [10.1016/0030-4018\(95\)00557-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00557-9).
- [113] Vincent LECOEUICHE. « Brillouin and Rayleigh Distributed Sensor ». Brev. US) VIAVI SOLUTIONS INC. (MILPITAS CA. 19 oct. 2017.
- [114] R. KLUTH et al. « Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by using optic fibre ». In : *Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Changwon, Korea, 2 avr. 2006.
- [115] Vincent LANTICQ, Pierre CLEMENT et Etienne ALMORIC. « Optoelectronic Device for Distributed Measurement by Means of Optical Fibre ». Brev. franç. 3066280 (A1). Febus OPTICS. Library Catalog : ESpacenet.
- [116] Muping SONG, Bin ZHAO et Xianmin ZHANG. « Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception ». In : *Chinese Optics Letters* 3.5 (10 mai 2005), p. 271-274.
- [117] *DUAL POLARIZATION HYBRIDS*. kyllia.com. Library Catalog : kyllia.com. URL : <https://kylia.com/kylia/?portfolio=90-hybrid-coh> (visité le 08/06/2020).
- [118] P. HEALEY. « Fading in heterodyne OTDR ». In : *Electronics Letters* 20.1 (jan. 1984). Conference Name : Electronics Letters, p. 30-32. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19840022](https://doi.org/10.1049/e1:19840022).
- [119] J. W. GOODMAN. « Statistical properties of laser speckle patterns ». In : John Christopher DAINTY et al. *Laser Speckle and Related Phenomena*. T. 9. Book Authors : _ :n3 Series Title : Topics in Applied Physics. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1975, p. 9-75. ISBN : 978-3-540-13169-4 978-3-540-38013-9. DOI : [10.1007/BFb0111436](https://doi.org/10.1007/BFb0111436).

- [120] H. IZUMITA et al. « Fading noise reduction in coherent OTDR ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 4.2 (fév. 1992), p. 201-203. ISSN : 1041-1135. DOI : [10.1109/68.122361](https://doi.org/10.1109/68.122361).
- [121] Hisashi IZUMITA et al. « Stochastic amplitude fluctuation in coherent optimal time domain reflectometry and its reduction technique ». In : *Electronics and Communications in Japan (Part I : Communications)* 77.8 (1^{er} août 1994), p. 34-47. ISSN : 1520-6424. DOI : [10.1002/ecja.4410770804](https://doi.org/10.1002/ecja.4410770804).
- [122] J. KING et al. « Development of a coherent OTDR instrument ». In : *Journal of Lightwave Technology* 5.4 (avr. 1987), p. 616-624. ISSN : 0733-8724. DOI : [10.1109/JLT.1987.1075523](https://doi.org/10.1109/JLT.1987.1075523).
- [123] K. SHIMIZU, T. HORIGUCHI et Y. KOYAMADA. « Characteristics and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fibers and components ». In : *Journal of Lightwave Technology* 10.7 (juil. 1992). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 982-987. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/50.144923](https://doi.org/10.1109/50.144923).
- [124] Marc D. MERMELSTEIN et al. « Rayleigh scattering optical frequency correlation in a single-mode optical fiber ». In : *Optics Letters* 26.2 (15 jan. 2001). Publisher : Optical Society of America, p. 58-60. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.26.000058](https://doi.org/10.1364/OL.26.000058).
- [125] K. De SOUZA. « Significance of coherent Rayleigh noise in fibre-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering ». In : *Measurement Science and Technology* 17.5 (2006), p. 1065. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/17/5/S21](https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/5/S21).
- [126] M.P. GOLD et A.H. HARTOG. « Measurement of backscatter factor in single-mode fibres ». In : *Electronics Letters* 17.25 (déc. 1981). Conference Name : Electronics Letters, p. 965-966. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19810674](https://doi.org/10.1049/e1:19810674).
- [127] Masataka NAKAZAWA. « Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers ». In : *JOSA* 73.9 (1^{er} sept. 1983). Publisher : Optical Society of America, p. 1175-1180. DOI : [10.1364/JOSA.73.001175](https://doi.org/10.1364/JOSA.73.001175).
- [128] A. HARTOG et M. GOLD. « On the theory of backscattering in single-mode optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 2.2 (avr. 1984). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 76-82. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.1984.1073598](https://doi.org/10.1109/JLT.1984.1073598).
- [129] Y YAMAUCHI. « A measurement method to determine strain and temperature coefficients in fiber optic sensors ». In : APWSHM Conference. Tokyo, Japan, 2010.
- [130] Peter FITZGERALD et Bengt K. PEDERSEN. « A Technique for Improving the Accuracy of Wireline Depth Measurements ». In : SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1^{er} jan. 2007. ISBN : 978-1-55563-148-2. DOI : [10.2118/110318-MS](https://doi.org/10.2118/110318-MS).
- [131] Robert DESBRANDES et Phillip A. SCHENEWERK. « Stretch Depth Correction With Logging Cables ». In : *The Log Analyst* 34.2 (1^{er} mar. 1993). Publisher : Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. ISSN : 0024-581X.
- [132] D. BURNETT et Chung-Chun ONG. « Shortening of submerged ocean cables due to hydrostatic pressure ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 12.1 (jan. 1987). Conference Name : IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 281-288. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/JOE.1987.1145239](https://doi.org/10.1109/JOE.1987.1145239).

- [133] P. CLEMENT, R. GABET et V. LANTICQ. « Distributed Temperature and Strain Sensing Using Brillouin Backscattering ». In : First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing. T. 2020. ISSN : 2214-4609 Issue : 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 9 mar. 2020, p. 1-5. DOI : [10.3997/2214-4609.202030041](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202030041).

Conclusion générale

En une dizaine d'années, l'utilisation des capteurs de mesure répartie par fibre optique a bouleversé le domaine de la surveillance d'infrastructures du génie civil et du transport de l'énergie. Cela a été possible grâce à la fiabilisation de cette technologie et aux améliorations apportées qui ont permis à ce type d'instrumentation de présenter des performances de mesure en adéquation avec les besoins industriels. Néanmoins ce type d'appareils de mesure présentent encore quelques limitations liées aux principes fondamentaux des phénomènes physiques utilisés. Ces limites ne remettent pas en cause la technologie mais ralentissent son essor dans l'industrie. Les objectifs principaux de cette thèse ont donc été basés sur l'amélioration des performances en relation avec les besoins industriels. La première amélioration étant liée à la portée de mesure jugée trop faible dans certains cas d'applications, notamment lorsque l'on souhaite surveiller des structures sur plusieurs centaines de kilomètres (canalisations ou câbles électriques). Le second sujet de ces travaux est spécifique au type d'interrogation proposé par l'entreprise FEBUS Optics et porte sur la discrimination de la mesure de température et de déformation avec des interrogateurs sensibles à la fréquence de diffusion Brillouin dans une fibre. Enfin, le dernier axe de recherche de cette thèse a porté sur les perspectives liées à la mesure répartie de la pression hydrostatique au moyen d'une fibre optique. Une possible mesure de ce paramètre physique permet d'envisager de nouveaux domaines d'applications dans lesquels la demande est forte. Pour les mesures en puits, il s'agirait d'une technologie de rupture.

Nous nous sommes principalement focalisés, dans ce travail de recherche, sur la mesure de la diffusion Brillouin dans une fibre optique. En effet, il s'agit ici du premier système de mesure qui a été mis au point et commercialisé par l'entreprise FEBUS Optics.

Nous avons, dans la première partie de cette thèse, caractérisé de manière approfondie la solution B-OTDR développée au sein de FEBUS Optics puis nous avons présenté les limites liées à la portée de mesure de ces interrogateurs. Une étude a donc été réalisée pour pallier ces limites et nous avons proposé une solution industrialisable, basée sur des modules de ré-amplification EDFA bidirectionnels, permettant d'augmenter la distance de mesure de presque trois fois sans dégrader les performances de mesures initiales. Ces modules peuvent facilement être implémentés au niveau d'une structure, qu'elle soit enfouie dans le sol ou au fond des océans, et ne nécessite pas de modifications des interrogateurs déjà commercialisés. Ces modules nous ont permis de réaliser une mesure de température distribuée le long d'une fibre optique de **150 km** avec une répétabilité de mesure à deux sigmas inférieure à **1,5 °C**. Ces résultats constituent à notre connaissance les meilleures performances obtenues avec ce type de système et sont adaptés aux besoins industriels ce qui permet d'envisager une commercialisation de la solution proposée. Des études complémentaires sur le sujet permettraient très certainement d'envisager une augmentation encore plus importante de la portée de mesure des interrogateurs B-OTDR avec ce type de solution.

La seconde partie de ce manuscrit s'est focalisée sur la discrimination des mesures de température et de déformation via la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre. Pour cela, nous avons choisi de combiner la double sensibilité en puissance et fréquence de la diffusion Brillouin à ces deux paramètres physiques. Nous avons, durant cette thèse, développé et breveté un nouveau schéma d'interrogateur commercial permettant de **discriminer la température et la déformation** en réalisant une mesure unique et simultanée des rétrodiffusions Brillouin et Rayleigh dans une fibre optique. L'analyse de la fréquence de diffusion Brillouin couplée à la mesure de puissance de diffusion Brillouin, référencée par la mesure de diffusion Rayleigh, nous permet ainsi de résoudre entièrement l'équation matricielle reliant les paramètres de diffusion Brillouin à la température et la déformation perçues par la fibre. Ce nouvel interrogateur présente des performances de mesure à l'état de l'art et en adéquation avec les besoins industriels. Une répétabilité de mesure inférieure à $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $20\text{ }\mu\text{m/m}$ pour 1 km de fibre a été obtenue, et ce nouvel instrument limite grandement les biais de mesure rencontrés par les générations précédentes des systèmes de mesure de diffusion Brillouin. Nous avons pu caractériser et valider ce nouveau système au cours de mesures réalisées sur un câble spécifique inséré dans un puits d'observation d'une profondeur de 2 km . Les résultats ont permis d'observer et de quantifier des anomalies présentes sur le câble, qui ne sont pas qualifiables avec les interrogateurs précédant.

Enfin, la dernière partie de ce manuscrit, qui est confidentielle, propose des perspectives d'innovations basées sur les technologies déjà maîtrisées par l'entreprise. Des axes de développement pour réaliser une mesure répartie par fibre optique de la pression hydrostatique y sont étudiés. Par une étude bibliographique approfondie, nous avons évalué les pistes de recherche les plus prometteuses puis il a été mis au point un nouveau prototype d'interrogateur qui a permis d'obtenir des résultats laissant envisager une sensibilité à la pression hydrostatique. Ce prototype qui permet également de réaliser une mesure simultanée de la température, de la déformation, des vibrations acoustiques et de la pression hydrostatique le long d'un câble à fibre optique.

Annexe A

Caractéristiques des fibres optiques monomodes utilisées pour l'instrumentation

Nous allons présenter plus en détail les caractéristiques des fibres optiques monomodes couramment utilisées dans l'instrumentation qui sont, pour la plupart, issues du domaine des télécommunications. Les fibres dont nous parlerons ont toutes été utilisées durant cette thèse, que ce soit comme fibres de test ou bien comme fibres de référence pour les interrogateurs développés par FEBUS Optics (Partie [II.B.1.c](#)).

La grande majorité des fibres monomodes commercialisées répondent à des standard internationaux définis par l'union internationale des télécommunications (ITU en anglais, pour "International Telecommunication Union") [14]. Cet organisme publie des recommandations "ITU-T" qui définissent les modalités d'exploitation et d'interfonctionnement des réseaux de télécommunication. Dans ce vaste domaine d'application, certaines recommandations sont focalisées sur les propriétés des fibres optiques utilisées. Ces recommandations sont dans ce cas liées à la géométrie de la fibre, aux conditions de propagation de la lumière dans celle-ci ou encore à sa résistance mécanique. Les attributs majeurs évalués dans ces recommandations sont :

- le diamètre du champ de mode qui correspond au diamètre dans lequel le mode optique se propage. Ce diamètre n'est pas forcément égal au diamètre du cœur puisque dans une fibre monomode, la puissance optique propagée dans la gaine optique, en dehors du cœur, peut être importante [134];
- la concentricité du cœur et la circularité de la gaine qui est donc liée aux paramètres géométriques de la fibre;
- les dispersions chromatique et modale de polarisation lié à la propagation d'un signal lumineux fonction de son mode optique et de sa longueur d'onde;
- l'atténuation optique qui est liée directement aux phénomènes d'absorption, de diffusion et de micro-courbures.

La grande majorité des fibres monomodes présentes sur les réseaux de télécommunication répondent au standard G.652 ou G.657 :

- G.652 [135] : Parmi tous les types de fibres monomodes, la fibre G.652 est de loin la plus installée au monde. Cette catégorie de fibre est également connue sous le nom de SMF standard. La fibre G.652 est optimisée pour avoir une dispersion très faible dans la bande 1310 nm mais propage également très bien le signal optique à 1550 nm. On compte plusieurs sous catégories qui sont des évolutions technologiques permettant notamment de diminuer les pertes par atténuation. Les fibres G.652.D, catégorie la plus récente, permettent une suppression du pic d'absorption OH^- que nous présentons dans la partie **I.B.1.b**.
- G.657 [136] : Connues pour ses différences d'indice élevées entre le cœur et la gaine, la fibre G.657 présente la particularité de limiter les pertes par macro-courbures¹, ce qui facilite l'installation de câbles compacts dans des environnements contraints, tels que les installations résidentielles. La fibre G.657 est compatible avec des fibres G.652 ce qui permet de propager un signal sans pertes d'une fibre à une autre.

Les conditions de propagation optique dans les fibres G.652 et G.657 sont globalement très proches, ce qui fait que ces deux fibres sont compatibles entre elles pour propager un signal lumineux le long d'une ligne optique. Cependant, les techniques de fabrications entre ces deux standards sont différentes ce qui entraîne des variations au niveau de leur caractéristique acoustique [30]. Dans le domaine de l'instrumentation par fibre optique, ce phénomène est à prendre en compte surtout lors de la mesure de diffusion Brillouin qui est basée sur le couplage entre les photons incidents et les phonons de la fibre. Ainsi, les fréquences de diffusion Brillouin ne sont pas les mêmes en fonction de la recommandation utilisée.

Nous présentons dans le tableau **A.1** les différentes fibres optiques utilisées au cours de cette thèse. Dans le cadre de l'instrumentation, on rencontre généralement des fibres G.652 présentes dans les câbles destinés aux télécommunications longues distances ou encore dans les câbles de puissance électrique. Les fibres G.657 sont quant à elle souvent utilisées dans des câbles dédiés spécifiquement à l'instrumentation de structure. En effet, dans ce contexte le câble est généralement soumis à de grandes courbures lors de son installation sur des structures ce qui justifie l'intérêt d'une fibre G.657.

1. les pertes par macro-courbures sont généralement définies en enroulant la fibre optique une centaine de fois sur un mandrin de diamètre 50 mm. On mesure ensuite les pertes optiques induites par l'enroulement de la fibre. C'est par cette méthode que sont déduites les valeurs du tableau **A.1**

ITU-T de la fibre	Référence de la fibre / Fabricant	Paramètres optiques de la fibre à 1550 nm	Fréquence Brillouin à 1550 nm
G652	SMF28e / Corning	<ul style="list-style-type: none"> — Diamètre de mode : $10,4 \pm 0,5 \mu m$ — Dispersion : $\leq 18 ps / (nm.km)$ — Atténuation : $0,19 - 0,20 dB/km$ — Pertes par macro-courbures : $\leq 0,05 dB$ 	10,820 GHz
	SMF28e+ / Corning	<ul style="list-style-type: none"> — Diamètre de mode : $10,4 \pm 0,5 \mu m$ — Dispersion : $\leq 18 ps / (nm.km)$ — Atténuation : $\leq 0,20 dB/km$ — Pertes par macro-courbures : $\leq 0,03 dB$ 	Pic n°1 10,800 GHz Pic n°2 10,880 GHz
	SMF28-ULL / Corning	<ul style="list-style-type: none"> — Diamètre de mode : $10,5 \pm 0,5 \mu m$ — Dispersion : $\leq 18 ps / (nm.km)$ — Atténuation : $\leq 0,17 dB/km$ — Pertes par macro-courbures : $\leq 0,05 \mu m$ 	10,975 GHz
G657	Bendbright-XS / Draka	<ul style="list-style-type: none"> — Diamètre de mode : $10,1 \pm 0,5 \mu m$ — Dispersion : $\leq 18 ps / (nm.km)$ — Atténuation : $0,19 - 0,21 dB/km$ — Pertes par macro-courbures : $\leq 0,02 \mu m$ 	10,615 GHz

TABLE A.1 – Tableau des principales fibres optiques monomodes utilisées durant la thèse.

Annexe B

Étude bibliographique sur l'augmentation de la portée de mesure des interrogateurs B-OTDR/B-OTDA

Au cours de cette thèse, une étude bibliographique approfondie a été réalisée dans le but de justifier la stratégie de FEBUS Optics liée au sujet de l'allongement de la portée de mesure des interrogateurs B-OTDR. En effet, il s'agit d'une thématique clé pour la surveillance d'infrastructures notamment des pipelines et des câbles de puissance électrique puisque ces derniers s'étendent sur des longueurs souvent supérieures à 100 km. Dans ce cas, la technologie de mesure par fibre optique est limitée en portée de mesure accessible et certains effets non-linéaires, apparaissant dans la fibre, ne permettent pas d'augmenter simplement la puissance optique en sortie des interrogateurs. C'est pourquoi de nombreux sujets de recherche ont étudié des solutions permettant l'allongement de la portée de mesure sans toutefois augmenter l'apparition d'effets non-linéaires dans la fibre. Nous décrivons ici toutes les techniques ayant été démontrées par la communauté scientifiques et qui permettent d'adresser cette problématique.

B.A Codage des impulsions optiques [137, 92, 93, 95, 138]

Cette technique a été dans un premier temps utilisée pour les systèmes Raman nécessitant un très bon rapport signal sur bruit du fait de la mesure en intensité de ce type d'interrogation. L'objectif est d'envoyer une séquence binaire connue d'impulsions optiques dans la fibre à tester. Cette séquence induit de la diffusion dans la fibre qui est ensuite analysée par l'interrogateur. Par corrélation entre le signal rétrodiffusé et la séquence d'impulsions optiques envoyée, il est possible de reconstituer le signal de rétrodiffusion équivalent à celui qui aurait été généré par une unique impulsion optique mais avec un meilleur rapport signal sur bruit. Ainsi, par cette technique, il est possible d'augmenter la portée de mesure de l'interrogateur sans avoir à augmenter la puissance optique à injecter dans la fibre qui, de toute façon, est limitée par les effets non-linéaires présentés dans le Chapitre III. Dans le cadre de l'interrogateur Raman, cette technique a permis d'augmenter la portée de mesure de près de 20 km [137], qui était initialement de l'ordre de 30 km. Par la suite l'équipe de SOTO et al. a transposé cette technique aux interrogateurs Brillouin, dans un premier temps aux B-OTDR [92] puis aux B-OTDA [93]. Pour la première étude, les résultats ont permis d'améliorer le bruit RMS des interrogateurs B-OTDR avec une estimation de l'amélioration du

rapport signal sur bruit d'environ 7 dB. La Figure B.1, montre en (a) la mesure distribuée de température sur une fibre optique avec et sans le codage d'impulsions. On observe une amélioration nette du bruit de mesure au-delà d'une distance de 15 km. Et la Figure (b), qui représente le bruit RMS des deux techniques en fonction de la longueur, confirme ce point.

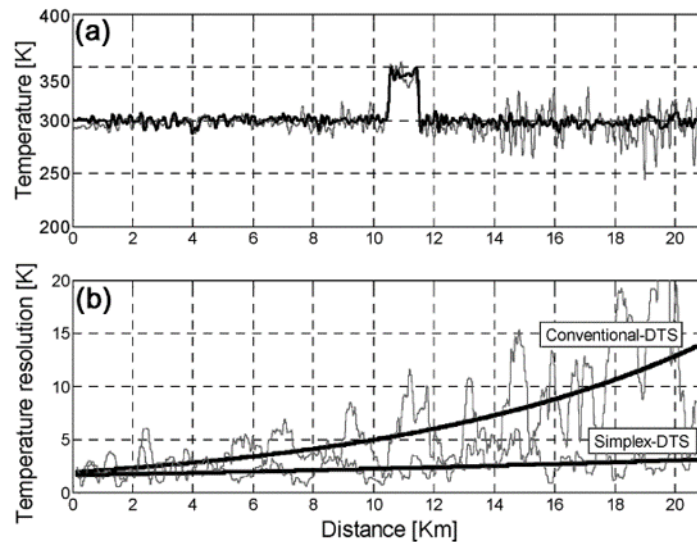


FIGURE B.1 – (a) Mesure de température distribuée avec et sans pulse coding. (b) Bruit RMS des deux techniques. [92]

Ce même principe a donc été transposé aux systèmes B-OTDA pour aboutir à des mesures distribuées de température allant jusqu'à 50 km pour une résolution spatiale de 1 m. A cette résolution spatiale, la distance initialement atteignable était aux alentours de 20 km. La Figure B.2, montre la comparaison entre une mesure distribuée de température avec et sans optimisation par codage des impulsions. Dans la configuration B-OTDA, cette technique apporte une amélioration du SNR de l'ordre de 10 dB.

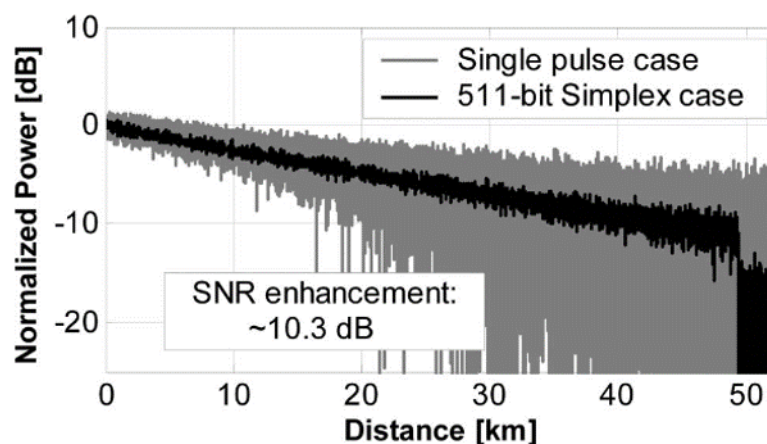


FIGURE B.2 – Comparaison de la mesure de signal sur bruit en fonction de la distance entre la technique de coding de l'impulsion et la technique d'impulsion unique. [93]

Cette technique de codage en 511 bits, combinée à une pré-amplification du signal rétrodiffusé avant détection, a permis d'atteindre en 2011 et pour un appareil B-OTDA, une portée de mesure de 120 km avec une résolution spatiale de 3 m [95]. Cette méthode présente malgré tout des inconvénients, surtout dans une configuration B-OTDR, où l'utilisation d'un codage augmente la durée totale de l'impulsion optique envoyée dans la fibre et augmente donc les risques de générer de la diffusion Brillouin stimulée. La Figure B.3, montre bien la limite en puissance d'un B-OTDR avec le codage d'impulsions en comparaison avec un B-OTDR standard. Le compromis entre puissance envoyée et gain lié au codage ne permet donc pas de supposer une réelle augmentation des performances pour un B-OTDR. Les équipements B-OTDA ne présentent pas ces limitations puisque la puissance de l'impulsion envoyée dans cette configuration est généralement plus faible que pour les B-OTDR et donc le gain par la technique de codage d'impulsion en devient meilleur. Par ailleurs, la résolution spatiale pour cette technique dépend de la durée du codage. Augmenter le nombre de bits du code permet donc d'augmenter le SNR mais en contrepartie la résolution spatiale de mesure se détériore. Cette technique nécessite donc des systèmes très rapides et performants ce qui n'est pas forcément intéressant pour nos applications visées.

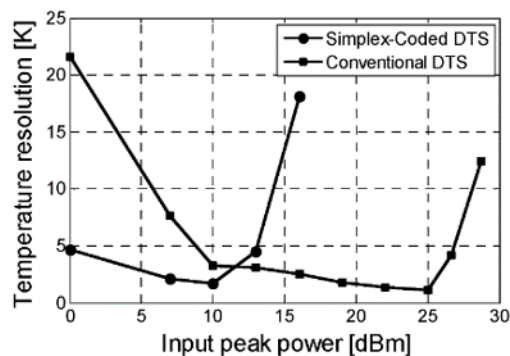


FIGURE B.3 – Evolution de la résolution de température entre les deux techniques en fonction de la puissance crête injectée. [92]

Intégration dans la stratégie de FEBUS Optics :

Cette technique de mesure propose une nette amélioration, de près de 10 dB, du SNR de la mesure de diffusion Brillouin. Ce qui permet d'atteindre des résolutions spatiales et des distances de mesure jusque-là inatteignables avec un interrogateur conventionnel. Les performances de mesure atteintes par cette technique sont en adéquation avec les besoins de l'industrie. Cependant, le codage d'impulsions nécessite la réalisation d'un tout nouvel interrogateur B-OTDR, bien plus complexe à mettre en œuvre et à industrialiser que celui commercialisé par FEBUS Optics. Celui-ci requière notamment l'utilisation d'un modulateur électro-optique pour la génération d'impulsions codées, ce qui modifie aussi de manière importante la densité spectrale de puissance en réception. Dans le soucis de proposer une solution avec le moins de modifications de l'interrogateur, nous avons donc choisi de ne pas suivre cette axe de développement.

B.B Utilisation de la technique de diversité de longueur d'onde pour améliorer les performances des interrogateurs [100]

En 2017, NG et LALAM proposent un nouveau concept de diversité de longueurs d'onde, implémenté aussi bien en BOTDR qu'en BOTDA (Figure B.4). Pour la configuration BOTDR, 3 séries d'impulsions de 3 longueurs d'onde différentes sont injectées dans la fibre capteur. Pour la configuration BOTDA, ce sont 3 paires pompe-sonde de longueurs d'onde différentes qui sont cette fois injectées dans la fibre de détection pour améliorer la portée de mesure. Le fait de générer différents canaux de longueur d'onde permet d'augmenter considérablement la puissance totale injectée dans la fibre de détection, au-delà du seuil non linéaire, sans activer de problèmes non linéaires par canaux. Ceci permet d'améliorer grandement le SNR en détection. Dans le cas de N canaux, l'amplitude de gain Brillouin est N fois plus grande, augmentant d'autant le SNR.

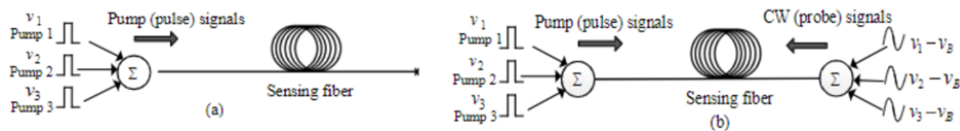


FIGURE B.4 – Technique de diversité de longueurs d'onde pour améliorer la réponse au gain Brillouin. [100]

Cependant, le nombre de paires pompe-sonde est limité par le mélange à quatre ondes (FWM), qui augmente considérablement avec le nombre de longueurs d'onde. C'est pourquoi le système proposé ne dispose que de trois longueurs d'onde de paires pompe-sonde générées à partir du même laser.

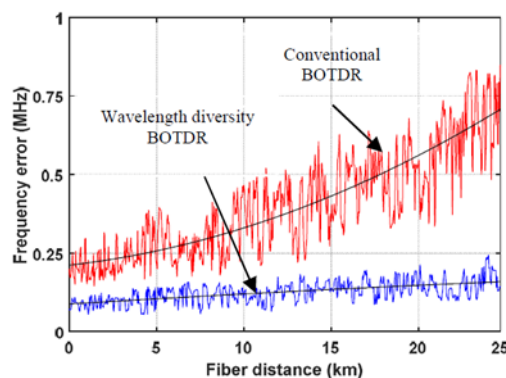


FIGURE B.5 – Erreur sur la mesure de fréquence Brillouin entre un B-OTDR conventionnel et un B-OTDR avec la technique de diversité de longueur d'onde. [100]

Sur la Figure B.5, pour une distance de 25 km, on voit une amélioration de l'erreur de mesure qui passe de 0,65 MHz pour un BOTDR conventionnel à 0,18 MHz pour un BOTDR à diversité de longueurs d'onde, équivalente à une erreur de 0,16 °C. L'espacement de fréquence des impulsions de pompe adjacentes doit être supérieur à la largeur de la raie du gain Brillouin d'environ 25 MHz afin d'éviter les interférences. Pour cette raison, l'espacement de fréquence choisie par les auteurs est de 100 MHz. Cette technique est relativement complexe à mettre

en œuvre. Par contre, le multiplexage en longueur d'onde permet de faire des mesures simultanées et donc de réduire le temps d'acquisition pour un même SNR. Il est probable que cela présente un intérêt lorsque la fibre à mesurer présente des distances importantes. En effet pour un interrogateur standard, puisqu'il faut attendre qu'une impulsion ait fait l'aller-retour dans la fibre avant d'envoyer la suivante, le temps de mesure peut devenir conséquent lorsque la fibre est très longue.

Intégration dans la stratégie de FEBUS Optics :

Cette technique de mesure, testée sur une fibre de 25 km, propose une amélioration des performances d'interroateurs B-OTDR et B-OTDA de près de 28 %. Cette amélioration peut laisser envisager une augmentation de la portée de mesure et surtout une réduction du temps de calcul de l'interroateur. Cependant, aucunes mesures à plus de 100 km n'ont encore été réalisées avec ce type de configuration ce qui ne nous permet pas de confirmer un réel potentiel pour augmenter la distance de mesure accessible. Par ailleurs, une modification de l'interroateur est nécessaire dans ce cas, ce que nous ne souhaitons pas.

B.C BOTDR et amplification Raman [101]

Les systèmes de transmission sous-marins sans répéteurs fonctionnent sans éléments actifs sur la ligne. Immergés, ils constituent une solution simple et économique pour des systèmes de plusieurs centaines de kilomètres. Comme les pompes doivent être fournies à partir des terminaux, des schémas d'amplification sophistiqués ont été élaborés dans la littérature. Ces technologies complexes reposent principalement sur l'amplification EDFA de forte puissance (généralement avec utilisation de fibres co-dopées Er-Yb à double gaine), une amplification Raman et des sections de fibre Er. L'amplification Raman distribuée est particulièrement intéressante car elle procure un gain sur la fibre et améliore le facteur de bruit de la liaison, avec une pompe située dans le terminal. L'amplification Raman peut être appliquée à partir de l'émission (co-propagation avec le signal) aussi bien qu'à partir de la réception (contre-propagation). De nos jours, la plus longue distance (4x10 Gb/s sur 574 km et 601km sur une seule voie) a été obtenue en appliquant un pompage Raman du troisième ordre pour obtenir un gain Raman co-propagé et une pré-amplification à distance [139]. Ce type d'amplification est relativement complexe à mettre en œuvre.

SONG et al. [101] ont appliqué cette technique au BOTDR en 2015. Le schéma expérimental est présenté en Figure B.6. Il s'agit quasiment du même montage que celui d'un interrogateur B-OTDR standard mais une pompe Raman additionnelle est injectée en entrée de la fibre capteur via un coupleur WDM. Un EDFA placé juste avant le circulateur permet d'ajuster la puissance des impulsions injectées dans la fibre capteur. La puissance des impulsions ne doit pas dépasser le seuil Brillouin stimulé au cours de la propagation.

Ainsi, en ajustant de manière adaptée la puissance des impulsions en sortie de l'EDFA, injectées dans la fibre capteur, et le pompage Raman, les auteurs démontrent une portée de 100 km avec une résolution de 40 m et une précision sur les mesure de ± 3 °C (Figure B.7). Sur la Figure a), on constate que la puissance au bout de 100 km est du même ordre de grandeur qu'en entrée de ligne après avoir été amplifiée tout au long de la propagation grâce à l'amplification Raman. La

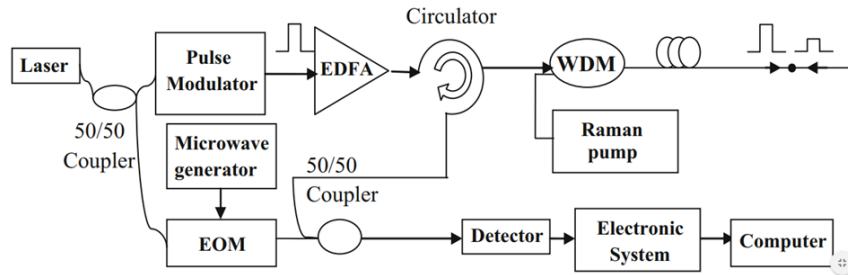


FIGURE B.6 – Schéma du montage optoélectronique de la technique d'utilisation d'un B-OTDR et de l'amplification Raman. [101]

Figure b) montre la courbe de température où l'on constate une dégradation de la précision au fur et à mesure de la propagation sans répéteur. Compte tenu de la puissance maximale limitée, cette portée semble atteindre une limite et ne pas pouvoir être améliorée significativement avec une amplification sans répéteurs additionnels.

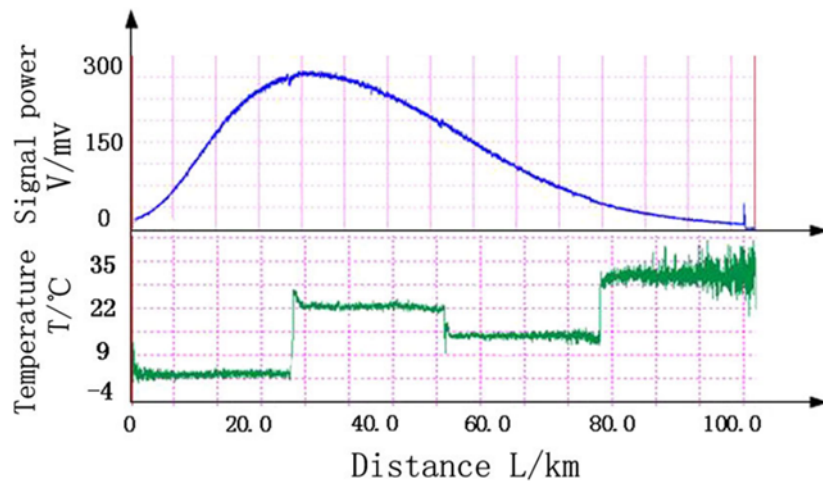


FIGURE B.7 – (a) Puissance Brillouin rétrodiffusée sur 100km avec un pompage Raman adapté. (b) Mesure de la température sur 100km. [101]

Intégration dans la stratégie de FEBUS Optics :

Cette méthode d'amplification Raman, qui a déjà fait ses preuves dans le domaine des télécommunications, peut donc être très avantageusement utilisée pour la mesure B-OTDR avec des performances de mesure relativement satisfaisantes et une modification de l'interrogateur très limitée. Cependant comme le montre l'étude, cette technique semble présenter une limite qu'il serait difficile d'améliorer du fait de l'amplification Raman dans le sens co-propagatif qui présente un pompage faible. Une amélioration possible à cette technique serait un pompage Raman contra-propagatif mais qui annulerait tout l'intérêt du système B-OTDR qui est de n'accéder qu'à une seule extrémité de la fibre.

B.D Amélioration de la portée d'un système BOTDR avec un EDFA en ligne [96]

En 2016, LALAM et al. proposent d'introduire un EDFA en ligne sur un système BOTDR. Le système expérimental est présenté Figure B.8. Le schéma est celui d'un BOTDR classique où le signal est modulé de manière impulsionnelle puis envoyé dans la fibre. Le signal rétrodiffusé est mélangé avec un signal de référence CW puis détecté et analysé. Ici, on introduit un EDFA au 25^{ème} km afin de régénérer les impulsions (carré rouge sur la Figure B.8). L'EDFA étant monodirectionnel, par un système de circulateurs, le signal rétrodiffusé le contourne et n'est donc pas amplifié. La puissance crête des impulsions est de 18 dBm et leur largeur de 50 ns, soit une résolution spatiale de 5 m.

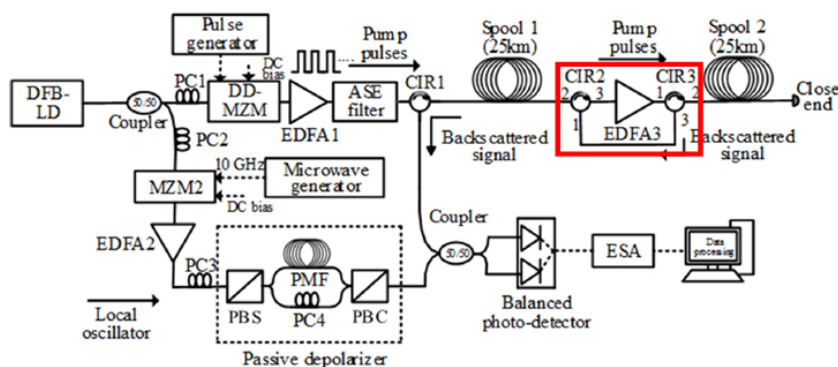


FIGURE B.8 – Schéma du montage expérimental de l'amélioration de la portée d'un système BOTDR avec un EDFA en ligne. [96]

Sur la Figure B.9, les spectres tridimensionnels (b) et leur intensité (a) sont tracés en fonction de la distance sur 50 km. On voit très clairement le signal régénéré au bout du 25^{ème} km, juste après l'EDFA.

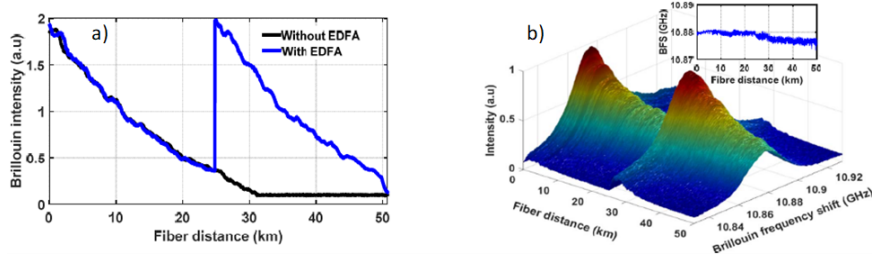


FIGURE B.9 – Spectres distribués de rétrodiffusion Brillouin avec l'utilisation d'un EDFA en ligne. [96]

Enfin, sur la Figure B.10, l'erreur de mesure en fonction de la distance est présentée pour la température et la déformation. L'erreur de température reste en dessous de 1,5 °C sur 50 km pour une résolution spatiale de 5 m.

Cet article montre la possibilité de régénérer le signal avec un EDFA sans dégrader la mesure Brillouin. Un doute subsiste sur les performances obtenues si plusieurs amplificateurs EDFA sont concaténés sur la même ligne optique. Par ailleurs, on peut craindre également l'atténuation du signal rétrodiffusé qui risque de devenir rédhibitoire si la portée s'allonge, l'amplification proposée n'étant pas bidirectionnelle.

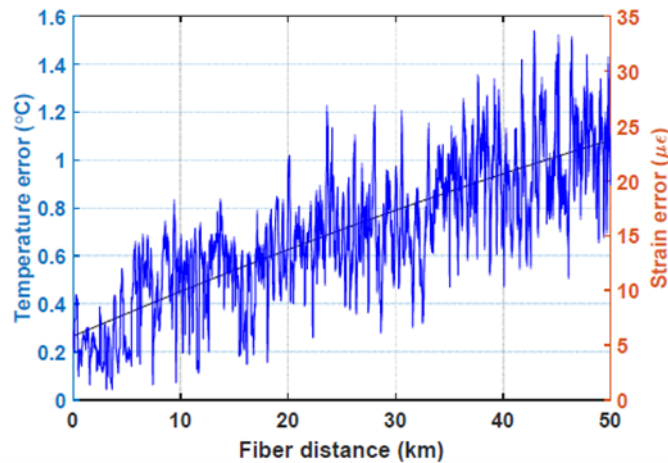


FIGURE B.10 – Erreur sur la mesure de température et déformation en fonction de la distance. [96]

Intégration dans la stratégie de FEBUS Optics :

Cet ajout d'un EDFA permet la régénération du signal optique après un tronçon de plusieurs kilomètres de fibre optique. Pour cela aucunes modifications de l'interrogateur n'ont été réalisées et les performances de mesure ne sont pas dégradées après passage de l'impulsion dans l'EDFA. Cet article est intéressant pour la stratégie de FEBUS Optics qui ne souhaiterait pas modifier l'architecture optique de ces interrogateurs. Plusieurs limites subsistent comme l'utilisation de l'EDFA uniquement dans le sens co-propagatif et également l'incertitude sur la concaténation d'amplificateurs. Néanmoins, cette étude pourra servir de base solide pour le développement de notre solution.

B.E Utilisation de plusieurs fibres avec différents décalages de fréquence Brillouin et des EDFA pour une portée de 150 km [97]

L'une des originalités de cette contribution proposée par l'équipe de DONG, CHEN et BAO, en configuration BOTDA, est l'utilisation de multiples sections de fibres dont les décalages Brillouin sont différents afin de réduire la longueur effective de l'interaction Brillouin à une section de fréquence Brillouin résonante plutôt qu'à la longueur totale de la fibre de détection, de sorte que la puissance de la sonde CW du montage BOTDA peut être augmentée pour améliorer le signal Brillouin au sein de chaque section. Ceci augmente la portée du capteur mais n'est pas transposable au mode BOTDR car en mode spontané, hormis l'atténuation, la pompe ne subit pas de déplétion. L'originalité intéressante est l'introduction d'un système d'EDFA bidirectionnel en ligne placé entre différentes sections de fibre pour compenser l'atténuation linéique et conserver un rapport signal à bruit suffisant au cours de la propagation. Cet aspect bidirectionnel peut naturellement être adapté dans une configuration BOTDR. La Figure B.11 montre la disposition des fibres de détection et des EDFA en ligne pour une plage de détection de 150 km, où les fibres de détection sont divisées en deux sections égales de 75 km, composées chacune de 3 segments de 25 km, les bobines 1 à 6 étant composées de différents type de fibre. Au milieu des 150 km de fibre, est placé un répéteur

optique constitué de deux EDFA et de deux circulateurs optiques, comme indiqué dans le cadre en pointillés de la Figure B.11. L'avantage de ce système est d'être bidirectionnel. Les ondes de pompe et de sonde peuvent être amplifiées séparément lorsqu'elles passent à travers leur propre branche du répéteur optique. Dans ce schéma, puisque seules deux sections de fibre et un répéteur optique sont inclus, le bruit ASE des EDFAs en ligne n'a pas d'impact considérable sur les performances. L'impact de ce bruit risque de devenir problématique si on allonge la portée en concaténant plusieurs répéteurs, il sera à étudier.

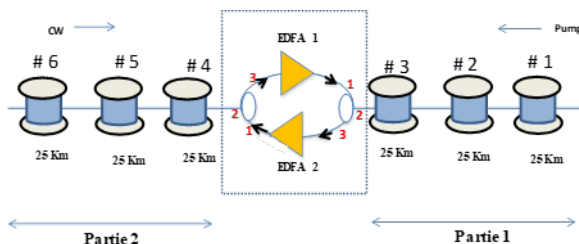


FIGURE B.11 – Schéma du montage expérimental pour une mesure B-OTDA de 150 km avec des EDFA et plusieurs fibres optiques de fréquence Brillouin différentes. [97]

Les gains de EDFA1 et EDFA2 sont fixés à 16 dB afin de compenser la perte totale mesurée sur chaque tronçon entre répéteurs. Les puissances des ondes sonde et pompe utilisées dans l'expérience sont réglées à 0,2 et 400 mW, respectivement, et leur décalage de fréquence est balayé de 10 460 à 10 700 MHz, soit une plage fréquentielle de 240 MHz, avec un pas de 5 MHz. Avec une impulsion de pompe de 80 ns, les spectres Brillouin tridimensionnels mesurés sur l'ensemble des fibres de détection de 150 km sont représentés à la Figure B.12. On voit clairement qu'après 75 km, le signal est régénéré, on y observe des gains Brillouin similaires au tronçon précédent.

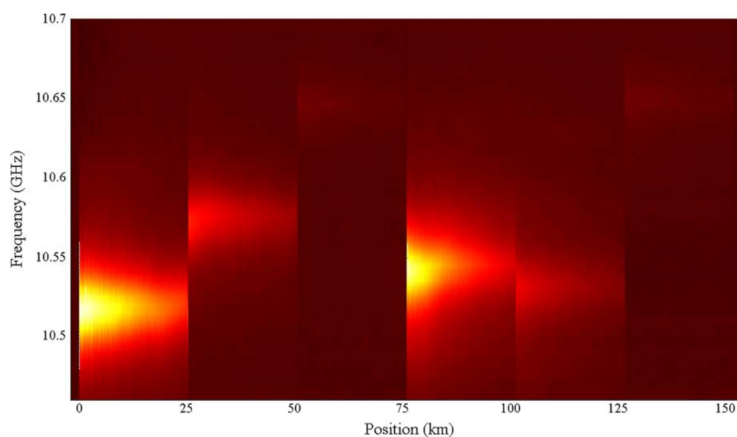


FIGURE B.12 – Spectre de rétrodiffusion du montage utilisant des fibres avec différents décalages Brillouin. [97]

Bien que la technique complète ne soit pas transposable aux systèmes B-OTDR, l'utilisation d'amplificateurs bidirectionnels est une technique intéressante dans le cadre de l'allongement de la portée de mesure des B-OTDR. Ces travaux ont

bien montré la capacité de régénération du signal optique des systèmes EDFA bidirectionnels.

Intégration dans la stratégie de FEBUS Optics :

L'intérêt de cet axe de recherche pour notre étude est l'utilisation d'amplificateurs bidirectionnels. En effet, l'étude de LALAM et al. [96] présentée précédemment nous a montré les bénéfices de l'utilisation d'amplificateurs EDFA le long de la ligne optique. Une limite de cette technique était liée à l'absence de ré-amplification du signal rétrodiffusé. Un module d'amplification bidirectionnel permet d'amplifier à la fois le signal co-propagatif (signal sonde), et le signal contra-propagatif (signal de diffusion) que l'on souhaite mesurer. Tout cela sans modifier l'architecture optique de l'interrogateur B-OTDR déjà existante.

Annexe C

Étude bibliographique des solutions de séparation de la température et de la déformation sur la mesure de diffusion Brillouin

C.A Mesures comparatives sur des câbles différents [104]

Nous avons déjà évoqué dans la partie II.C.2 le fait que les différents types de câbles à fibre optique commercialisés présentent des sensibilités à la température et à la déformation bien différentes. En effet, les câbles dits à structure libre ont la particularité de proposer une configuration où la fibre à l'intérieur se retrouve isolée des contraintes imposées à la gaine du câble comme cela a déjà été présenté dans le tableau II.2 du second chapitre.

En pratique, un moyen de séparer la température de la composante de déformation réside donc dans l'utilisation simultanée de deux câbles à fibre optique : un à structure libre et l'autre dont la gaine est serrée à la fibre, et donc sensible aux deux paramètres.

- **Câble à structure libre** : ce câble permet d'obtenir une mesure de diffusion Brillouin uniquement dépendante de la température.

$$\Delta\nu_{B_1} = C_{\nu_B T} \Delta T + C_{\nu_B \varepsilon} \Delta\alpha_{\varepsilon_1}(T) \quad (\text{C.1})$$

où $\Delta\nu_B$ est la variation de fréquence Brillouin, ΔT est la variation de température de la fibre, $\Delta\alpha_{\varepsilon_1}(T)$ la déformation liée à l'expansion thermique de ce câble et $C_{\nu_B T}$, $C_{\nu_B \varepsilon}$ les coefficients de sensibilité de la diffusion Brillouin en température et en déformation.

- **Câble à gaine serrée** : ce câble permet d'obtenir une mesure de diffusion Brillouin dépendante à la fois de la température et de la déformation.

$$\Delta\nu_{B_2} = C_{\nu_B T} \Delta T + (\Delta\varepsilon + \Delta\alpha_{\varepsilon_2}(T)) C_{\nu_B \varepsilon} \quad (\text{C.2})$$

où $\Delta\varepsilon$ est la variation de déformation de la fibre liée aux sollicitations mécaniques du câble.

La différence entre les mesures de ces deux câbles nous permet donc d'obtenir uniquement une mesure de déformation :

$$\Delta v_{B_1} - \Delta v_{B_2} = (\Delta \varepsilon + ((\Delta \alpha_{\varepsilon_1}(T) - (\Delta \alpha_{\varepsilon_2}(T))C_{VB\varepsilon} \quad (C.3)$$

Reste les paramètres d'expansion thermique des câbles $\Delta \alpha_{\varepsilon_1}(T)$ et $\Delta \alpha_{\varepsilon_2}(T)$ qui nécessitent la réalisation d'une calibration préalable de manière à s'en affranchir. Nous obtenons donc finalement une mesure de la vraie déformation longitudinale effective de la structure instrumentée, complètement décorrélée de la température et de ses effets sur l'expansion thermique du matériau du câble.

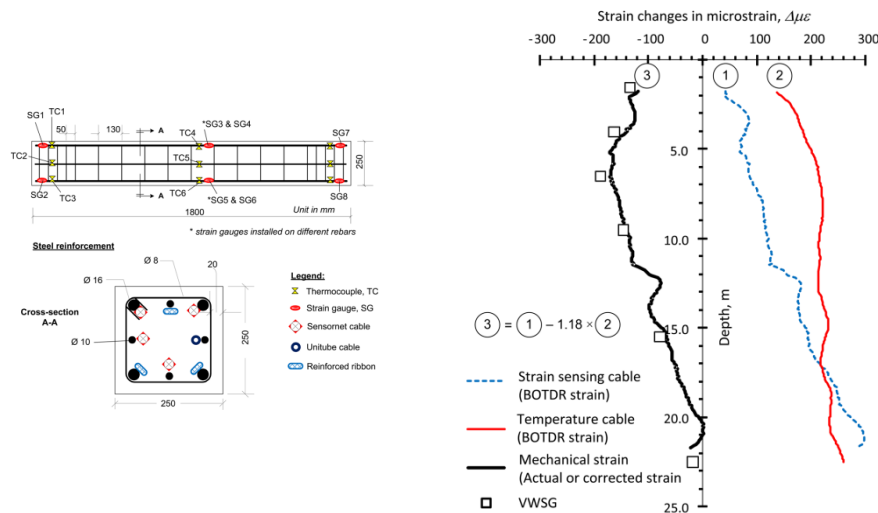


FIGURE C.1 – Plan d'instrumentation et résultats obtenus par MOHAMAD, SOGA et AMATYA [104]

La figure suivante présente une mesure réalisée sur un pieu en béton par l'équipe de MOHAMAD, SOGA et AMATYA [104]. La partie de gauche représente le schéma d'instrumentation du pieu où l'on observe que plusieurs types d'instrumentations ont été utilisées pour ces mesures : des thermocouples et des extensomètres ont été placés de manière à pouvoir comparer l'instrumentation par fibre optique avec l'instrumentation dite traditionnelle. Deux types de câbles à fibre optique ont été utilisés durant cette instrumentation : un câble à gaine serrée (Reinforced ribbon) et un câble à gaine libre (Unitube). Ces câbles sont directement coulés dans la structure du pieu en béton comme on peut le voir sur le schéma. La partie de droite de la Figure C.1, représente la déformation mesurée par l'instrumentation au niveau du pieu soumis à une charge de 1200 kN juste après la phase de prise du béton. On observe sur ce graphe, en pointillés bleu et en trait plein rouge, les mesures issues du B-OTDR et réalisées sur les deux types de câbles à fibre optique. La mesure simultanée sur ces câbles permet d'en déduire la vraie déformation du pieu, totalement indépendante de la température et représentée par un trait plein noir. L'instrumentation électrique (thermocouples et extensomètres), également affichée sur ce graphique, se superpose bien avec la mesure de déformation corrigée. Cette correction est primordiale dans ce contexte puisque, lors de sa prise, la température du béton s'élève, ce qui perturbe la mesure B-OTDR qui est réalisée peu de temps après.

Grâce à la correction réalisée sur la mesure, il est ensuite possible d'évaluer la déformation vraie liée uniquement à la charge de 1200 kN posée sur le pieu. La

déformation du pieu est finalement déterminée par le calcul suivant :

$$\Delta\varepsilon_{M\acute{e}canique} = \Delta\varepsilon_{B-OTDR} - \Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffementB\acute{e}ton} \quad (C.4)$$

où $\Delta\varepsilon_{M\acute{e}canique}$ est la déformation mécanique liée à la charge de 1200 kN, $\Delta\varepsilon_{B-OTDR}$ est la déformation mécanique mesurée sur le câble à gaine serrée via l'instrument B-OTDR et $\Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffementB\acute{e}ton}$ est la déformation du béton liée à son échauffement lors de sa prise :

$$\Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffementB\acute{e}ton} = (\alpha_{B\acute{e}ton}) \times dT = (\alpha_{B\acute{e}ton}) \times \frac{\Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffementB\acute{e}ton}}{(\alpha_{Cable})} \quad (C.5)$$

$$\Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffementB\acute{e}ton} = 1,18 \times \Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffement} \quad (C.6)$$

où $\alpha_{B\acute{e}ton}$ est le coefficient d'expansion thermique du béton et α_{Cable} le coefficient d'expansion thermique du câble à gaine serrée (le ratio des deux valant 1,18), dT la variation thermique qu'il est possible de mesurer à l'aide du câble à structure libre et dépendant de son coefficient de dilatation thermique α_{Cable} et de la déformation thermique $\Delta\varepsilon_{\acute{e}chauffement}$ mesurée par le B-OTDR sur le câble à structure libre.

Ainsi l'équation C.5 devient :

$$\Delta\varepsilon_{M\acute{e}canique} = \Delta\varepsilon_{Cable \text{ à structure serrée}} - 1,18 \times \Delta\varepsilon_{Cable \text{ à structure libre}} \quad (C.7)$$

La mesure de déformation absolue compensée de la température correspond bien, comme indiqué sur le graphique de la Figure C.1, à la mesure B-OTDR réalisée sur le câble à structure serrée à laquelle on retranche 1,18 fois la mesure B-OTDR réalisée sur le câble à gaine libre.

Avantages/inconvénients de la méthode :

Ces méthodes de mesure sont aujourd'hui majoritairement utilisées car relativement fiables mais requièrent une instrumentation complexe de la structure. De plus, il y subsiste certains points de vigilance notamment sur le câble à structure libre utilisé. En effet, nous avons démontré dans la partie II.C.3 que certains câbles, prétendument à structure libre, présentent malgré tout une déformation résiduelle sur la fibre optique, de l'ordre de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, lorsque le câble est soumis à des déformations très importantes (> 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$). Ceci engendre donc une incertitude sur la mesure d'environ 10% par rapport à la déformation du câble. Par ailleurs, il est primordial que, lors de la mise en œuvre, les deux types de câbles soient positionnés au même endroit de la structure de manière à percevoir les mêmes événements. Cela peut poser des soucis d'implémentation, notamment lors de mesures sur de très grands ouvrages où il n'est pas forcément aisé d'installer les deux câbles au même endroit. Par ailleurs, certaines installations sont déjà équipées de câbles à fibre optique et il n'est donc pas toujours possible d'implémenter par la suite un nouveau câble pour la séparation des deux paramètres.

Cette technique ne correspond pas à la stratégie de FEBUS Optics qui souhaite pouvoir réaliser une mesure à la fois de température et de déformation sur une seule et même fibre optique, déjà implémentée sur la structure, sans avoir besoin de compléter l'instrumentation à posteriori avec un second câble.

C.B Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Raman [105, 106]

Dans l'industrie, certaines méthodes proposent d'utiliser conjointement deux appareils commerciaux, l'un pour la mesure Brillouin et l'autre pour la mesure Raman uniquement sensible à la température. Cette méthode relativement facile à mettre en œuvre nécessite malgré tout de procéder à un raccordement métrologique spatial précis des mesures fournies par les deux interrogateurs distincts et également de procéder à l'implémentation de deux fibres optiques spécifiques sur la structure à instrumenter. En effet, les équipements de mesure de rétrodiffusion Brillouin fonctionnent sur des fibres optiques monomodes tandis que la mesure de diffusion Raman est préférablement réalisée sur des fibres multimodes [140]. Par ailleurs, la mesure Raman présente une portée relativement faible par rapport à la mesure Brillouin du fait de l'utilisation de fibres multimodes et de la longueur d'onde utilisée par l'interrogateur généralement à 1310 nm (de l'ordre de 30 km pour la mesure Raman et jusqu'à plus de 100 km pour la mesure Brillouin, comme nous avons pu le voir dans la partie III.B).

Pour pallier ces deux principales limites métrologiques, ALAHBABI, CHO et NEWSON [105] ont mis au point un système opto-électronique permettant une mesure simultanée des diffusions Brillouin et Raman sur une fibre optique monomode. Cependant cette technique a montré des incertitudes de mesure limitées de l'ordre de 6 °C et 150 $\mu\epsilon$ contre des valeurs de l'ordre de 1 °C et 30 $\mu\epsilon$ pour les interrogateurs industriels distincts. Par ailleurs, d'autres études ont été menées plus tard par BOLOGNINI et SOTO [106] pour améliorer les performances de mesure d'un système combiné Raman/Brillouin en utilisant la technique de codage d'impulsions, là encore sur une fibre optique monomode. Cette technique a permis d'atteindre une résolution en température de 0,27 °C et en déformation de l'ordre de 30 $\mu\epsilon$ mais sur une distance relativement faible de 30 km.

Avantages/inconvénients de la méthode :

Réaliser une mesure simultanée des diffusions Brillouin et Raman permet bien de décorrélérer les mesures distribuées de température et déformation. Mais cette méthode nécessite l'utilisation conjointe de deux interrogateurs et généralement deux fibres distinctes, une multimode et une monomode. Les incertitudes sur la mesure de température et de déformation sont donc la combinaison des incertitudes des deux interrogateurs utilisés. Cette technique présente cependant certains inconvénients comme le fait de procéder de manière précise au raccordement métrologique des mesures ou encore dans certains cas de déployer une seconde fibre optique à posteriori. De plus, la portée de mesure est limitée par les spécifications de l'interrogateur Raman qui ne dépasse généralement pas les 30 km pour un système standard. Les deux études présentées ont été réalisées pour limiter ces principaux inconvénients en utilisant un unique interrogateur sur une même fibre optique monomode. Cependant, les résultats obtenus ne permettent pas d'envisager une mesure précise sur des distances supérieures à la trentaine de kilomètres.

L'utilisation conjointe des mesures de diffusion Brillouin et Raman présente donc certains inconvénients limitant la fiabilité de l'instrumentation d'une structure. Les solutions proposées dans les études présentées [105, 106] restent complexes à mettre en œuvre avec des interrogateurs très spécifiques difficilement industrialisables. Il ne s'agit donc pas d'une piste envisagée pour la suite de nos travaux.

C.C Utilisation simultanée des technologies Brillouin et Rayleigh résolues en fréquence [107, 52]

Certains systèmes opto-électroniques utilisent la mesure de rétrodiffusion Rayleigh pour réaliser une mesure distribuée de déformation d'une fibre optique. Ces interrogateurs, appelés OFDR, utilisent un procédé d'interférométrie entre les différents points diffusant du milieu de manière à reconstituer la courbe de déformation de la fibre optique. Nous invitons le lecteur à se référer à plusieurs documents pour la compréhension du fonctionnement des interrogateurs OFDR [27, 18]. Les systèmes OFDR ont été les premiers systèmes permettant une mesure de déformation via la rétrodiffusion Rayleigh. Par ailleurs, une seconde technique appelée TW-COTDR ("Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry") permet une mesure distribuée de déformation ou de température. Cette méthode repose sur la mesure du spectre de puissance optique de la rétrodiffusion Rayleigh au moyen d'un laser accordable à rétroaction (Distributed FeedBack Laser) dont la fréquence est scannée durant la mesure. Une mesure TW-COTDR permet donc d'obtenir un spectre de puissance optique, comme présenté en Figure C.2, qui est fonction de la fréquence du laser et du temps lié à la propagation de la lumière dans la fibre et donc de la distance dans cette dernière.

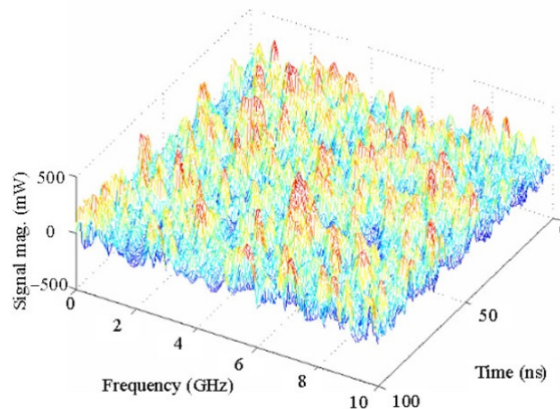


FIGURE C.2 – Spectre de diffusion Rayleigh mesuré par un TW-COTDR [107].

Ensuite par corrélation croisée avec une mesure réalisée dans un état de référence, il est possible d'estimer le décalage fréquentiel causé par un événement qui est dépendant à la fois des variations de température et de déformation comme présenté dans l'équation suivante :

$$\Delta\nu_R = C_{21}\Delta\varepsilon + C_{22}\Delta T \quad (C.8)$$

où $\Delta\nu_R$ est le décalage fréquentiel lié à l'événement, C_{21} et C_{22} sont respectivement les coefficients de sensibilité en température et en déformation avec $C_{21} = -0,15 \text{ GHz}/\mu\varepsilon$ et $C_{22} = -1,38 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ pour une fibre standard monomode [107].

Certains interrogateurs commerciaux, réalisent une mesure de déformation ou de température via cette technique qui leur permet d'atteindre une répétabilité de mesure de 10 nε et 0,0005 °C à une fois l'écart-type sur 5 mesures consécutives [52]. Ce type d'interrogateurs, ayant des performances de mesures bien

meilleures que les interrogateurs Brillouin, semble présenter des limites en distance puisqu'à ce jour il a seulement été démontré une portée de mesure maximale de 25 km [141, 52]. Par ailleurs, lorsque les variations de température ou de déformation sont trop importantes, la corrélation croisée présente des limites et certains biais de mesure peuvent apparaître [107].

KISHIDA, YAMAUCHI et GUZIK [107], ont pu combiner la technologie TW-COTDR et la technologie PPP-BOTDA, présentée dans le chapitre II.A.5.a de ce manuscrit, pour proposer une mesure indépendante de température et de déformation. Ceci a débouché sur la commercialisation de l'interrogateur NBX-7020 dont un mode de fonctionnement permet la mesure hybride Rayleigh/Brillouin. Cependant, l'utilisation de ce mode réduit fortement la précision de mesure en température et en déformation d'un facteur 1000 par rapport à la mesure TW-COTDR unique.

Avantages/inconvénients de la méthode :

Il s'agit ici d'une technique de mesure permettant la différenciation des paramètres de température et de déformation sur une unique fibre optique. Ce point rejoint notre stratégie et les performances obtenues avec l'interrogateur en mesure hybride Rayleigh/Brillouin sont acceptables pour l'industrie (répétabilité à 2σ de $10 \mu\epsilon / 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Cependant les distances de mesure accessibles par l'interrogateur dans ce mode hybride de mesure, de l'ordre de 10 km, sont jugées relativement faibles pour de nombreuses applications.

De plus, l'intégration de ce type de technologie dans l'interrogateur de FEBUS Optics serait difficile à mettre en œuvre et demanderait un effort de développement important à l'entreprise (i.e. mise en œuvre d'un système de référencement du balayage du laser réalisé).

C.D Utilisation de fibres optiques spécifiques [108, 109, 31, 30, 110, 111]

Dans une fibre optique, le spectre Brillouin ainsi que sa sensibilité sont définis par les propriétés intrinsèques au matériau et à la géométrie de la fibre qui constitue le guide d'onde du signal optique. Ainsi certaines fibres optiques, de par leur géométrie et composition, présentent des réponses Brillouin bien spécifiques dont certaines peuvent adresser la problématique de la séparation de la température et de la déformation. C'est le cas de la fibre Corning LEAF[®] étudiée par LEE, CHIANG et CHI [108] qui ont montré l'existence de plusieurs pics Brillouin présentant chacun des sensibilités fréquentielles différentes d'environ 9% et uniquement pour le paramètre de température. Ainsi, en utilisant ce type de fibre, une mesure de plusieurs pics Brillouin permet la discrimination de la déformation et de la température. C'est ainsi que plusieurs études et thèses [109, 31] ont évalué la possibilité de discriminer ces deux paramètres grâce à l'utilisation de ce type de fibre et notamment la thèse de SIKALI [30] au laboratoire de Télécom ParisTech. Cependant les différences de sensibilité entre les pics sont trop faibles et toutes les conclusions indiquent donc une forte dégradation de l'incertitude sur la mesure (dégradation d'un facteur 7 pour la température et d'un facteur 4 pour la déformation).

La Figure C.3a, issue des travaux de LANTICQ [31], représente la mesure spectrale de la diffusion Brillouin d'une fibre LEAF[®] à deux températures différentes. Cette mesure permet d'évaluer les coefficients de sensibilité en température de

chaque pic de diffusion, excepté le pic n°2 qui n'a pu être mesuré pour des raisons expérimentales. Le même travail a été réalisé pour déterminer la sensibilité en déformation de ces pics comme illustré en Figure C.3b. Ces résultats suggèrent bien la faible différence de sensibilité entre chaque pic de diffusion qui ne permet pas d'envisager la séparation des mesures de température et de déformation.

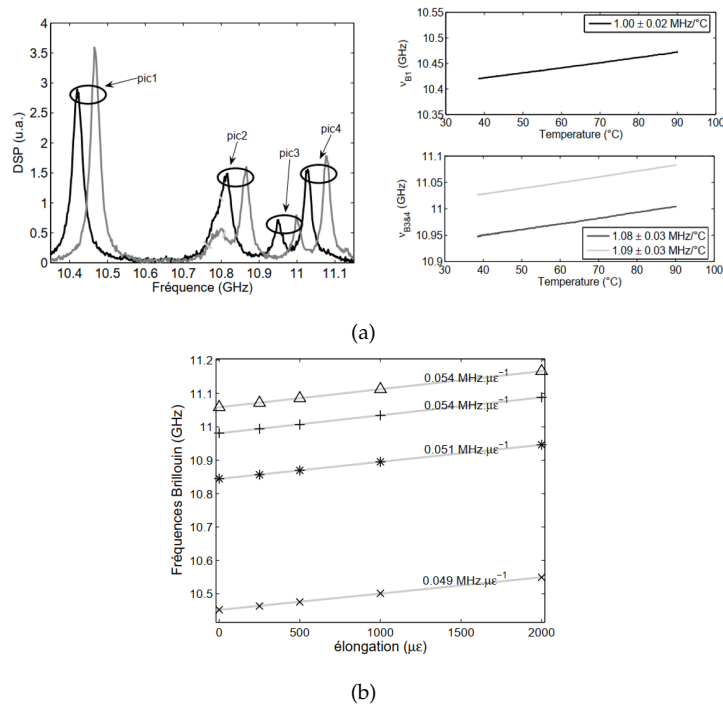


FIGURE C.3 – (a) Spectre Brillouin d'une fibre LEAF© mesuré à deux températures différentes (40 °C et 85 °C) ainsi que les coefficients de sensibilité à la température des pics de diffusion Brillouin 1, 3 et 4. (b) Courbes de sensibilité en élévation d'une fibre LEAF©, pour ses 4 pics. [31]

Certaines études ont également évalué la possibilité d'utiliser des fibres à cristal photonique présentant elles aussi plusieurs pics Brillouin [110, 111] qui, malgré des résultats intéressants, ont montré les limites actuelles de ce type de fibre notamment en terme de portée de mesure avec des essais réalisés sur seulement 2 m de longueur. Les fibres multimodes ont également montré un intérêt pour le sujet en interrogeant les différents modes de propagation dans la fibre [142, 143]. Là encore, les différences de sensibilité entre les modes sont très faibles (quelques centièmes de MHz) et entraînent donc de fortes incertitudes.

Avantages/inconvénients de la méthode :

L'utilisation de fibres optiques spécifiques présente donc beaucoup de limitations pour être une piste suivie pour nos travaux. Bien que ces méthodes présenteraient l'avantage de n'utiliser qu'une seule fibre pour discriminer les deux paramètres, il y a malgré tout de nombreux inconvénients comme la forte incertitude de mesure ou encore la nécessité d'utiliser des fibres peu répandues, coûteuses et avec de faibles performances en termes de distance de propagation et enfin l'impossibilité d'utiliser les fibres déjà installées quand c'est le cas.

C.E Double sensibilité en fréquence et intensité de la diffusion Brillouin [42, 112, 70, 114, 113]

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre II.A, la rétrodiffusion Brillouin présente une sensibilité à la température et à la déformation traduite par un changement de sa fréquence mais également de son intensité suivant l'équation que l'on rappelle :

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\nu_B \varepsilon} & C_{\nu_B T} \\ C_{I_B \varepsilon} & C_{I_B T} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (\text{C.9})$$

PARKER et al. [42] ont démontré expérimentalement cette double sensibilité et en ont déduit les coefficients suivants :

$$\begin{bmatrix} C_{\nu_B \varepsilon} & C_{\nu_B T} \\ C_{I_B \varepsilon} & C_{I_B T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.046 \text{ MHz}/\mu\varepsilon & 1.07 \text{ MHz}/\text{K} \\ -8.10^{-4}\%/\varepsilon & 0.36\%/\text{K} \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

Il devient donc évident qu'une mesure simultanée de la fréquence et de l'intensité de rétrodiffusion Brillouin permet de résoudre l'équation C.9 et donc d'obtenir des mesures indépendantes de température et de déformation.

On peut également faire l'approximation, à la vue de ces coefficients, que l'intensité de diffusion Brillouin présente une sensibilité quasi majoritaire à la température. Avec les composants d'acquisition du signal à disposition de nos jours, seules des déformations de plus de la centaine de $\mu\text{m}/\text{m}$ peuvent être mesurées via l'intensité de diffusion Brillouin.

Mesure du ratio de Landau Placzek :

La mesure de l'intensité Brillouin nécessite de prendre quelques précautions car celle-ci peut être biaisée par les pertes optiques présentes dans la fibre. Celles-ci entraînent une perte d'intensité Brillouin qui pourra être traduite, à tort, comme une variation de température ou de déformation. Il est donc nécessaire d'avoir une référence des pertes optiques dans la fibre installée de manière à compenser les variations d'intensité Brillouin et limiter les erreurs de mesure. C'est ce qu'a proposé l'équipe de WAIT et NEWSON [112] qui a étudié la mesure du ratio de Landau Placzek dans une fibre optique¹ qui est défini par l'équation C.11.

$$R_{Lp} = \frac{I_R}{I_B} = \frac{T_f}{T} (\rho_0 v^2 \beta_T - 1) \quad (\text{C.11})$$

où I_R et I_B sont les intensités de diffusion Rayleigh et Brillouin, ρ_0 la densité du matériau de la fibre, v la vitesse des ondes acoustiques, β_T la compressibilité isotherme à la température fictive T_f et T la température de la fibre.

Ce ratio correspond donc à la mesure de l'intensité de rétrodiffusion Rayleigh divisée par la mesure de l'intensité Brillouin et permet ainsi de s'affranchir de toutes pertes optiques dans la fibre. En effet, la mesure de l'intensité de rétrodiffusion Rayleigh correspond à une mesure OTDR que nous avons déjà décrite

1. La mesure du ratio de Landau Placzek dans une fibre est basée sur les travaux de SCHROEDER et al. [40]. Ce ratio correspond à la mesure de l'intensité de rétrodiffusion Rayleigh divisée par la mesure de l'intensité Brillouin et il est dépendant de la température de la fibre mais également de différentes propriétés physiques comme la densité du matériau, la vitesse des ondes acoustiques dans celui-ci, ou encore la compressibilité isotherme du matériau à la température fictive T_f . Sa sensibilité à la température a été pour la première fois démontrée dans un milieu liquide [144] puis l'analogie a été faite avec un milieu solide comme la silice [40]. C'est à partir de cette étude que WAIT et NEWSON [112] ont décidé d'utiliser ce ratio pour la mesure par fibre optique.

dans le chapitre I.B.3.a. Ce type de mesure permet d'obtenir le profil distribué des pertes optiques dans la fibre. Et comme les rétrodiffusions Brillouin et Rayleigh sont très proches en longueur d'onde ($\approx 0,08$ nm d'écart), les pertes optiques mesurées sur ces deux rétrodiffusions sont similaires.

Plusieurs études ont évalué les performances d'une mesure simultanée de fréquence de rétrodiffusion Brillouin et du ratio de Landau Placzek pour une mesure indépendante de température et de déformation. Les résultats de ces études montrent des performances de mesure intéressantes (environ 4 °C RMS et 100 $\mu\epsilon$ RMS pour 57 km de fibre optique [70]). Les Figures C.4a et C.4b sont issues des travaux de MAUGHAN, KEE et NEWSON [70] qui confirment l'utilisation simultanée de la fréquence et de la puissance de diffusion Brillouin, via le ratio de Landau Placzek pour permettre une mesure indépendante de température et de déformation.

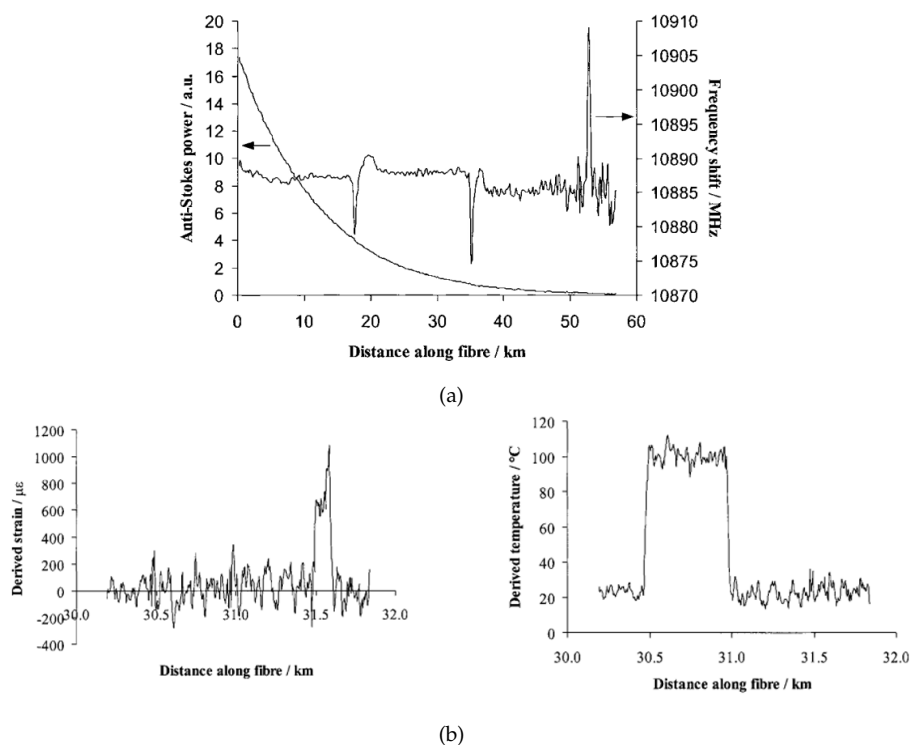


FIGURE C.4 – (a) Mesure de la fréquence ainsi que de la puissance de diffusion Brillouin sur une fibre optique soumise à la fois à de la température et à de la déformation. (b) Mesure de température et de déformation obtenue grâce à la méthode combinée de la mesure de fréquence Brillouin et du ratio de Landau Placzek. [70]

Certaines méthodes combinent l'utilisation simultanée de deux interrogateurs, un OTDR standard et un interrogateur de mesure du spectre de rétrodiffusion Brillouin. Mais il existe également des appareils industriels permettant de réaliser directement une double mesure à la fois de diffusion Rayleigh et de diffusion Brillouin [113, 114].

Avantages/inconvénients de la méthode :

Cette méthode présente de nombreux avantages qui sont tout d'abord l'utilisation d'une unique fibre optique pour la discrimination des deux paramètres physiques que sont la température et la déformation sur des distances supérieures à 50 km. Par ailleurs, bien que la mesure d'intensité Brillouin présente une incertitude plus grande que la mesure de fréquence Brillouin, du fait des faibles coefficients de sensibilité pour la puissance (ce qui dégrade l'ensemble des mesures de température et déformation), il reste toujours possible grâce à cette méthode de réaliser une mesure classique de fréquence de rétrodiffusion Brillouin pour de meilleures performances de mesure. Et finalement cette méthode nécessite l'utilisation combinée de systèmes optiques déjà connus et éprouvés, ce qui facilite sa mise en œuvre. En plus de la dégradation de l'incertitude de mesure, on peut également noter certains inconvénients dont, généralement, la nécessité d'utiliser deux lasers distincts dans le dispositif optique. En effet, la mesure de diffusion Rayleigh présente un bruit bien connu qui est le bruit lié à la cohérence du laser ou encore appelé « fading noise ». Il est donc nécessaire d'avoir un laser avec une très faible longueur de cohérence (grande largeur spectrale) pour la mesure de diffusion Rayleigh mais ce type de laser ne peut pas être utilisé pour la mesure de rétrodiffusion Brillouin qui nécessite quant à elle un laser avec une grande longueur de cohérence pour avoir une largeur spectrale au moins inférieure à celle du spectre Brillouin dans la fibre ($\approx 30\text{MHz}$). Nous détaillons ce phénomène optique dans la partie [IV.B.2.a](#) de ce manuscrit.

Bibliographie

- [1] EGIG. *Gas Pipeline Incidents : 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 - 2013)*. EGIG 14.R.0403. Fév. 2015.
- [2] GCUBE INSURANCE. *Down to the Wire : An insurance buyer's guide to subsea cabling incidents*. Juin 2016.
- [3] A. MORANA et al. « Steady-State Radiation-Induced Effects on the Performances of BOTDA and BOTDR Optical Fiber Sensors ». In : *IEEE Transactions on Nuclear Science* 65.1 (jan. 2018), p. 111-118. ISSN : 1558-1578. DOI : [10.1109/TNS.2017.2772333](https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2772333).
- [4] Joshua M. JACOBS. *The Impact of Hydrogen on Optical Fibers*. Sept. 2004.
- [5] Donald D. Davis JR, Stephen C. METTLER et David J. DIGIOVANNI. « Comparative evaluation of fiber fuse models ». In : *Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1996*. Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1996. T. 2966. International Society for Optics et Photonics, 13 mai 1997, p. 592-606. DOI : [10.1117/12.274220](https://doi.org/10.1117/12.274220).
- [6] T. HOSAKA et al. « Low-loss single polarisation fibres with asymmetrical strain birefringence ». In : *Electronics Letters* 17.15 (juil. 1981). Conference Name : Electronics Letters, p. 530-531. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19810371](https://doi.org/10.1049/e1:19810371).
- [7] Chris EMSLIE. « Chapter 8 - Polarization Maintaining Fibers ». In : *Specialty Optical Fibers Handbook*. Sous la dir. d'Alexis MÉNDEZ et T. F. MORSE. Burlington : Academic Press, 1^{er} jan. 2007, p. 243-277. ISBN : 978-0-12-369406-5. DOI : [10.1016/B978-012369406-5/50010-2](https://doi.org/10.1016/B978-012369406-5/50010-2).
- [8] Zhihong LI et al. « Complete Characterization of Polarization-Maintaining Fibers Using Distributed Polarization Analysis ». In : *Journal of Lightwave Technology* 33.2 (15 jan. 2015), p. 372-380. ISSN : 0733-8724, 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.2014.2377091](https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2377091).
- [9] Feng TANG et al. « Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers ». In : *Optics Letters* 31.23 (1^{er} déc. 2006). Publisher : Optical Society of America, p. 3411-3413. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.31.003411](https://doi.org/10.1364/OL.31.003411).
- [10] Fujikura LTD. « Introduction of PANDA fibers ». In : (), p. 44.
- [11] Kwang Yong SONG et al. « All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber ». In : *Optics Letters* 33.9 (1^{er} mai 2008), p. 926-928. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.33.000926](https://doi.org/10.1364/OL.33.000926).
- [12] Qinrong YU, Xiaoyi BAO et Liang CHEN. « Temperature dependence of Brillouin frequency, power, and bandwidth in panda, bow-tie, and tiger polarization-maintaining fibers ». In : *Optics Letters* 29.1 (1^{er} jan. 2004). Publisher : Optical Society of America, p. 17-19. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.29.000017](https://doi.org/10.1364/OL.29.000017).

- [13] M.P. VARNHAM et al. « Polarimetric strain gauges using high birefringence fibre ». In : *Electronics Letters* 19.17 (août 1983). Conference Name : Electronics Letters, p. 699-700. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19830476](https://doi.org/10.1049/e1:19830476).
- [14] *UIT : Engagée à connecter le monde*. ITU. Library Catalog : www.itu.int. URL : <https://www.itu.int:443/fr/Pages/default.aspx> (visité le 30/04/2020).
- [15] *Home*. NBG Fiber Optics. Library Catalog : www.nbg.tech. URL : <https://www.nbg.tech/> (visité le 21/03/2020).
- [16] David KALISH et B. K. TARIYAL. « Static and Dynamic Fatigue of a Polymer-Coated Fused Silica Optical Fiber ». In : *Journal of the American Ceramic Society* 61.11 (1978). _eprint : <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1151-2916.1978.tb16131.x>, p. 518-523. ISSN : 1551-2916. DOI : [10.1111/j.1151-2916.1978.tb16131.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb16131.x).
- [17] Arne SKONTORP et Julie CAMMAS. « Static fatigue life of silica optical fibers and the significance of fiber coating and handling ». In : *Smart Structures and Materials 2001 : Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*. Smart Structures and Materials 2001 : Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. T. 4328. International Society for Optics et Photonics, 6 août 2001, p. 96-105. DOI : [10.1117/12.435514](https://doi.org/10.1117/12.435514).
- [18] Arthur HARTOG. *An introduction to distributed optical fibre sensors*. 12 avr. 2017. ISBN : 978-1-4822-5957-5. DOI : [10.1201/9781315119014](https://doi.org/10.1201/9781315119014).
- [19] R. JUŠKAITIS et al. « Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber ». In : *Optics Letters* 19.3 (1^{er} fév. 1994). Publisher : Optical Society of America, p. 225-227. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.19.000225](https://doi.org/10.1364/OL.19.000225).
- [20] Yuelan LU et al. « Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR ». In : *Journal of Lightwave Technology* 28.22 (15 nov. 2010). Publisher : IEEE, p. 3243-3249.
- [21] T. HORIGUCHI, T. KURASHIMA et M. TATEDA. « Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 1.5 (mai 1989). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 107-108. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/68.34756](https://doi.org/10.1109/68.34756).
- [22] T. KURASHIMA, T. HORIGUCHI et M. TATEDA. « Thermal effects of Brillouin gain spectra in single-mode fibers ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 2.10 (oct. 1990). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 718-720. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/68.60770](https://doi.org/10.1109/68.60770).
- [23] Robert BOYD. *Nonlinear Optics*. 3rd edition. Academic Press, 28 mar. 2008. 640 p.
- [24] J. P. DAKIN et al. « Distributed Antistokes Ratio Thermometry ». In : *Optical Fiber Sensors (1985), paper PDS3*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 1^{er} jan. 1985, PDS3. DOI : [10.1364/OFS.1985.PDS3](https://doi.org/10.1364/OFS.1985.PDS3).
- [25] Govind P. AGRAWAL. *Nonlinear Fiber Optics*. 5th. Elsevier, 2013. ISBN : 978-0-12-397023-7. DOI : [10.1016/C2011-0-00045-5](https://doi.org/10.1016/C2011-0-00045-5).
- [26] M. K. BARNOSKI et S. M. JENSEN. « Fiber waveguides : a novel technique for investigating attenuation characteristics ». In : *Applied Optics* 15.9 (1^{er} sept. 1976), p. 2112-2115. ISSN : 2155-3165. DOI : [10.1364/AO.15.002112](https://doi.org/10.1364/AO.15.002112).

- [27] Damien MARAVAL. « Mesure dynamique de déformation par rétrodiffusion Brillouin spontanée B-OTDR ». Thèse de doct. Télécom ParisTech, 11 mai 2017. 180 p.
- [28] *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. JCGM 200 :2012. JCGM, 2008.
- [29] Pierre CLÉMENT, Lara LATRASSE et Vincent LANTICQ. « Cable Monitoring during Production and Deployment ». In : WindEurope. Amsterdam, 28 nov. 2017.
- [30] Yolande SIKALI. « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : séparation de la dépendance à température et à la déformation ». Thèse de doct. Télécom ParisTech, 9 oct. 2012.
- [31] Vincent LANTICQ. « Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ». Thèse de doct. Paris : Ecole Doctorale d'Informatique Télécommunications et Electronique de Paris, 2009.
- [32] Y. AOKI, K. TAJIMA et I. MITO. « Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems ». In : *Journal of Lightwave Technology* 6.5 (mai 1988), p. 710-719. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/50.4057](https://doi.org/10.1109/50.4057).
- [33] Andrey KOPYAKOV, Michael SAUER et Dipak CHOWDHURY. « Stimulated Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Advances in Optics and Photonics* 2.1 (31 mar. 2010). Publisher : Optical Society of America, p. 1-59. ISSN : 1943-8206. DOI : [10.1364/AOP.2.000001](https://doi.org/10.1364/AOP.2.000001).
- [34] M.O. van DEVENTER et A.J. BOOT. « Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 12.4 (avr. 1994). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 585-590. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/50.285349](https://doi.org/10.1109/50.285349).
- [35] Sébastien Le FLOCH. « Etude de la diffusion Brillouin stimulée dans les fibres monomodes standard. Application aux capteurs de température et de pression ». Thèse de doct. Université de Bretagne occidentale - Brest, 3 déc. 2001.
- [36] Jean-Charles BEUGNOT. « La diffusion Brillouin dans les fibres optiques microstructurées ». In : (), p. 156.
- [37] C. N. PANNELL, P. St J. RUSSELL et T. P. NEWSON. « Stimulated Brillouin scattering in optical fibers : the effects of optical amplification ». In : *JOSA B* 10.4 (1^{er} avr. 1993). Publisher : Optical Society of America, p. 684-690. ISSN : 1520-8540. DOI : [10.1364/JOSAB.10.000684](https://doi.org/10.1364/JOSAB.10.000684).
- [38] Schadrac FRESNEL. « Lasers à fibre Brillouin multi-Stokes : cohérence et caractérisation en bruit ». Thèse de doct. Université Bretagne Loire, 1^{er} sept. 2017.
- [39] MALLINDER, FP {and} PROCTOR et BA {and} OTHERS. « Elastic constants of fused silica as a function of large tensile strain ». In : *Phys. Chem. Glasses* (1964), p. 91-103.
- [40] J. SCHROEDER et al. « Rayleigh and Brillouin Scattering in K₂O–SiO₂ Glasses ». In : *Journal of the American Ceramic Society* 56.10 (1^{er} oct. 1973), p. 510-514. ISSN : 1551-2916. DOI : [10.1111/j.1151-2916.1973.tb12399.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1973.tb12399.x).

- [41] K. DE SOUZA, P.C. WAIT et T.P. NEWSON. « Characterisation of strain dependence of the Landau-Placzek ratio for distributed sensing ». In : *Electronics Letters* 33.7 (mar. 1997). Conference Name : Electronics Letters, p. 615-616. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19970432](https://doi.org/10.1049/e1:19970432).
- [42] T. R. PARKER et al. « Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Optics Letters* 22.11 (1^{er} juin 1997), p. 787. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.22.000787](https://doi.org/10.1364/OL.22.000787).
- [43] M. NIKLES, L. THEVENAZ et P.A. ROBERT. « Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 15.10 (oct. 1997), p. 1842-1851. ISSN : 07338724. DOI : [10.1109/50.633570](https://doi.org/10.1109/50.633570).
- [44] S. ADACHI. « Distributed optical fiber sensors and their applications ». In : *2008 SICE Annual Conference*. 2008 SICE Annual Conference. Août 2008, p. 329-333. DOI : [10.1109/SICE.2008.4654674](https://doi.org/10.1109/SICE.2008.4654674).
- [45] Xiaoyi BAO et Liang CHEN. « Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors ». In : *Sensors* 12.7 (26 juin 2012), p. 8601-8639. DOI : [10.3390/s120708601](https://doi.org/10.3390/s120708601).
- [46] Avi MOTIL, Arik BERGMAN et Moshe TUR. « [INVITED] State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing ». In : *Optics & Laser Technology*. The year of light : optical fiber sensors and laser material processing 78 (1^{er} avr. 2016), p. 81-103. ISSN : 0030-3992. DOI : [10.1016/j.optlastec.2015.09.013](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013).
- [47] *Fiber-optic Distributed Strain and Temperature Sensor using BOCDA Technology at High Speed and with High Spatial Resolution* | Yokogawa Electric Corporation. Library Catalog : www.yokogawa.com. URL : <https://www.yokogawa.com/library/resources/yokogawa-technical-reports/fiber-optic-distributed-strain-and-temperature-sensor-using-bocda-technology-at-high-speed-and-with-high-spatial-resolution/> (visité le 14/04/2020).
- [48] *fibrisTerre | Distributed Fiber-Optic Sensing Solutions*. URL : <https://www.fibristerre.de/> (visité le 14/04/2020).
- [49] *Omnisens*. Omnisens - Securing asset integrity - Morges. Library Catalog : www.omnisens.com. URL : <https://www.omnisens.com/> (visité le 14/04/2020).
- [50] *FEBUS OPTICS - Optical fiber based sensor system for monitoring of infrastructures*. URL : <http://www.febus-optics.com/en/> (visité le 14/04/2020).
- [51] K KISHIDA et C-H LI. « Pulse pre-pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system ». In : (), p. 7.
- [52] *Neubrex Co., Ltd. - NEUBRESCOPE NBX-7031 (Specs)*. URL : <https://www.neubrex.com/html/products/pro-nbx7031.htm> (visité le 27/03/2020).
- [53] Sanghoon CHIN. « A BRILLOUIN OPTOELECTRONIC MEASUREMENT METHOD ». Brev. amér. 2015/0308923 A1. OMNISENS SA. 29 oct. 2015.
- [54] K. SHIMIZU et al. « Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 12.5 (mai 1994), p. 730-736. ISSN : 0733-8724. DOI : [10.1109/50.293961](https://doi.org/10.1109/50.293961).

- [55] Y. KOYAMADA et al. « Novel Technique to Improve Spatial Resolution in Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 19.23 (déc. 2007). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 1910-1912. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/LPT.2007.908651](https://doi.org/10.1109/LPT.2007.908651).
- [56] Yoshiyuki SAKAIRI et al. « Prototype double-pulse BOTDR for measuring distributed strain with 20-cm spatial resolution ». In : *2008 SICE Annual Conference*. 2008 SICE Annual Conference. Août 2008, p. 1106-1109. DOI : [10.1109/SICE.2008.4654823](https://doi.org/10.1109/SICE.2008.4654823).
- [57] Edouard BUCHOUD. « Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique ». Thèse de doct. Université de Grenoble, 13 oct. 2014.
- [58] Vincent LANTICQ. « Spatial Resolution Enhancement on Brillouin Fiber-Optic Sensing for Structural Health Monitoring ». International Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering. International Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering. TINCE 2018, 30 août 2018.
- [59] Qing BAI et al. « Recent Advances in Brillouin Optical Time Domain Reflectometry ». In : *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.8 (18 avr. 2019). ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s19081862](https://doi.org/10.3390/s19081862).
- [60] Daisuke IIDA et Fumihiko ITO. « Cost-effective bandwidth-reduced Brillouin optical time domain reflectometry using a reference Brillouin scattering beam ». In : *Applied Optics* 48.22 (1^{er} août 2009), p. 4302-4309. ISSN : 2155-3165. DOI : [10.1364/AO.48.004302](https://doi.org/10.1364/AO.48.004302).
- [61] Shangran XIE et al. « Polarization dependence of Brillouin linewidth and peak frequency due to fiber inhomogeneity in single mode fiber and its impact on distributed fiber Brillouin sensing ». In : *Optics Express* 20.6 (12 mar. 2012). Publisher : Optical Society of America, p. 6385-6399. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.20.006385](https://doi.org/10.1364/OE.20.006385).
- [62] Xuping ZHANG, Rugang WANG et Yuguo YAO. « Brillouin optical time domain reflectometry using a reference Brillouin ring laser ». In : *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*. OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. T. 8421. International Society for Optics et Photonics, 7 nov. 2012, 84219G. DOI : [10.1117/12.968294](https://doi.org/10.1117/12.968294).
- [63] A. HARTOG. « A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 1.3 (sept. 1983), p. 498-509. ISSN : 0733-8724. DOI : [10.1109/JLT.1983.1072146](https://doi.org/10.1109/JLT.1983.1072146).
- [64] J. ZHANG et M.R. PHILLIPS. « Modeling intensity noise caused by stimulated Brillouin scattering in optical fibers ». In : (CLEO). *Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005*. (CLEO). Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005. T. 1. ISSN : null. Mai 2005, 140-142 Vol. 1. DOI : [10.1109/CLEO.2005.201703](https://doi.org/10.1109/CLEO.2005.201703).
- [65] Wei CHEN et Zhou MENG. « Intensity and phase noise caused by stimulated Brillouin scattering ». In : *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*. 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. T. 7753. International Society for Optics et Photonics, 17 mai 2011, 77532G. DOI : [10.1117/12.885377](https://doi.org/10.1117/12.885377).

- [66] Asaf DAVID et Moshe HOROWITZ. « Low-frequency transmitted intensity noise induced by stimulated Brillouin scattering in optical fibers ». In : *Optics Express* 19.12 (6 juin 2011), p. 11792. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.19.011792](https://doi.org/10.1364/OE.19.011792).
- [67] G. L. ABBAS, V. W. S. CHAN et T. K. YEE. « Local-oscillator excess-noise suppression for homodyne and heterodyne detection ». In : *Optics Letters* 8.8 (1^{er} août 1983), p. 419-421. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.8.000419](https://doi.org/10.1364/OL.8.000419).
- [68] Vincent LANTICQ. « DISPOSITIF OPTOELECTRONIQUE DE MESURE REPARTIE PAR DIFFUSION BRILLOUIN. » Brev. franç. 3043457. FEBUS OPTICS. 12 mai 2017.
- [69] Marcelo A. SOTO et Luc THÉVENAZ. « Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors ». In : *Optics Express* 21.25 (16 déc. 2013). Publisher : Optical Society of America, p. 31347-31366. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.21.031347](https://doi.org/10.1364/OE.21.031347).
- [70] Sally M. MAUGHAN, Huai H. KEE et Trevor P. NEWSON. « Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter ». In : *Measurement Science and Technology* 12.7 (2001), p. 834. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/12/7/315](https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/7/315).
- [71] Chuankai ZHANG, Yuanhong YANG et Anqi LI. « Application of Levenberg-Marquardt algorithm in the Brillouin spectrum fitting ». In : *Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology : Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration*. Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology : Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration. T. 7129. International Society for Optics et Photonics, 13 oct. 2008, 71291Y. DOI : [10.1117/12.807646](https://doi.org/10.1117/12.807646).
- [72] Lijuan ZHAO, Yongqian LI et Zhiniu XU. « A fast and high accurate initial values obtainment method for Brillouin scattering spectrum parameter estimation ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 210 (1^{er} avr. 2014), p. 141-146. ISSN : 0924-4247. DOI : [10.1016/j.sna.2014.02.022](https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.02.022).
- [73] Xiaobin HONG et al. « A fast method for Brillouin frequency shift estimation ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 284 (1^{er} déc. 2018), p. 6-11. ISSN : 0924-4247. DOI : [10.1016/j.sna.2018.09.020](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.020).
- [74] Simon ZASLAWSKI et al. « Impact of Fitting and Digital Filtering on Signal-to-Noise Ratio and Brillouin Frequency Shift Uncertainty of BOTDA Measurements ». In : *26th International Conference on Optical Fiber Sensors (2018), paper ThE27*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 24 sept. 2018, ThE27. DOI : [10.1364/OFS.2018.ThE27](https://doi.org/10.1364/OFS.2018.ThE27).
- [75] Simon ZASLAWSKI, Zhisheng YANG et Luc THEVENAZ. « On the 2D Post-Processing of Brillouin Optical Time-Domain Analysis ». In : *Journal of Lightwave Technology* (2020). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 1-1. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.2020.2967091](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2967091).
- [76] *Measurement Specification for Distributed Temperature Sensing*. SEAFOM-MSP-01. Jan. 2016.

- [77] BARRY N. TAYLOR AND CHRIS E. KUYATT. *NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results Cover*. Technical Note 1297. Last Modified : 2019-11-15T19 :42-05 :00 Library Catalog : www.nist.gov. NIST, 1994.
- [78] Scott W. TYLER et al. « Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods ». In : *Water Resources Research* 45.4 (2009). ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2008WR007052](https://doi.org/10.1029/2008WR007052).
- [79] Aldo MINARDO et al. « A reconstruction technique for long-range stimulated Brillouin scattering distributed fibre-optic sensors : experimental results ». In : *Measurement Science and Technology* 16.4 (fév. 2005). Publisher : IOP Publishing, p. 900-908. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/16/4/002](https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/4/002).
- [80] Marc NIKLÈS. « Fibre optic distributed scattering sensing system : perspectives and challenges for high performance applications ». In : *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors*. Third European Workshop on Optical Fibre Sensors. T. 6619. International Society for Optics et Photonics, 2 juil. 2007, p. 66190D. DOI : [10.1117/12.738349](https://doi.org/10.1117/12.738349).
- [81] Ander Zornoza INDART. « Investigation into Improving Resolution of Strain Measurements in BOTDA Sensors ». thesis. University of Illinois at Chicago, 28 oct. 2014.
- [82] Solifos - Fiber Optic Sensing Cables - BRUsens Strain Sensing Cables - BRUsens DSS 3.2mm V9 grip. URL : <http://solifos.nubosys.com/de/products/product-detail/productgroup/pug-9359/subgroup/current/showproduct/brusens-dss-32mm-v9-grip/> (visité le 19/04/2020).
- [83] Solifos - Fiber Optic Sensing Cables - BRUsens Temperature Sensing Cables - BRUsens DTS STL PA. URL : <http://solifos.nubosys.com/de/products/product-detail/productgroup/pug-9357/subgroup/current/showproduct/brusens-dts-stl-pa/> (visité le 19/04/2020).
- [84] JF (Derick) NIXON et Margo BURGESS. « Norman Wells pipeline settlement and uplift movements ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 36.1 (8 août 1999), p. 119-135. ISSN : 0008-3674. DOI : [10.1139/t98-092](https://doi.org/10.1139/t98-092).
- [85] Sylvie DELEPINE-LESOILLE et al. « B-OTDR and OFDR distributed optical fiber strain sensing for sinkhole detection ». In : *International Conference on Optical Fibre Sensors*. 2008. DOI : [10.1117/12.786125](https://doi.org/10.1117/12.786125).
- [86] Jean-Marie 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 ». These de doctorat. Paris Est, 18 nov. 2013.
- [87] Pierre CLÉMENT et al. « Fiber optic monitoring of pipelines in permafrost context ». In : *26th International Conference on Optical Fiber Sensors (2018), paper ThE94*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 24 sept. 2018, ThE94. DOI : [10.1364/OFS.2018.ThE94](https://doi.org/10.1364/OFS.2018.ThE94).
- [88] Arnaud MALVACHE. « Optique non-linéaire à haute intensité : Compression d'impulsions laser Interaction laser-plasma ». In : (), p. 214.
- [89] Stella M. FOALENG et al. « Detrimental effect of self-phase modulation on the performance of Brillouin distributed fiber sensors ». In : *Optics Letters* 36.2 (15 jan. 2011), p. 97. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.36.000097](https://doi.org/10.1364/OL.36.000097).

- [90] Sergey AKOPOV et John JAY. *BOTDR Measurement Techniques and Brillouin Backscatter Characteristics of Corning Single-Mode Optical Fibers*. WP5080. Corning, mai 2010.
- [91] Gregory L. KEATON et al. « Stimulated Brillouin scattering of pulses in optical fibers ». In : *Optics Express* 22.11 (2 juin 2014). Publisher : Optical Society of America, p. 13351-13365. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.22.013351](https://doi.org/10.1364/OE.22.013351).
- [92] Marcelo A. SOTO et al. « Brillouin-Based Distributed Temperature Sensor Employing Pulse Coding ». In : *IEEE Sensors Journal* 8.3 (mar. 2008), p. 225-226. ISSN : 2379-9153. DOI : [10.1109/JSEN.2007.913143](https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.913143).
- [93] Marcelo A. SOTO et al. « Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range ». In : *Optics Letters* 35.2 (15 jan. 2010), p. 259. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.35.000259](https://doi.org/10.1364/OL.35.000259).
- [94] Hao LIANG et al. « High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses ». In : *Optics Letters* 35.10 (15 mai 2010), p. 1503-1505. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.35.001503](https://doi.org/10.1364/OL.35.001503).
- [95] Marcelo SOTO, Gabriele BOLOGNINI et Fabrizio PASQUALE. « Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification ». In : *Optics Letters* 36 (15 jan. 2011), p. 232-234. DOI : [10.1364/OL.36.000232](https://doi.org/10.1364/OL.36.000232).
- [96] N. LALAM et al. « Sensing range improvement of Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) using inline erbium-doped fibre amplifier ». In : *2017 IEEE SENSORS*. 2017 IEEE SENSORS. ISSN : null. Oct. 2017, p. 1-3. DOI : [10.1109/ICSENS.2017.8233878](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233878).
- [97] Yongkang DONG, Liang CHEN et Xiaoyi BAO. « Extending the Sensing Range of Brillouin Optical Time-Domain Analysis Combining Frequency-Division Multiplexing and In-Line EDFAs ». In : *Journal of Lightwave Technology* 30.8 (avr. 2012), p. 1161-1167. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.2011.2170813](https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2170813).
- [98] D. M. NGUYEN et al. « Sensitivity enhancement in long-range distributed Brillouin fiber sensor using an anti-Stokes single-sideband probe and a bidirectional EDFA ». In : *2012 Photonics Global Conference (PGC)*. 2012 Photonics Global Conference (PGC). Déc. 2012, p. 1-4. DOI : [10.1109/PGC.2012.6458002](https://doi.org/10.1109/PGC.2012.6458002).
- [99] F. GYGER et al. « Extending the sensing range of Brillouin optical time-domain analysis up to 325 km combining four optical repeaters ». In : *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*. 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. T. 9157. International Society for Optics et Photonics, 2 juin 2014, 91576Q. DOI : [10.1117/12.2059590](https://doi.org/10.1117/12.2059590).
- [100] Wai Pang NG et Nageswara LALAM. « Performance improvement of Brillouin based distributed fiber sensors employing wavelength diversity techniques (Invited Paper) ». In : *2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). ISSN : null. Août 2017, p. 1-3. DOI : [10.1109/ICOON.2017.8121531](https://doi.org/10.1109/ICOON.2017.8121531).
- [101] Muping SONG et al. « 100 km Brillouin optical time-domain reflectometer based on unidirectionally pumped Raman amplification ». In : *Optical and Quantum Electronics* 48 (1^{er} déc. 2016). DOI : [10.1007/s11082-015-0314-z](https://doi.org/10.1007/s11082-015-0314-z).

- [102] Hiroshige OHNO et al. « Application of Brillouin Scattering-Based Distributed Optical Fiber Strain Sensor to Actual Concrete Piles ». In : *IEICE TRANSACTIONS on Electronics* E85-C.4 (1^{er} avr. 2002). Publisher : The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, p. 945-951. ISSN : , 0916-8516.
- [103] P.j BENNETT et al. « Distributed optical fibre strain sensing in piles ». In : Conference : International Conference on Re-use of Foundations for Urban Sites. Library Catalog : www.researchgate.net. Watford, UK, jan. 2006.
- [104] Hisham MOHAMAD, K. SOGA et B. AMATYA. « Thermal Strain Sensing of Concrete Piles Using Brillouin Optical Time Domain Reflectometry ». In : *Geotechnical Testing Journal* 37 (24 mar. 2014), p. 20120176. DOI : [10.1520/GTJ20120176](https://doi.org/10.1520/GTJ20120176).
- [105] M. N. ALAHBABI, Y. T. CHO et T. P. NEWSON. « Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering ». In : *Optics Letters* 30.11 (1^{er} juin 2005), p. 1276-1278. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.30.001276](https://doi.org/10.1364/OL.30.001276).
- [106] Gabriele BOLOGNINI et Marcelo SOTO. « Optical pulse coding in hybrid distributed sensing based on Raman and Brillouin scattering employing Fabry-Perot lasers ». In : *Optics express* 18 (12 avr. 2010), p. 8459-65. DOI : [10.1364/OE.18.008459](https://doi.org/10.1364/OE.18.008459).
- [107] Kinzo KISHIDA, Yoshiaki YAMAUCHI et Artur GUZIK. « Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh system ». In : *Photonic Sensors* 4.1 (mar. 2014), p. 1-11. ISSN : 1674-9251, 2190-7439. DOI : [10.1007/s13320-013-0136-1](https://doi.org/10.1007/s13320-013-0136-1).
- [108] C.C. LEE, P.W. CHIANG et S. CHI. « Utilization of a dispersion-shifted fiber for simultaneous measurement of distributed strain and temperature through Brillouin frequency shift ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 13.10 (oct. 2001). Conference Name : IEEE Photonics Technology Letters, p. 1094-1096. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/68.950746](https://doi.org/10.1109/68.950746).
- [109] M. ALAHBABI, Y. T. CHO et T. P. NEWSON. « Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors ». In : *Optics Letters* 29.1 (1^{er} jan. 2004). Publisher : Optical Society of America, p. 26-28. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.29.000026](https://doi.org/10.1364/OL.29.000026).
- [110] Lufan ZOU et al. « Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber ». In : *Optics Letters* 29.13 (1^{er} juil. 2004). Publisher : Optical Society of America, p. 1485-1487. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.29.001485](https://doi.org/10.1364/OL.29.001485).
- [111] Y. CHEN et al. « Demonstration of an 11km Hollow Core Photonic Band-gap Fiber for Broadband Low-latency Data Transmission ». In : *Optical Fiber Communication Conference Post Deadline Papers (2015), paper Th5A.1*. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 22 mar. 2015, Th5A.1. DOI : [10.1364/OFC.2015.Th5A.1](https://doi.org/10.1364/OFC.2015.Th5A.1).
- [112] P. C. WAIT et T. P. NEWSON. « Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing ». In : *Optics Communications* 122.4 (1^{er} jan. 1996), p. 141-146. ISSN : 0030-4018. DOI : [10.1016/0030-4018\(95\)00557-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00557-9).
- [113] Vincent LECOEUQUE. « Brillouin and Rayleigh Distributed Sensor ». Brev. US) VIAVI SOLUTIONS INC. (MILPITAS CA. 19 oct. 2017.

- [114] R. KLUTH et al. « Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by using optic fibre ». In : Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Changwon, Korea, 2 avr. 2006.
- [115] Vincent LANTICQ, Pierre CLEMENT et Etienne ALMORIC. « Optoelectronic Device for Distributed Measurement by Means of Optical Fibre ». Brev. franç. 3066280 (A1). Febus OPTICS. Library Catalog : ESpacenet.
- [116] Muping SONG, Bin ZHAO et Xianmin ZHANG. « Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception ». In : *Chinese Optics Letters* 3.5 (10 mai 2005), p. 271-274.
- [117] DUAL POLARIZATION HYBRIDS. kyllia.com. Library Catalog : kyllia.com. URL : <https://kylia.com/kylia/?portfolio=90-hybrid-coh> (visité le 08/06/2020).
- [118] P. HEALEY. « Fading in heterodyne OTDR ». In : *Electronics Letters* 20.1 (jan. 1984). Conference Name : Electronics Letters, p. 30-32. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19840022](https://doi.org/10.1049/e1:19840022).
- [119] J. W. GOODMAN. « Statistical properties of laser speckle patterns ». In : John Christopher DAINTY et al. *Laser Speckle and Related Phenomena*. T. 9. Book Authors : _ :n3 Series Title : Topics in Applied Physics. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1975, p. 9-75. ISBN : 978-3-540-13169-4 978-3-540-38013-9. DOI : [10.1007/BFb0111436](https://doi.org/10.1007/BFb0111436).
- [120] H. IZUMITA et al. « Fading noise reduction in coherent OTDR ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 4.2 (fév. 1992), p. 201-203. ISSN : 1041-1135. DOI : [10.1109/68.122361](https://doi.org/10.1109/68.122361).
- [121] Hisashi IZUMITA et al. « Stochastic amplitude fluctuation in coherent optimal time domain reflectometry and its reduction technique ». In : *Electronics and Communications in Japan (Part I : Communications)* 77.8 (1^{er} août 1994), p. 34-47. ISSN : 1520-6424. DOI : [10.1002/ecja.4410770804](https://doi.org/10.1002/ecja.4410770804).
- [122] J. KING et al. « Development of a coherent OTDR instrument ». In : *Journal of Lightwave Technology* 5.4 (avr. 1987), p. 616-624. ISSN : 0733-8724. DOI : [10.1109/JLT.1987.1075523](https://doi.org/10.1109/JLT.1987.1075523).
- [123] K. SHIMIZU, T. HORIGUCHI et Y. KOYAMADA. « Characteristics and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fibers and components ». In : *Journal of Lightwave Technology* 10.7 (juil. 1992). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 982-987. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/50.144923](https://doi.org/10.1109/50.144923).
- [124] Marc D. MERMELSTEIN et al. « Rayleigh scattering optical frequency correlation in a single-mode optical fiber ». In : *Optics Letters* 26.2 (15 jan. 2001). Publisher : Optical Society of America, p. 58-60. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.26.000058](https://doi.org/10.1364/OL.26.000058).
- [125] K. De SOUZA. « Significance of coherent Rayleigh noise in fibre-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering ». In : *Measurement Science and Technology* 17.5 (2006), p. 1065. ISSN : 0957-0233. DOI : [10.1088/0957-0233/17/5/S21](https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/5/S21).
- [126] M.P. GOLD et A.H. HARTOG. « Measurement of backscatter factor in single-mode fibres ». In : *Electronics Letters* 17.25 (déc. 1981). Conference Name : Electronics Letters, p. 965-966. ISSN : 0013-5194. DOI : [10.1049/e1:19810674](https://doi.org/10.1049/e1:19810674).

- [127] Masataka NAKAZAWA. « Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers ». In : *JOSA* 73.9 (1^{er} sept. 1983). Publisher : Optical Society of America, p. 1175-1180. DOI : [10.1364/JOSA.73.001175](https://doi.org/10.1364/JOSA.73.001175).
- [128] A. HARTOG et M. GOLD. « On the theory of backscattering in single-mode optical fibers ». In : *Journal of Lightwave Technology* 2.2 (avr. 1984). Conference Name : Journal of Lightwave Technology, p. 76-82. ISSN : 1558-2213. DOI : [10.1109/JLT.1984.1073598](https://doi.org/10.1109/JLT.1984.1073598).
- [129] Y YAMAUCHI. « A measurement method to determine strain and temperature coefficients in fiber optic sensors ». In : APWSHM Conference. Tokyo, Japan, 2010.
- [130] Peter FITZGERALD et Bengt K. PEDERSEN. « A Technique for Improving the Accuracy of Wireline Depth Measurements ». In : SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1^{er} jan. 2007. ISBN : 978-1-55563-148-2. DOI : [10.2118/110318-MS](https://doi.org/10.2118/110318-MS).
- [131] Robert DESBRANDES et Phillip A. SCHENEWERK. « Stretch Depth Correction With Logging Cables ». In : *The Log Analyst* 34.2 (1^{er} mar. 1993). Publisher : Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. ISSN : 0024-581X.
- [132] D. BURNETT et Chung-Chun ONG. « Shortening of submerged ocean cables due to hydrostatic pressure ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 12.1 (jan. 1987). Conference Name : IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 281-288. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/JOE.1987.1145239](https://doi.org/10.1109/JOE.1987.1145239).
- [133] P. CLEMENT, R. GABET et V. LANTICQ. « Distributed Temperature and Strain Sensing Using Brillouin Backscattering ». In : First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing. T. 2020. ISSN : 2214-4609 Issue : 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 9 mar. 2020, p. 1-5. DOI : [10.3997/2214-4609.202030041](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202030041).
- [134] Thomas SCHNEIDER. *Nonlinear optics in telecommunications*. OCLC : 1064525541. Berlin ; London : Springer, 2011. ISBN : 978-3-642-05772-4.
- [135] G.652 : *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes*. ITU-T. Nov. 2016.
- [136] G.657 : *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes insensibles aux pertes par courbure*. ITU-T. Nov. 2016.
- [137] Jonghan PARK et al. « Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 18.17 (sept. 2006), p. 1879-1881. ISSN : 1941-0174. DOI : [10.1109/LPT.2006.881239](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.881239).
- [138] T. SYLVESTRE et al. *Long-range and high-resolution distributed Brillouin fiber sensors | Capteur Brillouin réparti à fibre optique à haute résolution et longue portée*. Instrumentation Mesure Métrologie. Number : ARTICLE Pages : 31-45 Volume : 13. 2013. DOI : [10.3166/I2M.13.1-2.31-45](https://doi.org/10.3166/I2M.13.1-2.31-45). URL : <http://infoscience.epfl.ch/record/198275> (visité le 17/02/2021).
- [139] Philippe BOUSSELET et al. « 485km Unrepeated 4x43Gb/s NRZ-DPSK Transmission ». In : (24 fév. 2008).

- [140] Arthur H. HARTOG. « Raman sensors and their applications ». In : *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*. OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. T. 8421. International Society for Optics et Photonics, 17 oct. 2012, 84210K. DOI : [10.1117/12.974845](https://doi.org/10.1117/12.974845).
- [141] Sylvie DELEPINE-LESOILLE et al. « Validation of TW-COTDR method for 25km distributed optical fiber sensing ». In : *Proc SPIE*. T. 8794. 1^{er} mai 2013, p. 38. DOI : [10.1117/12.2025802](https://doi.org/10.1117/12.2025802).
- [142] Yi WENG et al. « Single-end simultaneous temperature and strain sensing techniques based on Brillouin optical time domain reflectometry in few-mode fibers ». In : *Optics Express* 23.7 (6 avr. 2015), p. 9024. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.23.009024](https://doi.org/10.1364/OE.23.009024).
- [143] An LI et al. « Few-mode fiber multi-parameter sensor with distributed temperature and strain discrimination ». In : *Optics Letters* 40.7 (1^{er} avr. 2015). Publisher : Optical Society of America, p. 1488-1491. ISSN : 1539-4794. DOI : [10.1364/OL.40.001488](https://doi.org/10.1364/OL.40.001488).
- [144] Herman Z. CUMMINS et Robert W. GAMMON. « Rayleigh and Brillouin Scattering in Liquids : The Landau—Placzek Ratio ». In : *The Journal of Chemical Physics* 44.7 (1^{er} avr. 1966). Publisher : American Institute of Physics, p. 2785-2796. ISSN : 0021-9606. DOI : [10.1063/1.1727126](https://doi.org/10.1063/1.1727126).
- [145] Pierre CLÉMENT et al. « Enhancement of sensing range of BOTDR system up to 150km with in-line bi-directional EDFAs ». In : *Electronics Letters* (), p. 2.
- [146] Pierre CLEMENT et al. « B-OTDR solution for independent temperature and strain measurement in a single acquisition in a unique fiber ». In : *Journal of Lightwave Technology, Special Issue* (), p. 8.

Liste des publications et conférences

[29] Pierre CLÉMENT, Lara LATRASSE et Vincent LANTICQ. « Cable Monitoring during Production and Deployment ». In : WindEurope. Amsterdam, 28 nov. 2017

[87] Pierre CLÉMENT et al. « Fiber optic monitoring of pipelines in permafrost context ». In : *26th International Conference on Optical Fiber Sensors (2018), paper ThE94*. Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 24 sept. 2018, ThE94. DOI : [10.1364/OFS.2018.ThE94](https://doi.org/10.1364/OFS.2018.ThE94)

[115] Vincent LANTICQ, Pierre CLEMENT et Etienne ALMORIC. « Optoelectronic Device for Distributed Measurement by Means of Optical Fibre ». Brev. franç. 3066280 (A1). Febus OPTICS. Library Catalog : ESpacenet

[133] P. CLEMENT, R. GABET et V. LANTICQ. « Distributed Temperature and Strain Sensing Using Brillouin Backscattering ». In : First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing. T. 2020. ISSN : 2214-4609 Issue : 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 9 mar. 2020, p. 1-5. DOI : [10.3997/2214-4609.202030041](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202030041)

[145] Pierre CLÉMENT et al. « Enhancement of sensing range of BOTDR system up to 150km with in-line bi-directional EDFAs ». In : *Electronics Letters* (), p. 2

[146] Pierre CLEMENT et al. « B-OTDR solution for independent temperature and strain measurement in a single acquisition in a unique fiber ». In : *Journal of Light-wave Technology, Special Issue* (), p. 8

Titre : Solutions aux limites des interrogateurs B-OTDR pour la surveillance d'infrastructures : augmentation de la portée de mesure et décorrélation des paramètres de température et de déformation

Mots clés : surveillance de l'état de santé d'infrastructures, mesure distribuée par fibre optique, rétrodiffusion optique, distance maximale de mesure, déformation, température, vibrations acoustiques, pression hydrostatique

Résumé : Cette thèse porte sur l'étude des systèmes de mesure répartie de la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre optique, que l'on nomme B-OTDR et qui sont sensibles à la température et à la déformation de la fibre. Les solutions d'interrogateurs actuelles permettent l'instrumentation de grandes infrastructures. Cependant, il existe des limites, inhérentes au phénomène physique utilisé, qui ne permettent pas d'adresser certaines applications spécifiques. Ces limites portent sur la distance de mesure maximale accessible par ces interrogateurs mais également sur la décorrélation de la mesure des paramètres de température et de déformation. Nous avons donc cherché, au cours de cette thèse, à adresser des solutions à ces problématiques. Un nouveau système de ré-amplification optique, basé sur les technologies EDFA, a été mis au point. Associé à un système B-OTDR, cette solution nous a permis de réaliser une mesure distribuée de température sur 150 km de fibre avec une répétabilité de 1,5 °C. Cette avancée propose, à notre connaissance, les meilleurs résultats obtenus avec un tel système et nous permet d'envisager son déploiement pour la surveillance d'infrastructures du transport de l'énergie sur de longues distances. Nous avons dans un second temps conçu un nouvel

interrogateur, utilisant la rétrodiffusion Brillouin, et permettant la décorrélation des mesures de température et de déformation sur une seule et unique fibre optique. Ce nouvel interrogateur, caractérisé et breveté durant cette thèse, a permis de réaliser une mesure indépendante de température et de déformation sur un câble spécifique inséré dans un puits de forage. Les résultats de ces mesures ont montré à la fois des variations de température et de déformation sur le câble, donnant des informations précieuses à l'opérateur du puits. Le nouvel interrogateur mis au point, permet une séparation de ces deux paramètres avec une répétabilité inférieure à 1 °C et 20 $\mu m/m$ pour une distance de l'ordre du kilomètre. Pour des distances de l'ordre de la dizaine de kilomètres, la répétabilité de mesure est de 3 °C et 75 $\mu m/m$. Ce résultat fait l'état de l'art dans la séparation température/déformation par B-OTDR. Enfin, les différents travaux réalisés pour répondre à ces deux problématiques ont abouti au développement d'un prototype d'interrogateur qui laisse envisager une mesure simultanée de la température, de la déformation, des vibrations acoustiques et de la pression hydrostatique. Ce prototype conduit à des perspectives intéressantes pour une solution complète de surveillance d'infrastructures.

Title : Solutions to B-OTDR limitations for structural health monitoring : improvement of the maximal measurement length and separation of temperature and strain

Keywords : structural health monitoring, distributed optical fiber sensing, optical scattering, maximal measurement length, strain, temperature, acoustic vibrations, hydrostatic pressure

Abstract : This thesis deals with distributed optical fiber sensors, especially Brillouin sensors called B-OTDR that are sensitive both to temperature and strain. Some actual limitations due to the scattering phenomenon avoid deployment of this technology for some specific applications. These limitations are about the maximum length measured by the sensor but also the double sensitivity to strain and temperature. From our current B-OTDR sensor, we propose solutions to address these issues. A new re-amplification module using EDFA has been developed and characterized associated to a B-OTDR system. A 150 km distributed temperature measurement with 1,5 °C repeatability has been reached. This record performance let us consider a deployment for very long infrastructure monitoring for the energy transport. In another hand, we developed a new sensing de-

vice using Brillouin scattering and able to separate temperature and strain. This patented device has been characterized and used on a specific cable inserted in a well drilling. Results have shown a combination of strain and temperature variations on the cable that give very useful information to the well operator. We have reached a temperature repeatability of 1 °C and a strain repeatability of 20 $\mu m/m$ for 1 km fiber. At 10 km, temperature repeatability has been evaluated to be 3 °C and strain to 75 $\mu m/m$. These results are to the state of art for temperature/strain separation using B-OTDR. These works have led to a new distributed measurement prototype that could address simultaneously temperature, strain, acoustic vibrations, and pressure sensing. Some interesting perspectives could result from these works to address a complete infrastructure monitoring using fiber optic sensing.