Performances des capteurs à fibres optiques basés sur les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman en environnement sévère

Isabelle Planes

▶ **To cite this version:**

Isabelle Planes. Performances des capteurs à fibres optiques basés sur les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman en environnement sévère. Optique [physics.optics]. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSES048 . tel-02895089

HAL Id: tel-02895089
https://theses.hal.science/tel-02895089

Submitted on 9 Jul 2020

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.

N°d'ordre NNT : 2019LYSES048

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein du
Laboratoire Hubert Curien

Ecole Doctorale N° 488
Sciences, ingénierie, santé

Discipline de doctorat: Optique, photonique, hyperfréquences

Soutenue publiquement le 09/10/2019, par :
Isabelle Planes

Performances des capteurs à fibre optique basés sur les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman en environnement sévère

Devant le jury composé de :

		Président
Benabdesselam, Mourad	Professeur/ Université de Nice	Rapporteur
Bouazaoui, Mohamed	Professeur/ Université de Lille	Rapporteur
Delepine-Lesoille, Sylvie	Ingénieure R&D/ Andra	Examinatrice
Ouerdane, Youcef	Professeur/ Université de Saint-Etienne	Directeur
Girard, Sylvain	Professeur/ Université de Saint-Etienne	Co-Directeur

Glossaire 6
Partie I : Contexte global 7
Chapitre 1: Contexte 8
1.1 Expression du besoin 8
1.2 Spécificités de l'environnement 10
1.3 Spécificités des capteurs à fibre optique 14
1.3.1 Fibre optique, généralités 15
1.3.2 Instrument de mesure associé à son logiciel 17
1.3.2.1 Rappels sur les différents types de diffusions de la lumière dans la silice 17
1.3.2.2 Diffusion Raman 19
1.3.2.3 Diffusion Rayleigh 21
1.3.2.4 Diffusion Brillouin 23
1.3.2.5 Association des diffusions Brillouin et Rayleigh 25
1.3.2.6 Résumé des instruments disponibles 27
Chapitre 2: Comment répondre au besoin de mesure de Cigéo ? 31
2.1 Effets des radiations sur les fibres optiques 31
2.1.1 Effets des radiations sur les pertes de propagation 31
2.1.2 Effets des radiations sur l'indice de réfraction 35
2.1.3 Impact des radiations sur la rétrodiffusion Raman 35
2.1.4 Impact des radiations sur la rétrodiffusion Rayleigh 37
2.1.5 Impact des radiations sur la rétrodiffusion Brillouin 38
2.2 Effets couplés des radiations et de la température 39
2.3 Effets de l'hydrogénation 41
2.3.1 Récents résultats sur les effets couplés des radiations et de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Raman 44
2.4 Bilan sur les influences des radiations, de l'hydrogène et de la température sur les fibres optiques 45
2.5 Solutions techniques disponibles pour simuler les conditions de Cigéo 46
2.5.1 Méthodes et installations d'irradiations 46
2.5.1.1 Montages expérimentaux 'IRMA' 47
2.5.1.2 Montage expérimental 'MOPERIX' 48
2.5.1.3 Montage expérimental 'MOL' 49
2.5.2 Méthodes et matériels de mesure de RIA 50

2.5.3 Méthodes et matériels de sollicitation thermique 52
2.5.4 Procédure et matériels de sollicitation sous hydrogène 52
2.5.5 Méthodes et matériels de sollicitation mécanique 53
Chapitre 3: Structure de la thèse et mise en place des moyens techniques 56
3.1 Méthodologie et objectif 56
3.2 Eléments retenus pour la thèse 58
3.2.1 Liste des fibres étudiées 58
3.2.2 Caractéristiques des fibres dopées Ge, F et N 63
3.2.2.1 Atténuations induites par les radiations 63
3.2.2.2 Calibrations en température 65
3.2.2.3 Calibrations en déformation 67
3.2.3 Caractéristiques des fibres multimodes 69
Partie II Résultats 70
Chapitre 4: Réponse de l'interrogateur Raman 71
4.1 Effets des radiations 71
4.1.1 Performances de la technologie DTS Silixa 72
4.1.2 Performances de la technologie DTS Viavi 77
4.2 Effets couplés de la température et des radiations (RDTS Silixa) 78
4.3 Conclusion sur la vulnérabilité de la rétrodiffusion Raman 81
Chapitre 5: Réponse de l'interrogateur Rayleigh 83
5.1 Influence du choix de l'instrument de mesure Rayleigh 83
5.1.1 Comparaison des performances des technologies OFDR et TW-COTDR pour la mesure de température ou de déformation 84
5.1.2 Comparaison des performances des OFDR et TW-COTDR sous radiation 86
5.2 Effets des radiations sur les fibres optiques 88
5.3 Effets de l'hydrogène sur les fibres optiques 91
5.4 Effets couplés de l'hydrogène et des radiations 92
5.5 Effets couplés de la déformation et des radiations 95
5.6 Effets couplés de la température et des radiations 98
5.7 Conclusion sur la vulnérabilité de la rétrodiffusion Rayleigh 99
Chapitre 6: Réponse de l'interrogateur Brillouin 102
6.1 Effets de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Brillouin 102
6.2 Effet des radiations sur la rétrodiffusion Brillouin 104

6.3 Effets couplés de l'hydrogène et des radiations 105
6.4 Effets couplés de la déformation et des radiations 106
6.5 Effets couplés de la température et des radiations..... 109
6.5.1 Influence croisée température-radiation sur les diffusions Brillouin 109
6.6 Effets cumulés de la température, de la déformation et des radiations 112
6.7 Influence du choix de l'instrument de mesure de rétrodiffusion Brillouin ... 115
6.7.1 Etude de la technologie PPP-BOTDA (Neubrescope) 115
6.7.2 Comparaison des performances des BOTDA et PPP-BOTDA 118
6.7.3 Comparaison des performances des BOTDA et BOTDR sous radiation 119
6.8 Conclusion sur la vulnérabilité de la rétrodiffusion Brillouin..... 124
Chapitre 7: Conclusions générales de la thèse..... 126

Glossaire

CFO : Capteur à Fibre Optique

HA : Haute activité

MA : Moyenne activité

VL : Vie Longue

RIA : Radiation Induced Attenuation

BOTDA : Brillouin Optical Time Domain Analyser

PPP-BOTDA : Pre-Pulse Pump Brillouin Optical Time Domain Analyser

BOTDR : Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

OFDR : Optical Frequency Domain Reflectometer

TW-COTDR : Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Analysis

RDTS : Raman Distributed Temperature Sensors

LEP : Lignes d'Expansion du Pressuriseur

ON : Ouverture Numérique

AS : Anti-Stokes

S: Stokes

NBOHC : Non Bridging Oxygen Hole Center

RIE : Radiation Induced Emission

Andra : Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs

LabHC : Laboratoire Hubert Curien

ALARA : As Low As Reasonably Achievable

Cigéo : Centre Industriel de stockage GEOlogique

UJM : Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Partie I : Contexte global

Chapitre 1: Contexte

Ce chapitre introduit le contexte de ces travaux de thèse qui ont été réalisés en collaboration entre l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) et le laboratoire Hubert Curien (LabHC) de l'Université de Saint-Etienne (UJM). En particulier, l'expression du besoin de l'Andra en termes de capteurs de température et de déformation pour la surveillance des sites de stockage des déchets radioactifs est explicitée ainsi que les spécificités de l'environnement d'opération de ces capteurs. Enfin, la comparaison entre les avantages et les limitations des capteurs à fibre optique (ci-après CFOs) et des technologies existantes est menée afin de justifier du potentiel de ces systèmes pour les suivis réguliers, déportés et répartis des évolutions des différentes grandeurs d'intérêt dans les applications visées.

1.1 Expression du besoin

Les déchets radioactifs issus de l'activité nucléaire française doivent être traités dans des filières spécifiques afin d'assurer une gestion la plus sûre possible. Celle-ci se base sur le principe ALARA -"As Low As Reasonably Achievable" qui vise une exposition de l'homme et de l'environnement aussi faible que raisonnablement possible aux rayonnements ionisants [1].Ces filières de traitements sont adaptées à la dangerosité des déchets (de faible, moyenne et haute activités) et à leurs évolutions dans le temps (durée de vie) [2] [3]. Si nous prenons le cas des déchets ultimes provenant de l'exploitation du combustible nucléaire dans les centrales, ces derniers sont principalement des composés de haute activité (HA) dont le niveau de radioactivité peut s'élever à plusieurs milliards ou plusieurs dizaines de milliards de becquerels par gramme [4] [5]. Ces déchets à forte radio toxicité et à durée de vie très longue (des milliers d'années pour certains éléments) sont vitrifiés, placés dans des conteneurs appropriés (métalliques) en attendant d'être stockés, d'après le concept français, dans le Centre Industriel de stockage GEOlogique (Cigéo) [6][7]. Ce projet de stockage géologique, dont l'Andra est en charge, accueillera les déchets radioactifs de moyennes et hautes activités à vie longue et sera réversible.

La manipulation des colis, leurs contrôles, de même que l'observation et la surveillance de l'environnement et des ouvrages doivent répondre aux besoins rigoureux des connaissances nécessaires à l'étude d'impact, à l'exploitation du stockage, à contribuer aux démonstrations de sûreté à long terme et de gestion réversible [8][9]. Afin de répondre à ce besoin et de mettre en œuvre un programme de surveillance opérationnelle de ce centre de stockage, l'Andra a choisi d'étudier différentes techniques de surveillance (monitoring) de l'intégrité de ses sites via le suivi de plusieurs grandeurs physiques telles que : mesure de température,

déformation, niveau d'hydrogène ou de radiations. Dans le cadre de cette étude et parmi les technologies de mesure, nous avons fait le choix des CFOs répartis qui se présentent comme des solutions à fort potentiel pour de multiples raisons :

- **Pourquoi ?** Les capteurs à fibre optique offrent plusieurs avantages pour un déploiement dans des environnements sévères : utilisant la fibre optique à base de silice comme élément sensible, ils fournissent des mesures déportées et quasi-continument réparties tout au long de la fibre optique. Les résolutions spatiales associées sont comprises entre quelques centimètres et le mètre, sans « zone morte » et ce sur de grandes distances. Pour l'ensemble des instruments, la portée des mesures peut varier de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Généralement, ces technologies sont mieux adaptées aux conditions sévères (hautes températures, fortes contraintes, radiations ionisantes) que les technologies concurrentes (par exemple issues de la microélectronique). Par conséquent, on voit se dessiner de multiples possibilités de cartographies déportées de ces environnements sévères.

- **Qui ?** Deux acteurs collaborent : le Laboratoire Hubert Curien (LabHC) de l'Université Jean Monnet (UJM) de Saint-Etienne (UMR CNRS) qui possède une forte expertise dans l'étude des matériaux pour l'optique et la photonique en environnement radiatif extrême (groupe MOPERE) et l'Andra qui porte l'application, finance et coordonne le projet.

- **Comment ?** Ces deux acteurs ont mis en place l'application d'une succession de thèses, afin d'étudier les performances de ce type de capteurs à base de fibre optique. Les deux thèses précédentes avaient pour objectif l'étude des performances des capteurs (à fibre optique) en environnement sévère en utilisant aussi bien la diffusion Brillouin [10][11][12][13][14] que la diffusion Raman [15][16]. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous attacherons une attention particulière aux effets croisés de la température et/ou de l'hydrogène en environnement radiatif que nous caractérisons en mixant les analyses et caractérisations de types : Brillouin, Rayleigh et Raman.

En vue de leur intégration dans Cigéo, il est fondamental d'étudier la vulnérabilité des différentes technologies de capteurs de température ou de déformations à fibres optiques à cet environnement d'exploitation. Pour cela, il convient d'évaluer les performances de ces CFOs lorsqu'ils sont soumis aux différentes contraintes environnementales :

- Présence de fortes doses de radiations ionisantes dans l'air (rayonnement gamma) supérieures au MGy(SiO_2),

- Elévation de température causée par l'activité des déchets,

- Possible déformation du milieu souterrain qui accueillera les colis ;

- Dégagement d'hydrogène, issu de certains colis de déchets ou de processus de corrosion anoxique.

1.2 Spécificités de l'environnement

Depuis plusieurs années, les autorités Françaises ont mené différentes études, sur l'ensemble du territoire, afin d'accueillir des galeries de stockage pour les déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. Pour des raisons de géologie favorable, les conclusions de ces travaux ont permis de retenir un site situé dans l'Est de la France, à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne [17].

Ce site est localisé dans le bassin de Paris, qui est constitué d'une succession de couches de calcaire et de roches argileuses [18]. Une couche, appelée Callovo-oxfordien (COx), se trouvant à 500 mètres de profondeur, d'épaisseur d'environ 130 mètres et vieille de 160 millions d'années, recevra les colis de stockage.

Cette couche a été sélectionnée car sa profondeur est suffisante pour ne pas être affectée par les phénomènes de surface (gel, pluie…). De plus, les études menées indiquent que cette couche présente des caractéristiques favorables pour un stockage de déchets radioactifs. En effet, elle constitue un environnement géologique stable depuis 125 millions d'années. Elle possède des propriétés de confinement, notamment celle de rétention de substance radiologique. De plus, l'argile répond bien aux perturbations extérieures telles que la température et les agressions mécaniques.

Il est prévu que les colis de déchets de haute activité à vie longue (HA-VL) soient placés dans des alvéoles creusés horizontalement dans l'environnement souterrain, comme illustré ci-dessous (Figure 1).

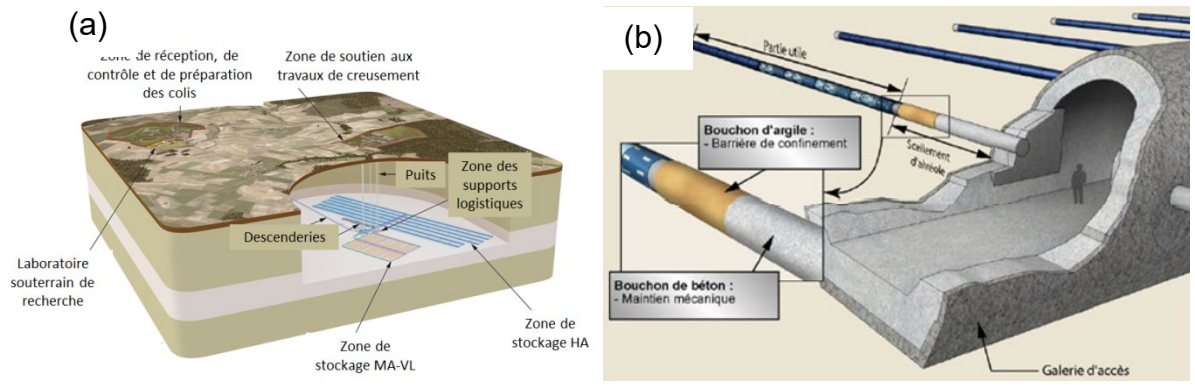


Figure 1: (a) Conception du centre de stockage de déchets radioactifs de moyenne et haute activité à vie longue (MA/HA VL). (b) Illustration des galeries souterraines et d'un exemple de concept de stockage de déchets de haute activité (HA).

Le projet Cigéo se composera:

- D'installations souterraines comme décrites précédemment. Il est prévu que la surface totale de ces installations atteigne 15 km², après une centaine d'années d'exploitation.

- D'installations industrielles de surface comprenant les ateliers liés à la construction du stockage, à la réception des colis et à leurs préparations avant leur transfert en souterrain.

- De liaisons entre les installations souterraines et de surface : des tunnels inclinés, appelés descenderies, pour le transfert des colis, des puits pour l'aérage ou le personnel.

La présence des déchets radioactifs dans les alvéoles de stockage va entraîner des conditions sévères d'exploitation. Les principales caractéristiques de cet environnement spécifique sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des alvéoles de stockage pour les déchets HA [12]

Types de déchet radioactif	- HA
Radiation	- Débit de dose allant de 1 à 10 Gy/h en face externe de chemisage - Dose totale maximale = 8 – 10 MGy (100 ans)
Température dans les alvéoles	- = 30 à 90°C
Pression dans les alvéoles	- >1 Bar
Humidité	- = 40%
Gaz interférant	- Relâchement d'Hydrogène par certains colis : - = 140 mol d'H_2/fut/an dû à la corrosion anoxique du métal
Vibrations	- = 10-2000 Hz - = 0-30 µm pic à pic - = 0,2g

Parmi ces paramètres environnementaux, quatre processus sont identifiés pour l'observation ou la surveillance des alvéoles de stockage de déchets : les jeux de manutention pour confirmer la possibilité du retrait de colis, la température, les niveaux de radiation et d'hydrogène. Dans cet environnement complexe, il convient de prendre en compte l'impact de ces différents effets sur les performances des différents types de capteurs à fibres optiques :

- **les radiations**, en rayonnement gamma, seuls les effets d'ionisation sont étudiés. Le débit de dose gamma associé aux colis HA peut varier dans la gamme de 1 à 10 Gy/h à la surface externe du chemisage de l'alvéole HA, entrainant une dose totale déposée de 8 à 10 MGy après 100 ans d'exploitation.

- **la température**, le dégagement de chaleur des colis HA est important. Des études spécifiques ont permis à l'Andra de limiter l'élévation de cette température à un maximum de 90°C entre les alvéoles et le milieu argileux souterrain. Cette valeur peut être atteinte après 10 à 20 ans de stockage. Dans une couche de quelques dizaines de mètres d'épaisseur au-dessus et au-dessous du niveau de stockage, la température augmentera progressivement de quelques dizaines de degrés, avant de décroître lentement. D'après le schéma de projection, après 1000 ans, la température maximale devrait redescendre à environ 50°C. In-fine, toute la chaleur produite sera évacuée par le milieu environnant.

- **la production d'hydrogène :** certains déchets HA-VL seront source d'hydrogène lors de leurs interactions avec leur environnement direct. Une seconde source est la corrosion des aciers des conteneurs métalliques en atmosphère anoxique. Cette production s'explique par des réactions d'oxydoréduction, notamment la réaction d'oxydation $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$, et la réaction de réduction en milieu désaéré $2\ H_2O + 2e^- \rightarrow 2\ OH^- + H_2$. La production d'hydrogène au niveau du stockage variera en fonction du remplissage et de la fermeture des alvéoles d'une part, de la nature des déchets stockés d'autre part. Elle peut atteindre 10 l/déchet/an.

- **la déformation :** des perturbations mécaniques induites lors du creusement de la galerie constituent un paramètre de taille, qui doit être surveillé. L'impact de ce creusement sur l'évolution des pressions dans la roche argilite génère une augmentation de la pression interstitielle dans le plan horizontal (ordre de grandeur des surpressions : >3.5 MPa à 1m de la paroi) ainsi qu'une diminution de la pression interstitielle dans le plan vertical. De ce fait, les surpressions dans le plan horizontal sont significativement plus élevées que celles mesurées autour de galeries de même orientation. Ce phénomène est lié aux différences de vitesse de creusement de la galerie.

Le schéma représentatif de l'évolution au cours du temps de ces paramètres est présenté sur la Figure 2.

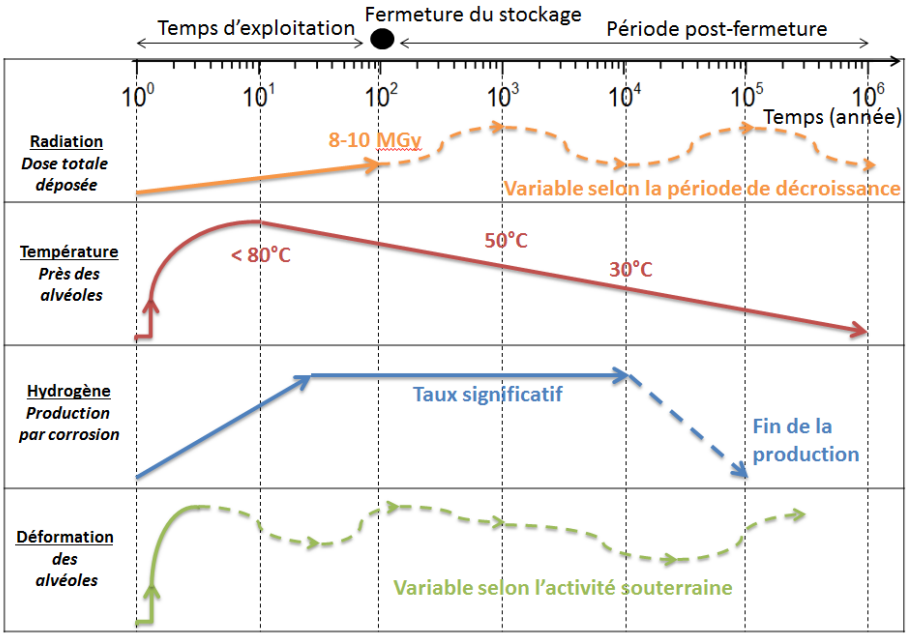


Figure 2 : Schéma représentatif de l'évolution au cours du temps des principaux paramètres : radiation, température, hydrogène et déformation.

Afin de mesurer et quantifier les effets de ces différents paramètres, l'Andra évalue les performances de plusieurs technologies de capteurs [9], tels que : les extensomètres à corde vibrante pour la déformation, les sondes platines pour la température. Les fibres optiques, de par leurs spécificités, pourraient permettre de caractériser les quatre paramètres principaux. Les extrêmes conditions de ce type d'environnement requièrent des surveillances et des suivis minutieux dont les contrôles sont basés sur différentes technologies, qui peuvent être implémentées de manière redondante dont un exemple est représenté en Figure 3. Nous développerons celles associées aux CFOs dans la suite du manuscrit.

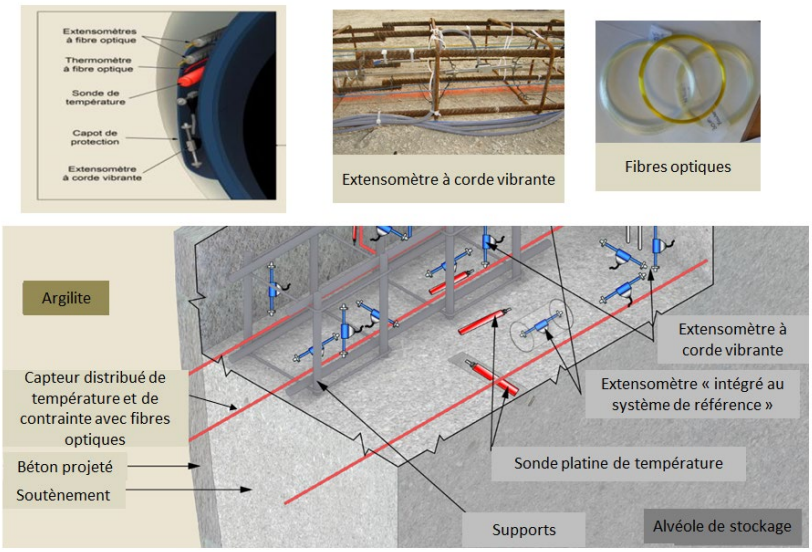


Figure 3 : Exemple d'implémentation des différents types d'instrumentations dans les alvéoles de stockage de Cigéo, ici l'exemple l'alvéole MAVL.

1.3 Spécificités des capteurs à fibre optique

Les attentes recherchées pour l'application Cigéo, sont d'abord et avant tout d'accéder aux quantifications des paramètres physiques qui interviennent dans ce type de site extrême. Comme cité plus haut, la technologie envisagée permet aussi d'avoir une localisation des différents évènements grâce à la répartition des relevés de mesures. Les exigences correspondantes se reportent sur une résolution spatiale centimétrique, une incertitude de mesure de température (respectivement déformation) de 1°C (ou quelques με : c'est-à-dire un allongement de 10^{-6}m pour 1m de matériau). De plus, la distance minimale à mesurer est de 100 m (la longueur d'un alvéole HA-VL) et de 500 m pour les alvéoles MAVL, sous conditions radiatives.

Pour lever ces verrous, les capteurs à fibre optique ont de nombreux avantages, en comparaison des autres capteurs classiques. Les CFOs bénéficient des avantages intrinsèques aux fibres optiques à base de silice : ils sont peu intrusifs, quasi-insensibles aux perturbations électromagnétiques et assez résistants aux conditions sévères (température, contrainte, radiations ionisantes…). Grâce à ces CFO répartis, il est aujourd'hui possible de réaliser des mesures avec une résolution spatiale inférieure au mètre le long d'une fibre optique, sans « zones mortes » sur des distances de plusieurs km à plusieurs dizaines de km. De plus, ces technologies sont multiplexables ce qui permet de multiplier les voies de mesure sans augmenter le nombre d'interrogateurs optiques.

Dans la pratique, un capteur à fibre optique est composé de deux sous-ensembles, présentés dans la Figure 4 :

- **Un élément sensible, la fibre optique** : elle est composée d'un cœur, d'une gaine optique, tous deux à base de silice et d'un revêtement en polymère ou en métal. Selon la température d'opération, l'acrylate est le matériau le plus utilisé (jusqu'à 80°C) ou le polyimide (jusqu'à 300°C).
- **Un interrogateur, l'instrument de mesure associé à son logiciel** de traitement du signal : il permet de réaliser la mesure. Il est le plus souvent basé sur la combinaison entre une technique réflectométrique et la caractérisation d'une signature propre à la fibre sous test qui dépend des contraintes environnementales. Dans le cadre de cette thèse, la mesure est basée sur la caractérisation de la lumière diffusée (rétrodiffusée) par la fibre optique qui est de type Rayleigh, Raman ou Brillouin. Le choix de la signature utilisée est basé sur la nature du paramètre à quantifier et des performances attendues pour le capteur.

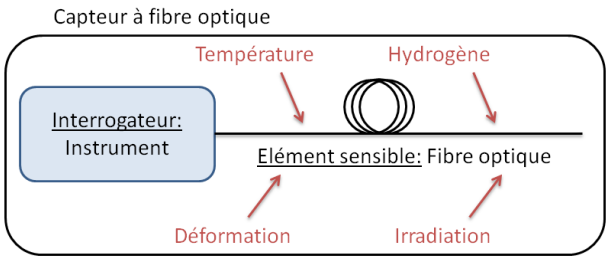


Figure 4: Principe du capteur à fibre optique et différentes grandeurs d'étude.

1.3.1 Fibre optique, généralités

De manière très simplifiée, la fibre optique est un guide d'onde pour le visible et le proche infrarouge. Elle est constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur a un indice de réfraction (n_c) légèrement plus élevé que celui de la gaine (n_g), afin de confiner la lumière qui se réfléchit à l'interface cœur-gaine selon le phénomène de réflexion totale.

La maîtrise et le contrôle des indices de réfractions (n_c et n_g) de ces composants sont gouvernés par les dopants indiciels (types et concentrations) incorporés lors de l'élaboration du guide. Ces éléments joueront un rôle primordial au regard de l'application visée.

En fait, un faisceau de rayons envoyé dans le guide n'est piégé que si l'angle d'incidence θ à l'interface est supérieur à l'angle critique θc défini par :

$$sin\,\theta c = \frac{n_g}{n_c} \quad \textit{(Équation 1)}$$

Ceci implique que les rayons injectés dans la fibre optique doivent posséder des angles inférieurs à θ_0, défini par le cône d'acceptance autour de l'axe de la fibre. On peut déduire l'ouverture numérique ON comme le sinus de l'angle d'acceptance :

$$ON = sin\,\theta_0 = \sqrt{{n_c}^2 + {n_g}^2} \qquad \textit{(Équation 2)}$$

Les ouvertures numériques typiques varient entre 0.11 pour les fibres monomodes ($\Delta n = 4 \times 10^{-3}$) et 0.17 pour les fibres multimodes ($\Delta n = 10^{-2}$).

En effet, le trajet lumineux des rayons peut être modifié en choisissant les caractéristiques de la fibre. Avec un faible rayon du cœur, de l'ordre de 5 µm et une différence d'indice adaptée, un seul mode de propagation sera possible. Ces guides sont appelés : fibres monomodes (singlemode fiber, SMF). Lorsque le rayon de cœur et/ou la différence d'indice cœur-gaine augmente, plusieurs modes de propagation sont possibles et ces composants sont répertoriés sous la terminologie multimodes (multimode fiber, MMF).

De par sa configuration géométrique (gros cœur, tolérances élevées), la fibre multimode est bien plus facile à utiliser. Les besoins ont rapidement évolué vers des systèmes beaucoup plus performants à base de fibres monomodes (bande passante infinie en théorie) couplée à une diode laser d'injection opérant dans une gamme de longueur d'onde de 1300 à 1600 nm. Le caractère multimode ou monomode permet de définir une longueur d'onde de coupure λ_c via la relation :

$$\lambda_c = \frac{2\Pi r * ON}{V} \qquad \textit{(Équation 3)}$$

Avec ON est l'ouverture numérique ; r est le rayon du cœur et V est la fréquence de coupure $\begin{cases} V < 2.405, la\ fibre\ est\ monomode \\ V > 2.405, la\ fibre\ est\ multimode \end{cases}$

Un exemple de longueur d'onde de coupure est représenté sur la figure 5 pour la fibre SMF28 (Corning). Cette courbe représente l'atténuation, ie les pertes de puissance optique, que subit la lumière pendant sa propagation dans la fibre SMF28 en fonction de la longueur d'onde.

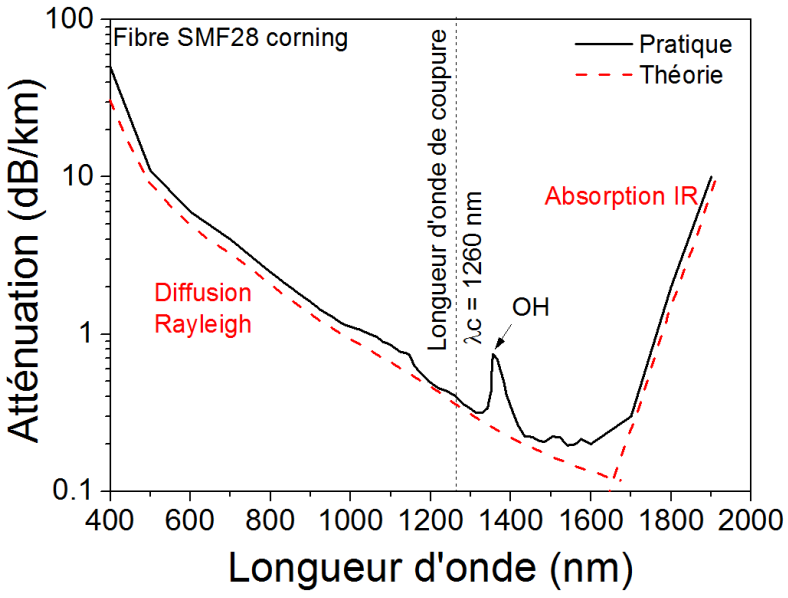


Figure 5: Atténuation spectrale d'une fibre SMF28 corning [20].

Par définition, l'atténuation d'une fibre est causée par les interactions entre la lumière et son milieu de propagation. Elle dépend du type de matériau qui compose le milieu et de la longueur L (en km) de la fibre :

$$Ps = Pe \times 10^{\frac{-\alpha L}{10}} \qquad \textit{(Équation 4)}$$

Avec Ps, la puissance optique à la sortie de la fibre ; Pe, la puissance optique à l'entrée de la fibre et α, le coefficient d'atténuation de la fibre en dB/km.

Les origines de l'atténuation sont de deux sortes : les pertes intrinsèques et extrinsèques. Les pertes intrinsèques sont dues au matériau lui-même et ne peuvent être modifiées qu'à condition de changer de composition de la matrice hôte ainsi que

les conditions d'élaboration du guide. Cela aura aussi des répercutions sur les pertes par diffusions optiques (Brillouin, Rayleigh, Raman) de même que sur l'absorption IR et UV principalement dues à la présence de défauts structuraux optiquement actifs dans le matériau. Quant aux pertes extrinsèques, elles sont liées aux environnements d'études et au mode d'utilisation de la fibre : type d'irradiation, niveaux de dose reçus, longueur d'onde d'utilisation, puissance injectée dans la fibre, température…

De manière générale, le coefficient d'atténuation comporte plusieurs contributions:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_{intrinsèques}(\lambda) + \alpha_{extrinsèques}(\lambda)$$
$$= \alpha_{diffusions}(\lambda) + \alpha_{absorptions\ IR\ et\ UV}(\lambda) + \alpha_{OH}(\lambda)$$
$$+ \alpha_{courbures}(\lambda) + \alpha_{impuretés\ et\ défauts}(\lambda)$$

(Équation 5)

Notons que nous n'avons pas mentionné les contributions de deux facteurs importants : l'hydrogène et les irradiations qui affecteront de manière significative et différentiée les domaines spectraux d'étude.

1.3.2 Instrument de mesure associé à son logiciel

Différents instruments ont été développés pour exploiter les différents phénomènes physiques (diffusions « Brillouin » ou « Rayleigh » ou « Raman ») permettant de suivre les évolutions de température (Raman) ou de température et de déformations (Rayleigh, Brillouin) [21]. Les catégories d'instruments de mesure sont alors souvent nommées, par abus de langage, par leurs phénomènes physiques associés et la nature du mesurande, c'est-à-dire par la grandeur physique mesurée (température ou déformation). Dans cette partie nous allons décrire (brièvement) les principes de mesure et les performances obtenues par les instruments commerciaux.

1.3.2.1 Rappels sur les différents types de diffusions de la lumière dans la silice

La diffusion de la lumière est liée à la présence d'inhomogénéité dans la matrice hôte du milieu de propagation, en l'occurrence de la silice pure ou dopée dans le contexte de ces travaux. Ce phénomène est exploité dans la fibre optique pour réaliser des capteurs de température et/ou de déformation, grâce aux dépendances des trois types de diffusions (Figure 6) : Brillouin, Rayleigh et Raman [29][21] à ces paramètres.

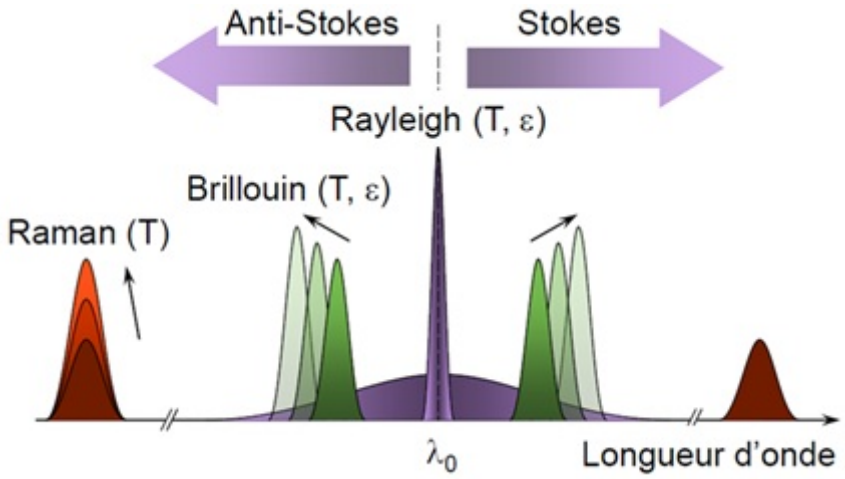


Figure 6 : Spectres de diffusion de la lumière

En diffusion spontanée, lorsque la lumière interagit avec la fibre, une partie de l'énergie du photon est échangée avec les molécules du matériau créant un décalage en fréquence angulaire ω (ω = 2Πf) entre la lumière incidente et la lumière diffusée. En conséquence, la lumière diffusée par la fibre peut contenir plusieurs composantes illustrées sur la Figure 7, selon le mécanisme de diffusion : Brillouin, Rayleigh et Raman.

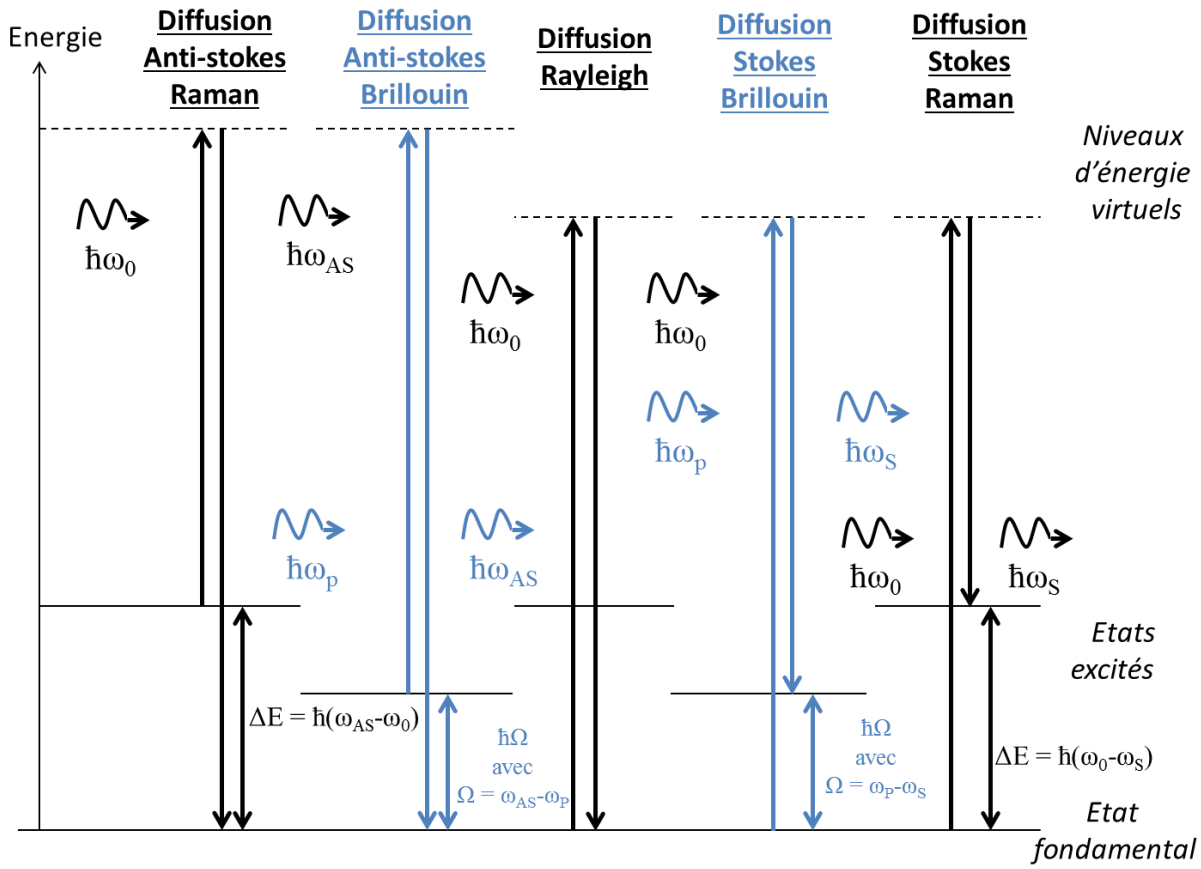


Figure 7 : Représentation schématique des mécanismes liés aux échanges d'énergie pour les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman. [14][77]

Avec

- pour les diffusions Raman et Rayleigh : $\hbar\omega_0$, l'énergie initiale des photons de la source d'excitation ; $\hbar\omega_S$, l'énergie de la composante Stokes ; $\hbar\omega_{AS}$, l'énergie de la composante Anti-Stokes.
- pour la diffusion Brillouin : Ω, l'énergie de l'onde acoustique ; $\hbar\omega_p$, l'énergie de l'onde pompe ; $\hbar\omega_S$, l'énergie de la composante Stokes ; $\hbar\omega_{AS}$, l'énergie de la composante Anti-Stokes.

1.3.2.2 Diffusion Raman

La **diffusion Raman** est liée à la vibration des molécules dans la matrice silicatée de la fibre optique dans notre cas, causée par l'agitation thermique des molécules de silice par exemple. Grâce au principe du réflectomètre [30][31], l'interrogateur déduit l'emplacement, le long de la fibre, du phénomène diffusant. Un laser pulsé injecte un signal optique dans la fibre optique. En chaque point du guide, une petite fraction de la puissance laser est transférée à de plus faibles (Stokes) ou hautes (Anti-Stokes)

fréquences et est rétrodiffusée. En raison de la faible efficacité de ce mécanisme, l'interrogateur utilise généralement des fibres multimodes, donc des puissances de sonde élevées pour faciliter la mesure. Les amplitudes des composantes Stokes et Anti-Stokes évoluent différemment en fonction de la température [32][33][34][35][36] et la connaissance du ratio d'intensité entre les deux signaux permet de déduire précisément la température. Le système RDTS évalue habituellement la température en mesurant les intensités des deux composantes Raman rétrodiffusées, Anti-Stokes (AS) et Stokes (S), détectées à une extrémité de la fibre et en calculant le rapport entre ces deux composantes pour remonter à la température en chaque point de la fibre optique. Le ratio R, des intensités AS et S est relié à la température T (en K) ; en fonction de la position z dans la fibre, grâce à la formule suivante :

$$T(z) = \frac{h\,\Delta\upsilon}{k\,ln\left[\left(\frac{\upsilon_{AS}}{\upsilon_S}\right)^4 \frac{1}{R} e^{-\int_0^z \left(\alpha_{AS}(u)-\alpha_S(u)\right)du}\right]} \qquad \textit{(Équation 6)}$$

Avec $R = \frac{I_{AS}}{I_S}$, le ratio des intensités AS et S ; α_S (respectivement α_{AS}) : les atténuations S (AS) ; k : la constante de Boltzmann ; h : la constante de Planck et Δυ = 13.2 THz pour la silice.

Le **capteur de température réparti Raman (RDTS)** fonctionne donc comme un convertisseur qui traduit les variations d'intensité de lumière diffusée en variation de température.

Le schéma de fonctionnement du RDTS est représenté sur la Figure 8. Les signaux de sortie S et AS sont séparés par 2 filtres optiques qui sélectionnent la longueur d'onde, puis sont redirigés vers 2 détecteurs [37]. Le ratio R permet d'éliminer l'influence de nombreux paramètres impactant la fonction de transfert de l'instrument (variation de la puissance du laser de pompe et sensibilité des détecteurs notamment).

Deux modes d'utilisation sont possibles selon les architectures retenues pour concevoir les capteurs Raman: « single-end » qui utilise une seule extrémité de la fibre et « double-end » qui utilise les deux extrémités. Pour corriger la dérive qu'entraîne la longueur cumulée de la fibre, il est nécessaire de prendre en compte l'impact de la différence d'atténuation aux longueurs d'onde λs et λ_{AS}, espacées de 100 nm environ (pour une pompe de longueur d'onde vers 1.5µm ou 1064 nm). L'une des méthodes de calibration utilisée est liée au mode « double-end », qui compare et corrige deux mesures contra-propagatives, obtenues à chaque extrémité de la fibre. Cette technique permet d'éliminer l'atténuation différentielle (α_S-α_{AS}), si la fibre optique subit une contrainte locale telle qu'une courbure ou si cette fibre est exposée à un environnement radiatif par exemple.

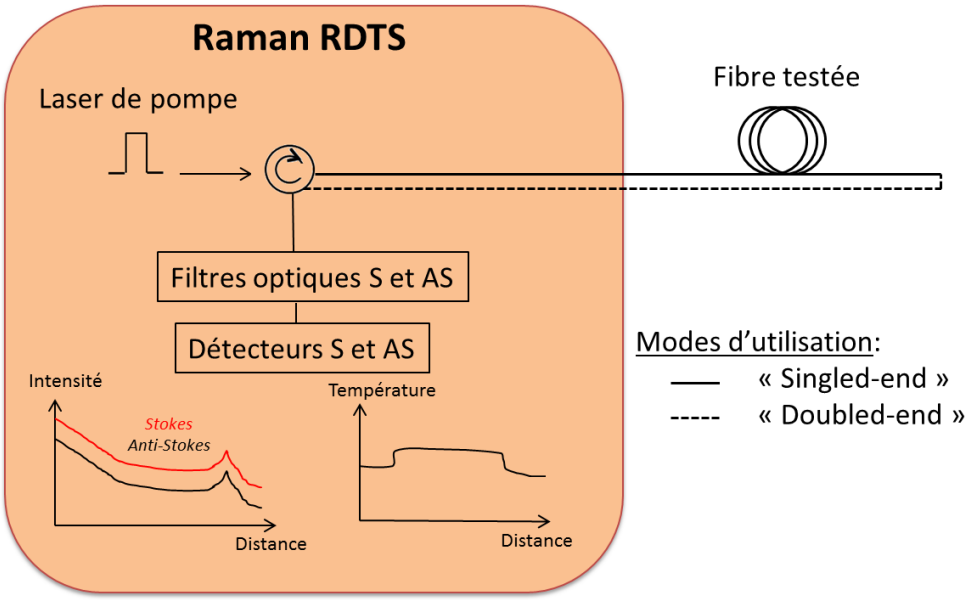


Figure 8: Schéma de principe du Raman RDTS.[77]

Au cours de la thèse nous avons utilisé des instruments Raman fonctionnant avec des fibres monomodes (fournisseur Viavi) ou multimodes (Silixa).

1.3.2.3 Diffusion Rayleigh

La **diffusion Rayleigh** est causée par les inhomogénéités de profil d'indice le long de la fibre, ou par la présence de particules dont le diamètre est bien inférieur à la longueur d'onde d'excitation. Pour les capteurs basés sur la diffusion Rayleigh, une impulsion laser est envoyée et se propage dans la fibre optique. A cause des inhomogénéités de la silice de la fibre, une partie de la lumière est rétrodiffusée en chaque point. La puissance de cette lumière rétrodiffusée est détectée à l'extrémité de la fibre connectée à un réflectomètre. Grâce au temps de vol, on remonte à la localisation des évènements le long de la fibre : le temps entre l'émission du laser de pompe et la réception du signal réfléchi permet de localiser la position de l'élément diffusant dans la fibre optique.

Lorsque l'on mesure la rétrodiffusion Rayleigh dans un état non perturbé et sur une certaine plage spectrale puis que l'on corrèle la réponse de cette signature dans un état perturbé (par la température, la déformation ou autre), un décalage spectral est détecté. Ce déplacement spectral Rayleigh dépend à la fois de la température ΔT et de la déformation ε suivant l'équation :

$$\Delta \nu_R = C_T^R \Delta T + C_\varepsilon^R \varepsilon \qquad \textit{(Équation 7)}$$

Avec C_T^R, le coefficient Rayleigh de sensibilité en température de la fibre sélectionnée ;

$C\varepsilon^R$, le coefficient Rayleigh de sensibilité en déformation de cette même fibre optique.

Ces coefficients sont donc aussi fonction du type de fibre utilisée et de son historique. Les valeurs de ces coefficients pour la fibre de référence SMF28 de Corning sont présentées dans le Tableau 2. Pour un effort de cohérence bibliographique, l'ancienne unité est également présente dans ce tableau : en effet, l'équation de la récente technologie est divisée par la fréquence moyenne υ par rapport à l'équation de l'ancienne technologie.

Tableau 2: Exemple des coefficients Rayleigh de sensibilité en température et en déformation pour une fibre optique standard SMF28.

	Récente technologie	Ancienne technologie
Coefficient de sensibilité en température C_T^R	1.5 GHz/°C	7.75×10^{-6} °C^{-1}
Coefficient de sensibilité en déformation C_ε^R	0.15 GHz/με	0.78 με^{-1}

Pour les instruments de mesure Rayleigh, il est impossible d'avoir un résultat de mesure à partir d'une acquisition unique. Il est absolument nécessaire d'effectuer deux mesures (une référence et une mesure à étudier), puis d'effectuer une corrélation croisée entre ces deux mesures. Deux principales techniques Rayleigh associées à leurs instruments existent : Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) développée en 1976 [38] qui travaille dans le domaine fréquentiel et Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry (TW-COTDR) qui travaille dans le domaine temporel.

Le schéma de fonctionnement du TW-COTDR est représenté sur la Figure 9. Il est constitué d'un laser pulsé, d'un détecteur et d'un analyseur de spectre.

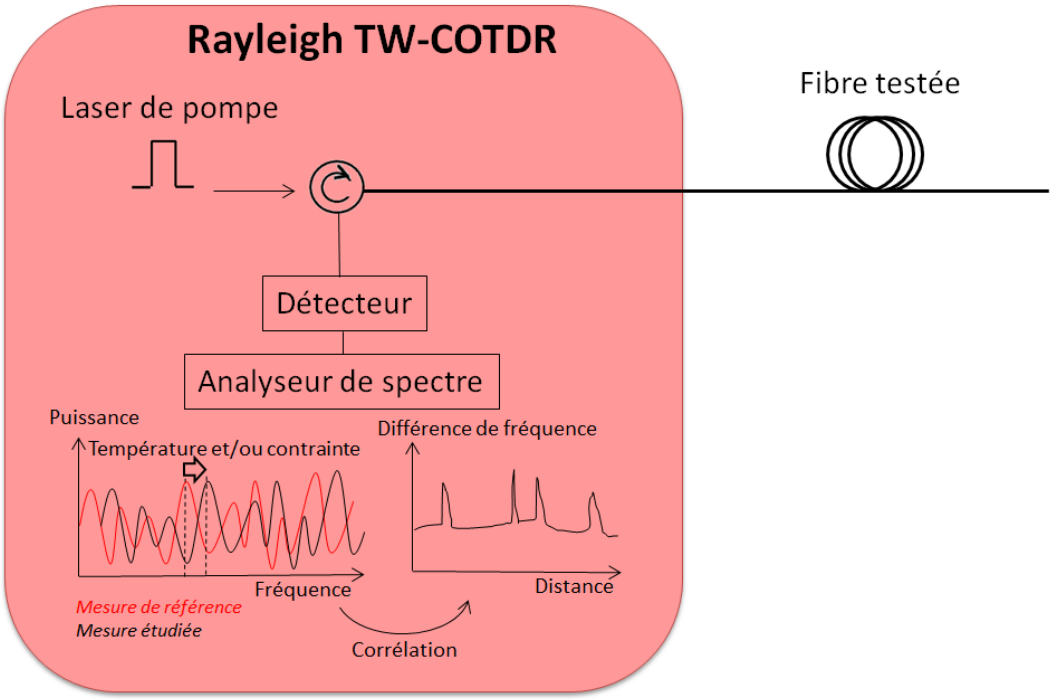


Figure 9 : Schéma du Rayleigh TW-COTDR.

1.3.2.4 Diffusion Brillouin

La **diffusion Brillouin** est causée par l'interaction de la lumière incidente avec les ondes acoustiques (ou photons acoustiques) qui se propagent dans la fibre. Ce mécanisme génère un spectre rétrodiffusé constitué de 2 composantes : Stokes et anti-Stokes.

Les fréquences associées aux raies Brillouin ν_B dépendent de l'indice de réfraction (n) de la fibre, de la vitesse de propagation (V_a) des ondes acoustiques (et donc de la densité ρ du matériau) et de la longueur d'onde λ_0 de la lumière incidente [39]:

$$\nu_B = \frac{2n\,V_a}{\lambda_0} \qquad \textit{(Équation 8)}$$

$$V_a = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \qquad \textit{(Équation 9)}$$

Avec k, le module d'élasticité

La fréquence Brillouin se décale lorsque le milieu subit une variation de température ΔT et/ou de déformation ε suivant la relation [40] :

$$\Delta\nu_B = C_T^B \Delta T + C_\varepsilon^B \varepsilon \qquad \textit{(Équation 10)}$$

Avec C_T^B, le coefficient Brillouin de sensibilité en température de la fibre optique utilisée en tant qu'élément sensible ;

C_ε^B, le coefficient Brillouin de sensibilité en déformation de cette même fibre optique.

Tout comme noté précédemment, ces coefficients sont donc fonction du type de fibre utilisée et de son historique (irradiation, chargement en gaz…). Les valeurs de ces coefficients, pour une fibre de référence telle que la fibre SMF28 de Corning, sont présentées dans le Tableau 3 suivant.

Tableau 3: Caractéristiques typiques d'une fibre optique standard SMF28 [12]

Longueur d'onde λ_0 d'excitation ou de pompe	1550 nm
Vitesse acoustique Va	5900 m/s
Indice de réfraction n	1,468
Fréquence centrale Brillouin ν_B	10,8 GHz
Coefficient de sensibilité en température C_T	1 MHz/°C
Coefficient de sensibilité en déformations C_ε	0,05 MHz/$\mu\varepsilon$

On distingue deux types de diffusion Brillouin : la **diffusion Brillouin spontanée**, induite par l'interaction d'une onde électromagnétique avec une onde acoustique, et la **diffusion Brillouin stimulée**, induite par l'effet d'électrostriction dans la fibre optique.

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans le milieu, elle interagit avec les ondes acoustiques, qui entrainent une diffusion dans toutes les directions par effet Doppler. L'onde diffusée sera décalée en fréquence par rapport à l'onde incidente. Pour mesurer cette fréquence de décalage, on peut utiliser le principe du **Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR)**, développé pour la première fois en 1992 par NTT Communication Lab (Japon) [41]. Une impulsion lumineuse est injectée dans une seule extrémité de la fibre et le BOTDR analyse la rétrodiffusion Brillouin par la même extrémité. L'équipement balaye l'ensemble du domaine spectral permettant d'acquérir le spectre de diffusion en tout point de la fibre.

Contrairement au BOTDR qui ne nécessite l'accès qu'à une extrémité de la fibre, le **Brillouin Optical Time Domain Analyser (BOTDA)** opérant dans le domaine temporel fonctionne avec les deux extrémités de la fibre. Ce principe a été développé

par le même groupe japonais en 1990 [42]. Deux ondes sont envoyées dans la fibre optique par ses deux extrémités, il s'agit respectivement d'une onde dite de pompe (la source à impulsion joue le rôle d'amplificateur pour l'onde sonde) et d'une autre dite onde sonde (la source continue). Lorsque les deux ondes se rencontrent en un point de la fibre, elles interagissent et un transfert d'énergie a lieu de l'onde pompe vers l'onde sonde.

Pour un BOTDA classique qui envoie une simple impulsion laser de pompe, la résolution spatiale est de l'ordre du mètre. Afin d'améliorer cette résolution jusqu'à 2 cm, il est possible d'envoyer une double impulsion (une simple impulsion précédée par une pré-impulsion d'intensité plus faible). Cette méthode est utilisée dans la technologie **Pre-Pulse Pump Brillouin Optical Time Domain Analyser (PPP-BOTDA)** [23][43].

Le schéma de fonctionnement du PPP-BOTDA est représenté sur la Figure 10. Il est composé d'un détecteur et d'un analyseur de spectre.

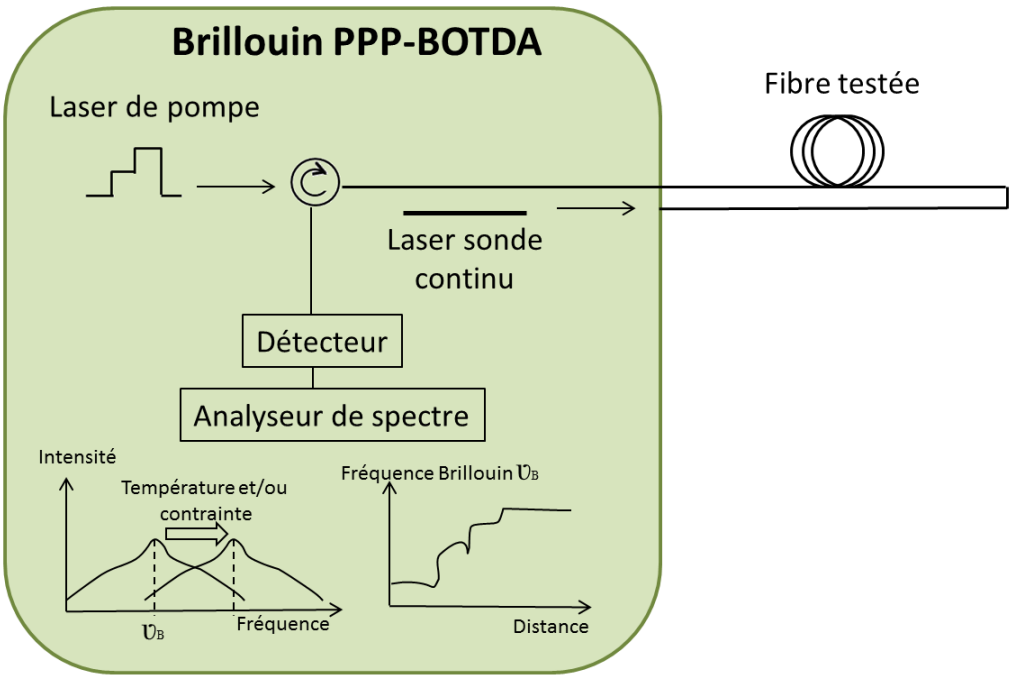


Figure 10: Schéma du Brillouin PPP-BOTDA.

1.3.2.5 Association des diffusions Brillouin et Rayleigh

La technologie Hybride Brillouin-Rayleigh (HBR) system NBX-7020 de Neubrex [23][43] **associe la mesure des diffusions Brillouin et Rayleigh sur une même fibre optique monomode**. Elle allie la grande précision spatiale du Brillouin (grâce au PPP-BOTDA) à celle de la mesure Rayleigh (grâce au TW-COTDR). Le Tableau 4 récapitule les avantages et inconvénients de chaque type d'analyse de diffusion, en mettant en valeur les avantages de leur association.

Tableau 4: Avantages induits par l'association des diffusions Brillouin et Rayleigh.

Forces apportées au Rayleigh par le Brillouin
-Compensation des distances
- Amélioration de la corrélation

	Avantages	Inconvénients
Brillouin	- Excellente valeur absolue de la mesure	- Faible résolution spatiale
Rayleigh	- Résolution spatiale élevée (précision élevée)	- Adapté aux petites portées

Forces apportées au Brillouin par le Rayleigh
-Filtration de la fréquence Brillouin par rapport au bruit de fond
- Amélioration la précision de séparation Température/Contrainte

L'instrument Neubrex fait consécutivement une mesure de diffusion Brillouin et Rayleigh. Pour une seule fibre monomode, le système fournit des mesures en variation de fréquence $\Delta\upsilon_B$ et $\Delta\upsilon_R$ (Figure 11).

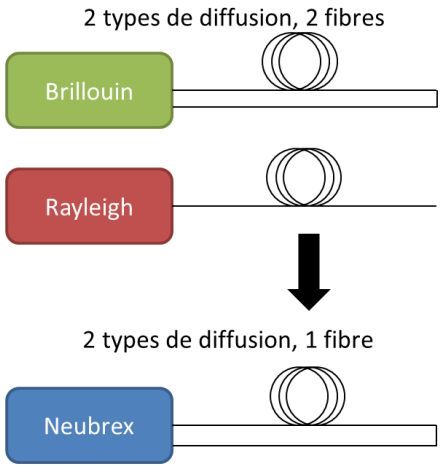


Figure 11: 1 fibre monomode pour 2 mesures Brillouin et Rayleigh consécutives.

Lorsque tous les coefficients Brillouin et Rayleigh en température et en déformation de la fibre testée sont connus (C_T^B, C_T^R, C_ε^B et C_ε^R), il ne reste que deux inconnues aux systèmes de deux équations (7 et 10) : la température ΔT et la déformation ε, d'où l'intérêt de disposer de 2 équations en seul interrogateur pour discriminer ces deux grandeurs d'intérêt (Figure 12). La bonne qualité des mesures Brillouin et Rayleigh contribue fortement à la qualité de la séparation T et ε. Les performances de cette nouvelle technique sont l'un des sujets d'étude de cette thèse.

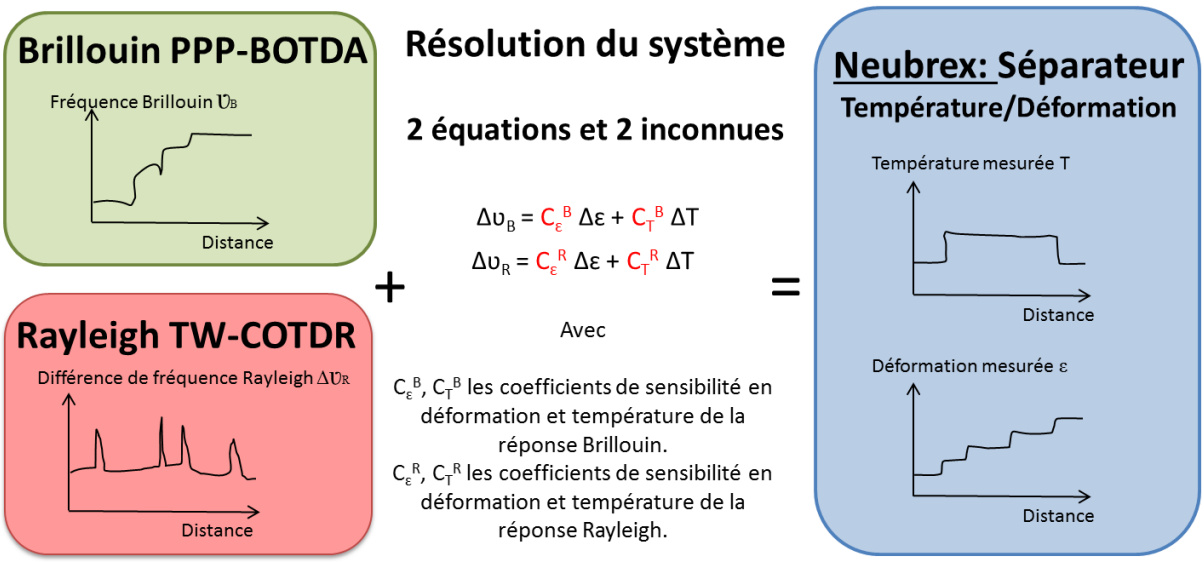


Figure 12 : Association des diffusions Brillouin et Rayleigh pour la technologie Neubrex.

1.3.2.6 Résumé des instruments disponibles

Actuellement, pour chaque méthode de mesure, il existe des systèmes commerciaux, éprouvés et robustes, de même que de nouveaux prototypes proposés par des start-up. Le Tableau 5 présente une comparaison des performances de ces instruments.

Les longueurs d'onde de travail des instruments utilisant respectivement des fibres SMF et MMF sont ~1550 nm et ~1064 nm. Toutes les mesures de cette thèse ont été menées à ces longueurs d'onde d'étude.

Tableau 5: Récapitulatif des performances d'instruments de mesure associées à leurs phénomènes physiques.

Catégories d'instruments de mesure nommés par leurs phénomènes physiques		**Brillouin**			**Rayleigh**		**Raman**		
Quantités mesurées		Température et déformation			Température et déformation		Température		
Type de fibre		SMF			SMF		MMF		SMF
Types de technologies		Référence Testée n°1	Référence	Testée n°2	Testée	Référence	Référence	Testée n°1	Testée n°2 (prototype)
Performances affichées par les fabricants	**Résolution spatiale minimale**	1 m	2 cm	1 m	1 cm	2 cm	0.25 m	0.13 m	2 m
	Distance maximale	50 km	27 km	30 km	70m sur 2 km	27 km	30 km	5 km	50 m
	Longueur d'onde	1550 nm	1550 nm	1550 nm	1550 nm	1530 ~ 1560 nm	1064 nm	1064 ~ 1550 nm	1550 ~ 1650 nm
	Incertitude en température	1°C	0.25°C	0.5°C	0.1°C	0.01°C	0.01°C	0.05°C	0.5°C
	Incertitude en déformation	60 με	5 με	10 με	1 με	0.2 με	/	/	/

Performances mesurées	**Type de calibration pour une mesure**	Réalisation d'une mesure grossière (Mesure absolue)	Aucune calibration (Mesure absolue)	Choix stratégique de la fibre de référence	Réalisation d'une mesure de référence (Mesure relative)	Réalisation d'une mesure de référence (Mesure relative)	Réalisation d'une calibration (Mesure relative)	Aucune calibration (Mesure relative)	Réalisation d'une mesure de référence (Calibration de fibres à température chaude et froide)
	Temps de mesure	De 1s à 10min selon la demande de l'application	De 1s à 30min selon la résolution choisie	1-2 min	5s à haute résolution	De 1s à 30 min selon la résolution choisie	10s	1s	1-2 min
Techniques de mesure associées		BOTDA* [22]	PPP-BOTDA* [23]	BOTDR* [24]	OFDR* [25]	TW-COTDR* [23]	RDTS* [26]	RDTS* [27]	RDTS* [28]

BOTDA = Brillouin Optical Time Domain Analyser

PPP-BOTDA = Pre-Pulse Pump Brillouin Optical Time Domain Analyser

BOTDR = Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

OFDR = Optical Frequency Domain Reflectometer

TW-COTDR = Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Analysis

RDTS = Raman Distributed Temperature Sensors

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le contexte de cette thèse, explicitant l'origine et l'intérêt de l'Andra pour les CFOs afin d'accéder à des mesures fiables et réparties de température et déformations dans des sites de stockage de déchets radioactifs. Ces applications sont associées avec un environnement opérationnel très spécifique qui peut dégrader les performances de ces CFOs et dont les principales caractéristiques ont été rappelées.

Afin de contrôler les colis de déchets HA, d'observer et de surveiller l'environnement sévère de Cigéo (milieu radiatif, à haute température et en présence d'hydrogène et de déformations des tunnels de stockage), l'Andra a choisi d'évaluer la vulnérabilité et le durcissement (résistance aux contraintes) de différentes techniques de mesure, notamment les capteurs à fibres optiques fournissant des mesures déportées et réparties, objet de ce travail de thèse.

En effet, l'utilisation des capteurs à fibre optique en milieu extrême a été éprouvée durant les dernières années, notamment dans les domaines de l'industrie pétrolière et du génie civil. Le potentiel de différents types de capteurs à fibre optique exploitant les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman pour des mesures réparties de température et/ou de déformations est avéré, l'objet de cette thèse est d'étudier leur résistance aux radiations et à la présence d'hydrogène.

Chapitre 2: Comment répondre au besoin de mesure de Cigéo ?

Afin d'identifier une technologie de capteur réparti de températures et de déformations à fibre optique résistante aux conditions sévères de Cigéo, l'étude bibliographique des performances des systèmes de mesure fondés sur les rétrodiffusions (Brillouin, Rayleigh et Raman) et de l'impact d'un environnement sévère est nécessaire. Il est bien connu qu'un tel environnement peut drastiquement modifier les propriétés optiques des fibres via la création de défauts optiquement actifs qui altèrent les réponses du système d'interrogation. Par conséquent, le choix de l'élément sensible, qu'est la fibre optique, est central pour cette étude.

2.1 Effets des radiations sur les fibres optiques

Plusieurs études [44][45][46][47][48][49][50][117] ont démontré que les propriétés optiques et structurales des fibres optiques évoluent sous irradiation.

2.1.1 Effets des radiations sur les pertes de propagation

Lorsqu'une fibre est placée dans un milieu radiatif, les modifications structurales induites par les radiations à l'échelle atomique / moléculaire ont des conséquences directes à l'échelle macroscopique via notamment une altération de ses propriétés optiques. En fait les mécanismes de base à l'origine de ces modifications structurales conditionnent les familles de fibres que nous pourrons utiliser dans cette thèse. Par la suite, je vais juste me focaliser sur certains points particuliers qui peuvent jouer un rôle important dans ce travail.

Plus concrètement, ces défauts vont être responsables du phénomène d'atténuation induite par irradiation (radiation-induced attenuation, RIA), entrainant un excès de pertes optiques et réduisant la capacité de la fibre à transmettre le signal. Pour un type de fibre donné, cet effet est plus ou moins prononcé selon le domaine spectral d'étude. Outre la RIA, certains défauts peuvent aussi être des centres luminescents. A titre d'exemple, on peut citer un défaut bien courant, le NBOHC –Non Bridging Oxygen Hole Center ou Oxygène non pontant et qui est optiquement actif dans le domaine spectral 600-650 nm. Ces défauts sont responsables du phénomène d'émission induite sous irradiation (RIE : Radiation Induced Emission). Par conséquent, et selon les applications visées, il faudra être vigilant au regard de cette RIE qui est une lumière additionnelle qui se superpose au signal utile et qui peut brouiller l'information globale transmise par la fibre optique. On comprend que l'analyse des défauts ponctuels est cruciale pour comprendre l'origine de la dégradation observée des fibres optiques sous irradiation mais aussi pour définir des solutions de durcissement (amélioration de sa réponse) pour des applications données. Les identifications de ces différents centres ainsi que leurs activités optiques nécessitent des analyses et caractérisations multiples et croisées dont les

principales sont de type spectroscopiques (absorption, luminescence, Raman, Résonance Paramagnétique Electronique RPE…). De nos jours, on dispose de plusieurs outils (microscopie confocale par exemple) capables de remonter à une cartographie de la distribution de ces centres le long d'une section traverse de la fibre optique. Cependant, après l'irradiation, certains défauts non stables à température ambiante se recombinent et l'on observe une guérison de la fibre optique qui voit sa RIA diminuer. La stabilité des centres générés par les irradiations conditionne la vitesse de récupération des capacités de transmission (ou l'absence de récupération) des fibres optiques. Un autre point intéressant à relever est que ces défauts ponctuels réagissent différemment aux éventuels traitements thermiques que l'on fait subir à la fibre optique. En d'autres termes, selon le type de fibre utilisée, les traitements thermiques peuvent neutraliser certains défauts et permettre à la fibre de retrouver des fonctionnalités opérationnelles cela pourrait être interprété comme « une guérison thermique ».

On voit clairement que les mécanismes de générations (et transformations) des défauts (types et concentrations) gouvernent la réponse de la fibre sous irradiation, notamment les niveaux et cinétiques de RIA [44][51] . Ces différentes phases de la vie d'une fibre irradiée sont résumées sur la Figure 13.

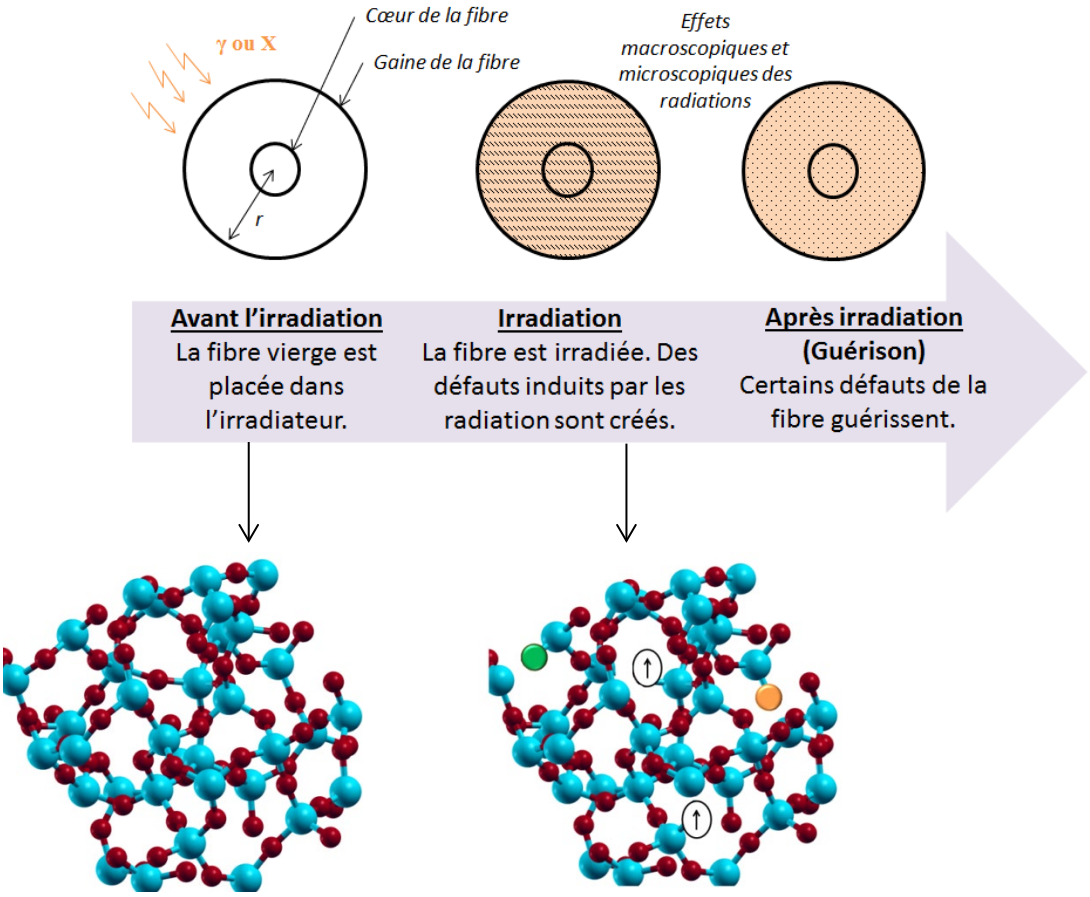


Figure 13: A titre d'exemple : Les différentes phases d'irradiation d'une fibre et les structures moléculaires associées de la silice (en bleu, les atomes de Si - en rouge, les atomes d'O - en vert, l'atome d'H - en orange, l'atome de Cl et les flèches noires, les électrons non appariés). [44][129][130]

La RIA, exprimée en dB/km, d'une fibre optique peut être calculée pour une longueur d'onde donnée et à temps donné à partir de la relation suivante :

$$RIA\ (t,\lambda) = -\frac{10}{L} * log\left(\frac{P(t,\lambda)}{P(0,\lambda)}\right) \qquad \textit{(Équation 11)}$$

Avec L, la longueur de l'échantillon (km); P(t,λ), la puissance transmise par la FO au temps t et à la longueur d'onde λ et P(0,λ), la puissance transmise par la même FO avant irradiation et à la même longueur d'onde λ.

Comme signalé plus haut pour la génération des défauts sous irradiation, la RIA va avoir un effet crucial sur les performances d'un capteur à fibre optique en limitant la longueur de la fibre utilisable (c'est-à-dire la portée de mesure du capteur) ou en induisant des erreurs sur les mesures de températures ou de déformations à travers de nouveaux mécanismes dépendant de l'architecture du capteur.

La RIA dépend de plusieurs paramètres comme le type de fibre (composition : type de dopants et leurs concentrations/distributions), le type d'irradiation (X, gamma, neutrons, électrons…), débit de dose, la dose totale reçue, la température, la puissance lumineuse injectée et le domaine spectral d'utilisation. Dans sa thèse, X. Phéron [12] a suivi l'évolution des pertes linéiques induites de façon permanente par une irradiation dans trois types de fibres spécifiques :

- La CMS : il s'agit d'une fibre optique fortement dopée Ge dans le cœur et qui est utilisée pour la photo-inscription de réseaux de Bragg à modes décalés ;
- La fibre SMF28 (qui est bien utile car elle peut servir de référence/standard),
- Une fibre optique à cœur de silice et à gaine légèrement dopée Fluor (F).

Ces analyses ont été conduites avec un OTDR [12] et les résultats sont illustrés sur la Figure 14 à 1550nm. Ces mesures ont été réalisées ex-situ plusieurs jours après l'irradiation (gamma 10 MGy, 25 kGy/h) des échantillons de fibres aux différentes doses. Ces évolutions mettent en exergue les pertes induites par des défauts stables à température ambiante [12] .

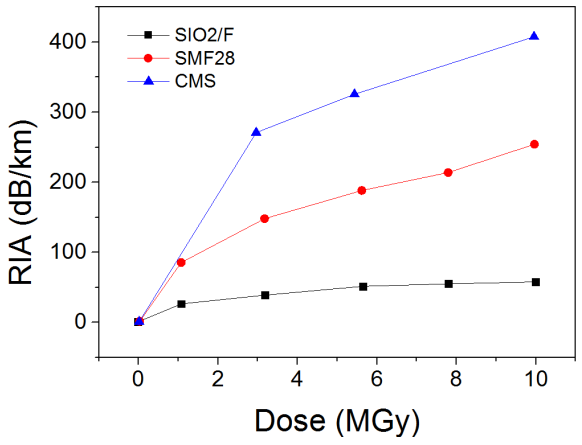


Figure 14: Evolution des pertes linéiques induites par les radiations gamma à 1550 nm en fonction de la dose déposée pour les fibres SMF28, dopée Ge CMS et dopée F SiO_2/F.

La caractéristique principale de cette étude concerne la composition de la fibre qui influence au premier ordre l'amplitude et les cinétiques de la RIA. On constate que l'atténuation induite (à 1550 nm) est bien plus importante lorsque la concentration en Ge est élevée. Par contre, si les pertes évoluent en suivant une loi de puissance pour les fibres dopées Ge, on relève un phénomène de saturation pour la fibre SiO_2/F qui affiche un niveau de pertes bien plus réduit pour des doses cumulées au-delà de 3 MGy. De cette étude, il ressort clairement que la fibre dopée F est résistante aux radiations, que ce type de dopant est prometteur pour l'application Cigéo.

Par ailleurs, la dépendance de la RIA à différents débits de dose a été rapportée dans plusieurs cas [50][77]. Ces travaux permettent de dimensionner les essais pour l'application Cigéo. A titre d'exemple, les mesures de RIA, sur la fibre SMF28 ont été réalisées en utilisant la technique « cut-back » qui repose sur des mesures de transmissions d'une fibre à deux longueurs différentes de cette même fibre. Expérimentalement, une des extrémités de la fibre sous test est connectée à une source de lumière tandis que l'autre extrémité est connectée à un détecteur (ou à un analyseur de spectres). La Figure 15 montre la réponse de cette RIA (à 1550 nm) à différents débits de dose (0.1, 2 et 12 kGy/h) et une dose totale cumulée de 45 kGy. L'analyse de ces spectres montre que l'évolution de la RIA est régie par une loi de type :

$$\alpha(D) = CD^f \quad et \quad C = A(dD/dt)^b \qquad (Équation\ 12)$$

Avec D, la dose totale ; dD/dt, le débit de dose ; C et f < 1, des constantes empiriques ; A et b, des constantes dépendant de la longueur d'onde et du type de fibre.

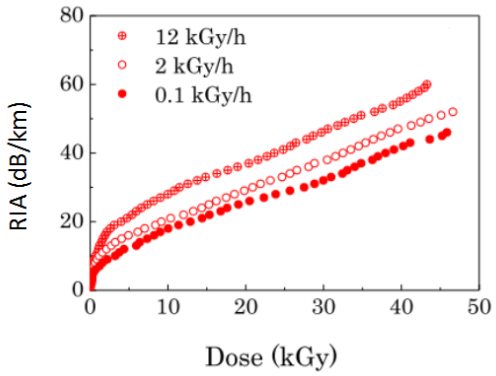


Figure 15: Evolution de la RIA mesurée à 1550 nm sur la fibre SMF28 en fonction de la dose pour différents débits de dose (0.1, 2 et 12 kGy/h) [77]

Sur la Figure 15, on constate que la RIA augmente avec le débit de dose, ce qui met en exergue la cinétique de formation/transformation des défauts induits en cours d'irradiation. Cette information est à prendre en compte lors du dimensionnement de nos essais afin d'atteindre un débit de dose représentatif ou une dose représentative de l'application Cigéo.

La Figure 16 présente l'évolution spectrale de la RIA pour deux fibres – l'une dopée Ge et l'autre avec un cœur en pure silice (Pure Silica Core Fiber - PSCF), après une dose d'irradiation gamma de 100 Gy.

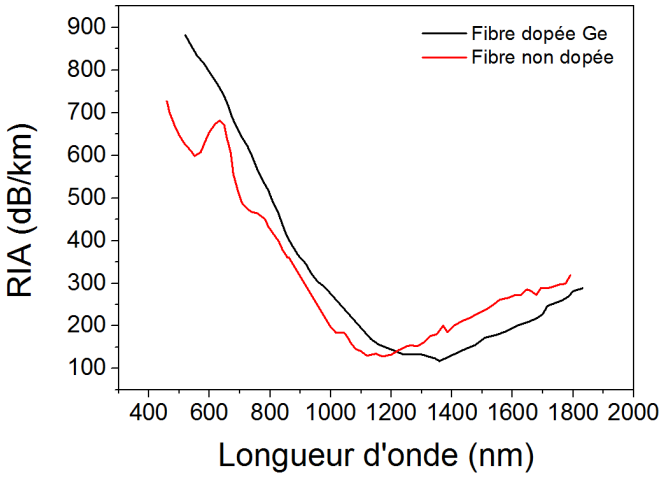


Figure 16: Spectre RIA en fonction de la longueur d'onde [52].

2.1.2 Effets des radiations sur l'indice de réfraction

Un second effet possible des radiations est appelé compaction. Il correspond à un changement d'indice Δn de la silice, appelé aussi RIRIC (Radiation Induced Refractive Index Change). La variation de l'indice peut atteindre 10^{-3} dans certaines fibres monomodes irradiées γ [37].

On ne se préoccupera pas de cet effet dans les essais de cette thèse, car ces effets sont mineurs pour les applications visées par l'ANDRA.

2.1.3 Impact des radiations sur la rétrodiffusion Raman

Les travaux de thèse de Jensen [35][82] et de Chiara Cangialosi [14] mettent en exergue l'altération des mesures de températures réalisées par le capteur Raman au cours d'irradiations γ pour des fibres dopées Ge et F.

Des études précédentes sur la vulnérabilité de l'interrogateur Raman (de marque Sensornet) [14][35][81][82], montrent que :

- La RIA et l'absorption relative induite par les radiations (ΔRIA) impactent la réponse de l'instrument Raman notamment dans le domaine IR de fonctionnement de l'appareil. L'évolution de la RIA au cours du temps aux longueurs d'ondes caractéristiques et d'intérêts (Stokes et Anti-Stokes à 886 nm et 824 nm respectivement) est donnée en exemple sur la Figure 17. Cette expérience a été menée sur une fibre non dopée et irradiée avec une source ^{60}Co (débit de dose ~1.9 kGy/h) et à deux différentes températures de 20°C et 300°C [35][82] .

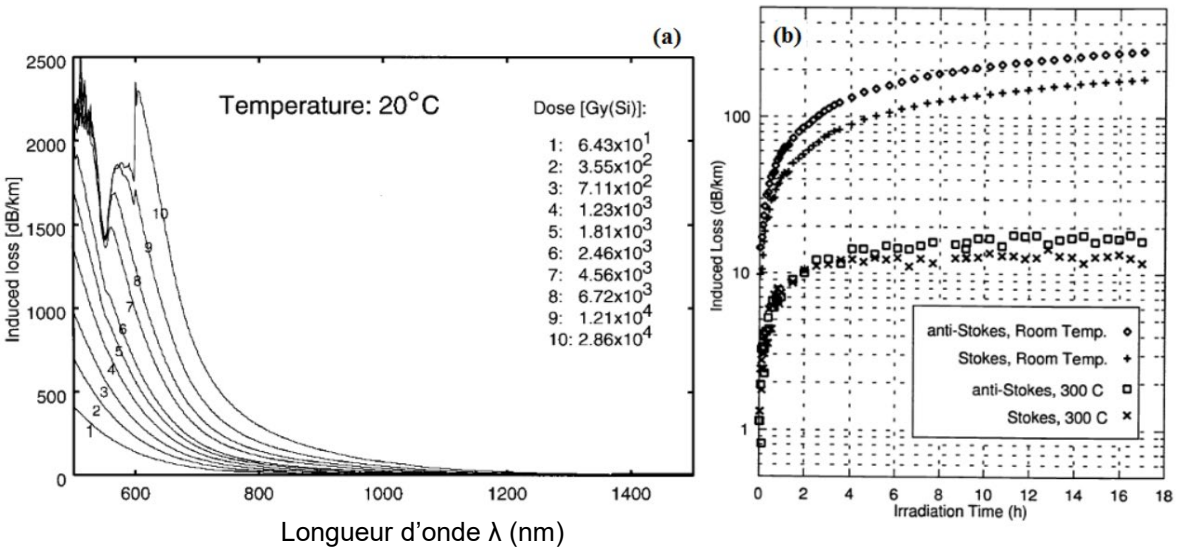


Figure 17 : (a) Evolution de l'atténuation spectrale induite dans une fibre PSC (avec un revêtement polyimide) lors d'une irradiation gamma (débit de dose : 1.9 kGy/h à ~20°C), (b) Evolutions des pertes induites aux longueurs d'ondes caractéristiques (Stokes et anti-Stokes) en fonction du temps d'irradiation γ (débit de dose de 1.9 kGy/h) et pour deux températures de 20°C et 300°C (λ_S = 886 nm et λ_{AS}=824 nm) [82].

Sur la Figure 17, on constate que la RIA augmente avec la dose (et le débit de dose) ce qui a pour conséquence directe d'affecter la longueur utilisable pour le capteur qu'est la fibre optique. Comme attendu, cette atténuation induite par l'irradiation est élevée dans le domaine du visible. La partie la plus utile pour nous est le suivi des évolutions des RIA aux longueurs d'onde Stokes et anti-Stokes reportées dans la Figure 17b. On voit clairement que :

- L'atténuation de la composante anti-Stokes est supérieure à celle de la composante Stokes, ce qui est conforme aux évolutions reportées dans la Figure 17a ;
- Le niveau de l'atténuation induite est de l'ordre de la centaine de dB/km (à température ambiante) ce qui conditionne là aussi le choix des longueurs de fibre à utiliser (dans le respect du budget optique de l'équipement) ;
- L'écart entre les deux réponses augmente avec le temps d'exposition (et donc de la dose totale cumulée) ce qui aura un impact direct sur les mesures de températures ;
- A 300°C, le niveau des atténuations induites est réduit d'un ordre de grandeur pour atteindre la dizaine de dB/km, ce qui met en évidence l'effet bénéfique d'un traitement thermique (en termes de générations/transformations de défauts et de leurs concentrations pour ce type de fibre PSC) ;
- L'écart DeltaRIA est réduit à 300°C ce qui se répercutera sur une mesure de température moins 'erronée' même à des doses cumulées de quelques dizaines de kGy.

- Ce différentiel de RIA provoque une erreur sur l'interprétation des mesures en température, qui varie linéairement avec la longueur de la fibre (jusqu'à 30°C d'erreur de mesure sur une distance de 100 m pour les fibres optiques classiques télécom) [14]. Un exemple sur une fibre dopée F en gaine (et silice pure en cœur) est présenté dans la Figure 18 suivante.

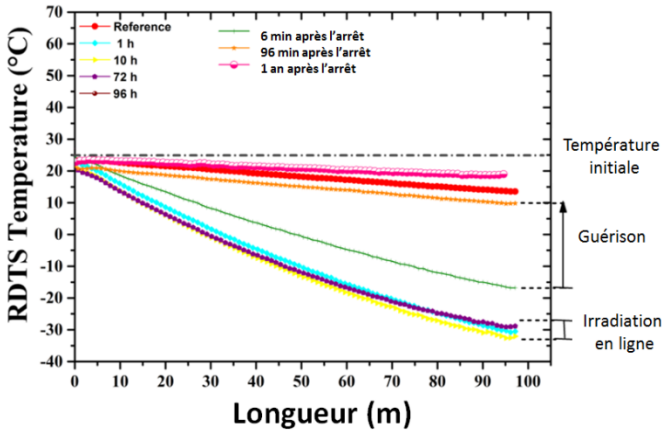


Figure 18: Evolution de la mesure de température (RDTS) le long d'une fibre dopée F en gaine et pure silice en cœur durant et après l'irradiation γ avec un débit de dose de 1 kGy/h. Une erreur de 20°C est observée à 30m, après 72h d'irradiation [14].

De ces études on peut conclure que l'erreur de température augmente avec la dose et la longueur de fibre utilisée.

On peut signaler qu'une pré-irradiation (débit de dose : 1 kGy/h, dose : 160kGy) des fibres dopées F et P avec un revêtement carbone permet de réduire l'amplitude de cette erreur tout en la maintenant constante sur une certaine longueur (≤ 2°C sur une longueur de 100 m) pendant une irradiation γ ayant un débit de dose de 1 kGy/h [14].

2.1.4 Impact des radiations sur la rétrodiffusion Rayleigh

Les travaux de thèse d'A. Faustov [72] portèrent sur la réalisation d'un dosimètre et reposent donc sur l'utilisation de fibres optiques sensibles, dopées Al par exemple. Tandis que S. Rizzolo [77] a évalué des mesures de température via la rétrodiffusion Rayleigh OFDR au cours d'une irradiation γ. Par conséquent, les fibres utilisées devaient être durcies ou résistantes, dopées Ge et F.

Dans ces deux précédentes études, les expériences OFDR (à 1550 nm) ont été conduites avec un instrument de la marque Luna Technology tant sur des mesures en ligne qu'en post-mortem. Les résultats utiles pour la suite de notre travail peuvent se résumer en :

- Pour une irradiation d'une fibre dopée Al (jusqu'à une dose de 50 kGy), les mesures expérimentales et leurs simulations ont été comparées. La trace Rayleigh (Amplitude du signal en fonction de la longueur de la fibre) diminue le long de la fibre, jusqu'à passer en dessous du niveau de bruit de référence (avec une différence de -10 dB/mm) [72].

- Après une dose cumulée de 10 MGy, l'instrument Rayleigh est principalement affecté par la RIA, qui limite la gamme de sensibilité de l'instrument en dégradant le rapport signal/bruit. Cependant, les fibres dopées F restent prometteuses avec une RIA de 55 dB/km à 1550nm [75].

- La température mesurée par l'instrument Rayleigh OFDR (sur des échantillons de 10 m de longueur de fibres PSC et dopée F) et les coefficients de déformation restent stables et constants après des irradiations allant jusqu'à 10 MGy de dose accumulée [74].

- Les performances du capteur OFDR de température sont presque inchangées pendant l'irradiation (< 1 MGy de dose déposée totale), lorsqu'une longueur de 2 cm est exposée aux rayons X [77].

- Un pré-traitement thermique, jusqu'à la température maximale opérationnelle du revêtement, est obligatoire pour stabiliser la réponse de la fibre et augmenter l'incertitude des mesures en passant de 5°C à 0.5°C en présence de radiation (dose allant jusqu'à 1 MGy) [77].

Les conclusions de ces travaux mettent en exergue l'influence de la RIA qui limite la gamme de sensibilité de l'instrument en dégradant le rapport signal/bruit. De plus, sur une petite longueur de 2 cm, les performances du capteur Rayleigh restent inchangées pour une dose d'irradiation allant jusqu'à 10 MGy.

2.1.5 Impact des radiations sur la rétrodiffusion Brillouin

X. Pheron [12] a conduit une étude qui a permis de comprendre l'évolution des performances d'un capteur à fibre associée à l'instrument OZ (Brillouin BOTDA, λ = 1500 nm) en cours d'une irradiation γ et tout particulièrement sur la fibre d'intérêt dopée F. Les doses et débits de dose utilisés couvrent les besoins de l'application Cigeo. Les 10 MGy de dose cumulée, sur 100 ans dans les alvéoles HA, ont été atteints avec des débits de dose élevés (d'environ une vingtaine de kGy/h).

Ces campagnes d'irradiation ont validé le fonctionnement de la chaine de mesure. En effet, ce système a permis d'évaluer les performances des différentes fibres optiques sous test (une fibre de référence SMF28, une fibre dopée Ge et une fibre dopée F) malgré des conditions expérimentales sévères (mesure in-situ sous irradiation combinant une dose cumulée allant jusqu' à 90 kGy et une contrainte appliquée variant de 23 à 150g). A titre d'exemple, la Figure 19 montre une variation

de fréquence Brillouin de 10843 MHz à 10849 MHz pour la fibre SMF28 (~6°C ou 120 με) et de 11050 MHz à 11052 MHz (~2°C ou 40 με) pour la fibre dopée F. Ces essais ont également permis d'identifier la fibre dopée F comme bonne candidate en vue du projet Cigéo. De plus, malgré la création de défauts ponctuels, aucun effet de radiations sur la sensibilité à la température et à la déformation n'a été établi (aucune modification des coefficients C_T^B et C_ε^B).

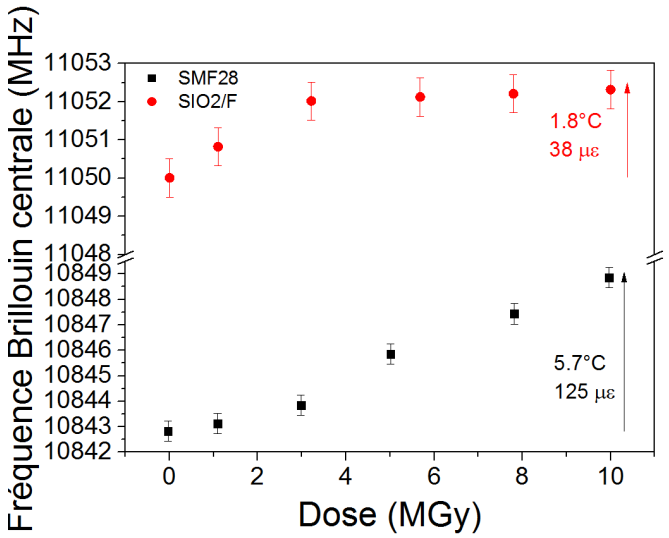


Figure 19: Evolution de la fréquence Brillouin en fonction de la dose pour les fibres SMF28 et SiO_2/F (irradiation γ, débit de dose de 1 kGy/h). [83]

2.2 Effets couplés des radiations et de la température

Les études présentées ci-avant considèrent l'impact des radiations sur les propriétés de guidage des fibres optiques : les pertes, les rétrodiffusions Raman, Rayleigh, Brillouin. Plus récemment, il a été montré que les effets croisés de la température et des radiations peuvent être importants, que ces deux paramètres ne peuvent pas être étudiés indépendamment l'un de l'autre.

Pierre Lecomte [78][79] a suivi l'altération des mesures réalisées par le capteur Raman au cours d'irradiations γ à haute température (350°C), notamment sur des fibres d'intérêt dopées Ge et F.

L'étude a porté sur les performances des capteurs RDTS à haute température et sous irradiation modérée (< 1 kGy), à l'aide de l'instrument Raman de marque Silixa. Les fibres sous tests sont de type commercial à revêtements métalliques (gaine en or supportant des températures de 400°C) [79]. Le but de cette thèse était de qualifier cet instrument Raman pour des mesures de température autours de lignes d'expansion du pressuriseur (LEP) dans les centrales nucléaires. L'influence de deux paramètres sur les performances d'un RDTS bidirectionnel a été étudiée :

- Influence du revêtement métallique sur la précision de mesure

- Influence des radiations à haute température sur la mesure de température.

Les fibres ont été soumises à un débit de dose γ de 0.6 Gy/h pour une dose totale cumulée de 250 Gy. Les effets de la RIA sur la réponse RDTS sont présentés pour des mesures à température ambiante et à haute température de 350°C [14].

À température ambiante, les fibres avec un revêtement en or sont plus affectées par les radiations que les fibres avec une gaine standard polyimide. Les réponses typiques des fibres à revêtement or, après une irradiation gamma à 250 Gy, sont de : 2.65 dB/km pour la fibre dopée F et 5.7 dB/km pour la fibre dopée Ge tandis qu'on atteint 1.25 dB/km et 3.75 dB/km respectivement pour ces mêmes fibres avec un revêtement polymide. Bien que la plage de longueur d'onde d'opération du RDTS Silixa (1064 ± 50 nm) soit située dans l'IR au-delà des longueurs d'onde les plus sensibles (domaine visible), la RIA observée à une dose cumulée de 250 Gy suffit à atténuer totalement le signal Raman dans la fibre revêtue or.

À 350°C, l'amplitude de la RIA est fortement réduite (0.04 dB/km) dans les fibres avec une gaine métallique. Le traitement thermique semble donc jouer un rôle important et bénéfique pour la transmission du signal Raman à 1064 nm sous irradiation, permettant ainsi des mesures de température à des niveaux de radiations qui auraient totalement dégradé la fibre.

Les effets de la température sur une fibre préalablement irradiée (gamma, 6 MGy) ont été étudiés par Chiara Cangialosi [14]**.**

L'évolution temporelle et la répartition spatiale de la réponse en température le long d'une fibre (pure silice pour le cœur et dopée F en gaine) ont été suivies sur une longueur d'une centaine de mètres. La fibre a été maintenue dans un four à 80°C durant 7 jours. Comme attendu, Figure 20, la répartition spatiale de mesure de température (avec le DTS) augmente linéairement avec la distance et la pente correspondante évolue temporellement. Les écarts en température (par rapport à la référence du four) sont de 28 °C pour le premier jour de traitement et à une centaine de mètres de longueur d'interrogation et cette valeur diminue pour atteindre ~15°C pour le 7^{ieme} jour.

A 80°C, la pente temporelle de ces courbes est de l'ordre du ~ 6°C/min.

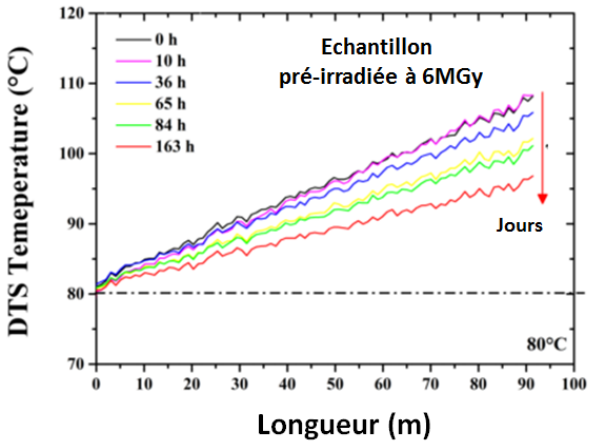


Figure 20: Réponses RDTS sur un échantillon de fibre (pure silice en cœur et dopée F en gaine) pré-irradiée (gamma) à 6 MGy et gardé à température constante de 80°C durant 7 jours. [14]

Cette étude met l'accent sur les effets combinés de la température, de l'irradiation, du type de fibre retenue comme élément sensible associé au DTS de même que sur les longueurs des fibres sous test. L'ensemble de tous ces éléments doit être pris en compte dans l'interprétation des mesures en température qui varient linéairement avec la longueur sensible de la fibre.

2.3 Effets de l'hydrogénation

Plusieurs études [44][45][46][47][48][49][50] ont démontré que les propriétés optiques et structurales des fibres optiques évoluent lors de l'incorporation d'hydrogène dans la zone de propagation du signal.

Quand une fibre est exposée à de l'hydrogène pur (H_2) dans un réacteur fermé, la diffusion de gaz dans la fibre ne fait qu'augmenter jusqu'à atteindre un état de saturation dépendant de la température et de la pression. La Figure 21 donne un exemple de vue globale de l'évolution de la concentration à saturation (mol H_2 /m^3) en fonction des paramètres pression et température [57][58][59] . Vu que l'on parle de saturation, cela signifie implicitement qu'on attend suffisamment longtemps pour l'atteindre.

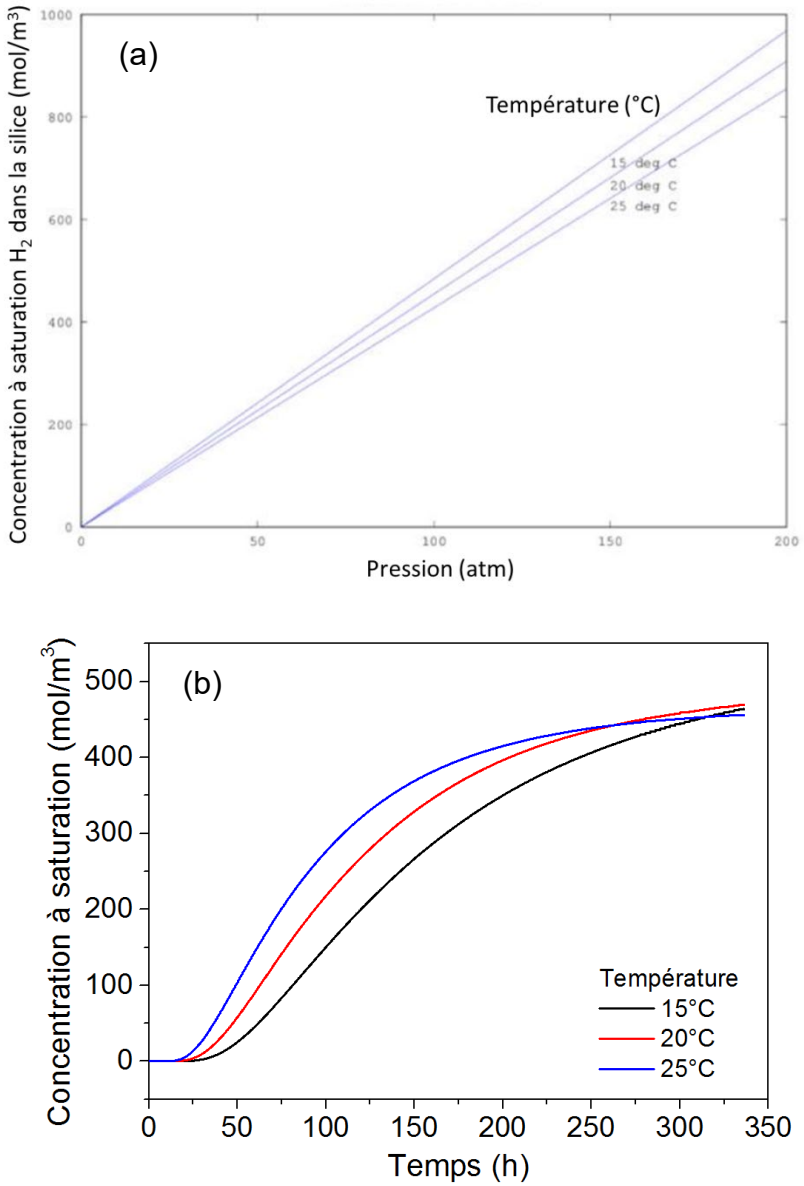


Figure 21: (a) Evolution des concentrations à saturation en fonction de la pression H_2 à différentes températures [57]. (b) Concentration à saturation H_2 en fonction du temps de désorption.

Cette concentration C pour une fibre standard monomode saturée en H_2 et placée dans l'air évolue suivant l'équation (13).

$$C(r,t) = Co \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0\,(\alpha_n \frac{r}{r0})}{\alpha_n\, J_1\,(\alpha_n)} e^{-D(\frac{\alpha_n}{r_0})^2 t} \qquad \textit{(Équation 13)}$$

$$\textit{avec} \qquad D = 2.83\,.10^{-4} exp(\frac{-40190}{R.T}) \qquad \textit{(Équation 14)}$$

Où D est le coefficient de diffusion [43][60] ; Ji, la fonction de Bessel d'ordre i ; α_n, la fonction de Bessel de niveau n ; C_0, la concentration initiale en hydrogène, R =

8.314472 J.mol^{-1}.K^{-1}, la constante de gaz parfait et T, la température absolue [61]. La concentration à saturation H_2 est élevée lorsque la température est faible et/ou lorsque la pression est élevée [58]. Les références [58][59] ont démontré que la diffusion d'hydrogène induit une variation de l'indice de réfraction Δn de la silice au cours du temps, selon l'équation suivante (15):

$$\Delta n\,(P,T,t) = \frac{(n_{H_2}^2-1)RT}{2\,P_0^2\,n_{core}}\,C \qquad \textit{(Équation 15)}$$

Nous notons n_{H2} et n_{core}, les indices de réfraction respectifs de H_2 pure et du cœur de la fibre. P_0 est la pression atmosphérique.

De plus, ce gaz présent dans une fibre augmente la concentration des différents défauts de la fibre [57][62][63][64]. Ces différentes phases du chargement en hydrogène d'une fibre sont résumées sur la Figure 22.

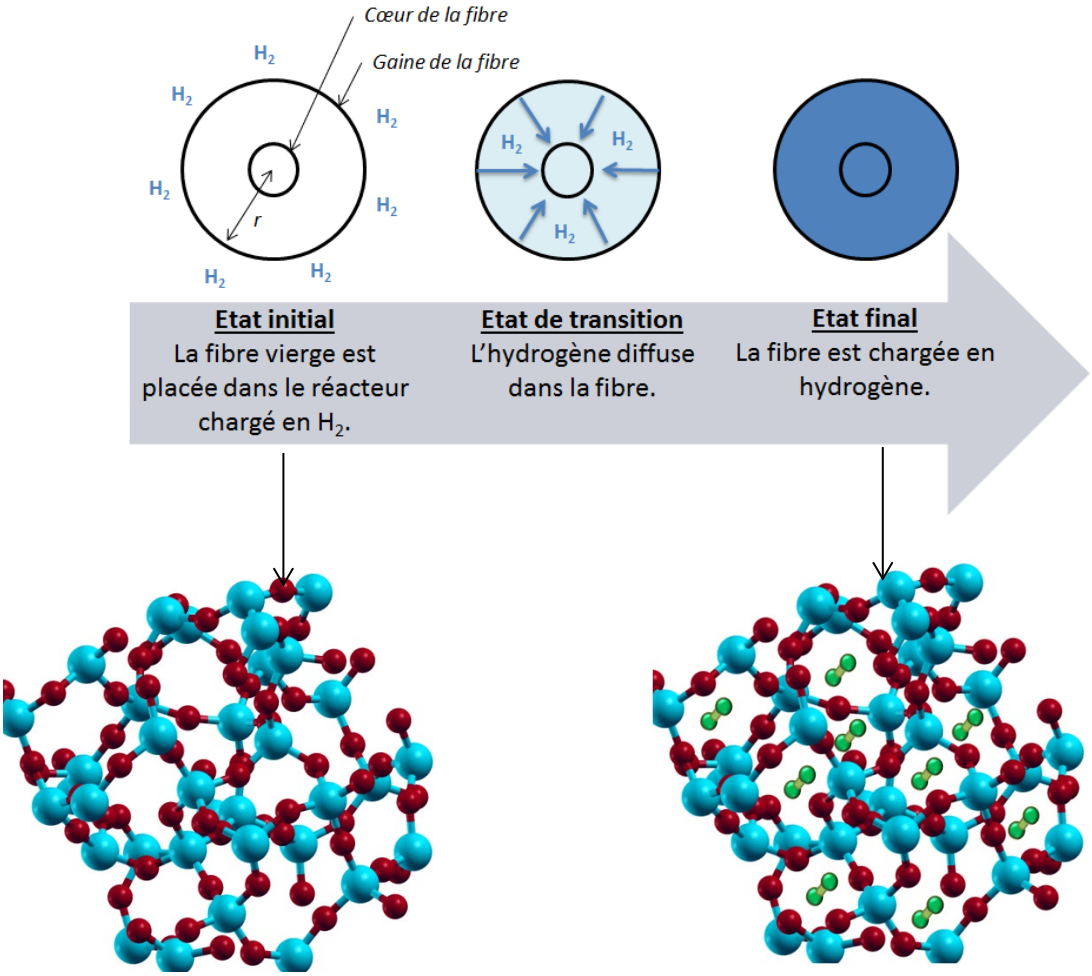


Figure 22: Les différentes phases de chargement en hydrogène d'une fibre et les représentations des structures moléculaires associées de la silice à température ambiante (en bleu, les atomes de Si – en rouge, les atomes d'O et en vert, les molécules d'H_2).[57][129][130]

Lorsque la fibre se décharge de l'hydrogène, une partie de ces défauts créés non stables disparaît et d'autres restent. Ainsi la fibre retourne à un état stable, différent de son état initial. Les pertes optiques induites par l'hydrogène sont réversibles.

2.3.1 Récents résultats sur les effets couplés des radiations et de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Raman

La coexistence simultanée de ces deux paramètres (irradiation + hydrogène) sur les réponses de capteurs à fibre optique a été étudié notamment via des mesures Raman (Thèse de Chiara Cangialosi [14][16]) pour des fibres d'intérêt dopées Ge et F.

A titre d'exemple, les distributions des mesures de températures via un DTS, tout au long d'une fibre optique, sont représentées sur la Figure 23. Dans ce cas, l'élément sensible est constitué d'une fibre en silice pure ayant subi 2 différents traitements avant une irradiation gamma à une dose cumulée de 6 MGy:

- L'hydrogénation de l'échantillon de fibre, a été suivie d'une période de désorption de deux mois (à température ambiante) avant la campagne d'irradiation ;
- L'Hydrogénation a été maintenue jusqu'au début de l'irradiation;

L'influence de la présence de l'hydrogène sur les réponses DTS pendant l'irradiation est clairement mise en évidence. L'évolution de la distribution de température le long de la fibre est similaire tant sur la fibre vierge que sur la fibre hydrogénée et irradiée : on retrouve des mesures de température ambiante tout au long des deux échantillons. Par contre les fibres non-H2 et hydrogénée deux mois avant présentent le même comportement après irradiation : signe que l'hydrogène a eu le temps de quitter la fibre sans laisser d'effet mémoire ou de modification spécifique.

Les effets croisés hydrogène-radiation sont donc à la fois extrêmement importants et complexes (Figure 23). L'historique et le séquençage des événements doivent être soigneusement conservés si la diffusion de l'hydrogène dans la fibre n'est pas stoppée grâce à un revêtement de type carbone.

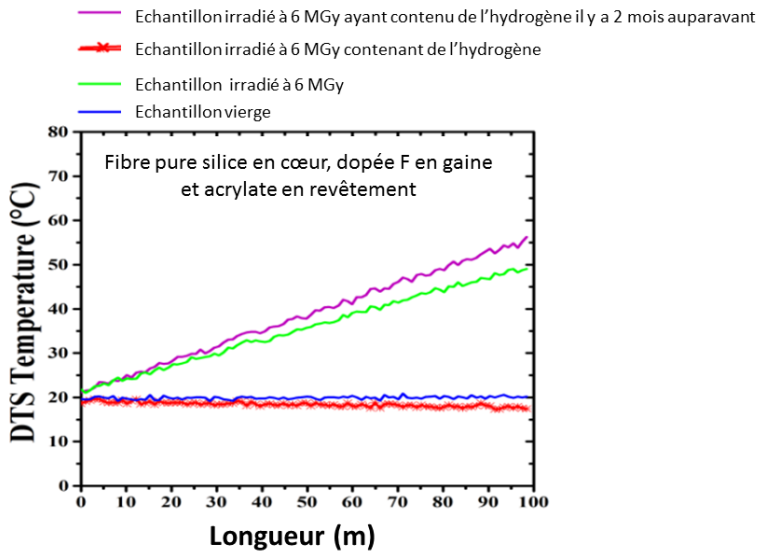


Figure 23: Evolution de la température Raman DTS mesurée à 1064 nm en fonction de la longueur de la fibre pure silice en cœur, dopée F en gaine et acrylate en revêtement. [14]

2.4 Bilan sur les influences des radiations, de l'hydrogène et de la température sur les fibres optiques

Nous avons récapitulé les principaux résultats issus d'études précédentes sur la vulnérabilité et le durcissement aux radiations des différentes technologies de capteurs répartis à fibres optiques (CFOs), notamment ceux basés sur la diffusion Brillouin [12][14] , sur la diffusion Rayleigh [72][77] et ceux basés sur la diffusion Raman [14][79] . Ces trois principaux types d'interrogateurs sont affectés par le phénomène d'atténuation induite par irradiation (RIA) qui va limiter la portée de la mesure. En fait, la diffusion Rayleigh ne semble pas affectée par des radiations gamma à des doses du MGy tandis que les capteurs basés sur la diffusion Raman et Brillouin sont directement affectés par les radiations : à travers un décalage de la fréquence Brillouin et à travers une RIA différente aux longueurs d'onde Stokes et Anti-Stokes. Ces deux mécanismes entraînent une erreur de mesure pour la mesure de température ou de déformation, en sus de la diminution de la distance de mesure.

Ce retour d'expérience nous a permis de cerner les enjeux et les moyens matériels nécessaires pour mener le sujet de thèse. Nous allons les présenter dans la suite.

2.5 Solutions techniques disponibles pour simuler les conditions de Cigéo

Afin de simuler les conditions extrêmes du milieu d'étude Cigéo, différentes solutions techniques associées à chaque besoin ont été choisies ou développées dans la thèse.

2.5.1 Méthodes et installations d'irradiations

Les déchets radioactifs produisent des rayonnements γ, qui ont une longueur d'onde très courte (< 5 pm) et sont très énergétiques (> 0.25 MeV). Ils sont très pénétrants et peu ionisants : plusieurs centimètres de plomb ou plusieurs décimètres de béton sont nécessaires pour les arrêter.

Les essais sous rayonnements photoniques γ peuvent parfois être remplacés par ceux sous rayonnements X. La distinction entre ces deux rayonnements γ et X vient de leur mode de production : Les rayons γ sont d'origine nucléaire (activité des noyaux des atomes), tandis que les rayons X sont des photons produits par des transitions entre niveaux électroniques provoquées en général par la collision d'un atome avec un électron à haute vitesse.

Les rayonnements X sont moins énergétiques (de quelques centaines d'eV à plusieurs centaines de keV) que les rayonnements γ. Ils sont donc moins pénétrants : seules de fortes épaisseurs de plomb ou de béton sont nécessaires pour les arrêter. Leur plage de longueurs d'onde est de quelques pm à quelques nm.

La diversité des environnements applicatifs impose des choix drastiques sur la spécification et sur le choix de la fibre optique d'intérêt. Ainsi, une fibre optique adéquate pour une application en environnement spécifique peut ne pas l'être pour un autre type d'environnement. En particulier, la réponse transitoire (t < 100 ms) des fibres optiques après une impulsion ionisante est beaucoup moins documentée que celle à la dose cumulée. Les effets des radiations γ et X sont du même ordre de grandeur : les cinétiques de guérison des pertes induites à 1550 nm après une impulsion X (~dizaines de ns) et une irradiation γ (de 25 minutes) dans différentes fibres optiques sont comparées dans la Figure 24. Ce résultat montre que, dans certains cas [67], les mêmes mécanismes physico-chimiques sont mis en jeu pour chaque environnement radiatif possédant des débits de dose très différents (10^{-1} Gy/s et > 10^{6} Gy/s) mais des doses et des énergies comparables (< 1 kGy ; ~ 1 MeV) [66].

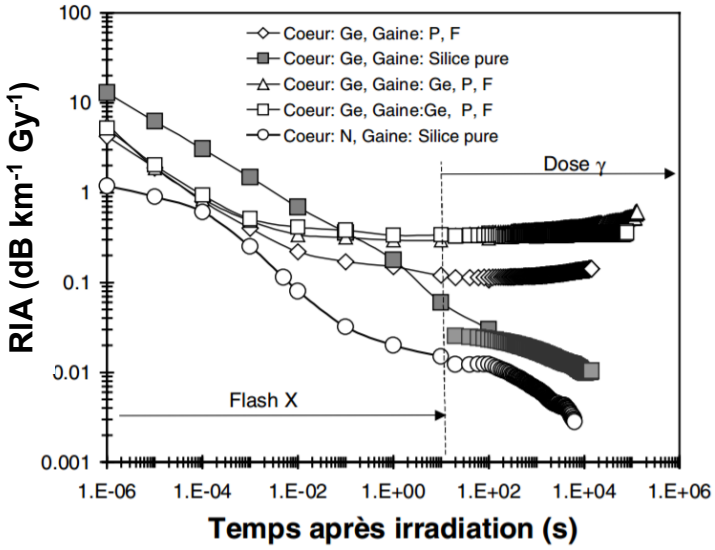


Figure 24: Cinétiques de guérison des pertes induites à 1550 nm après une impulsion X et une irradiation γ dans différentes fibres optiques.[67]

Généralement, les radiations sont caractérisées par la dose finale atteinte (cumulée) en Gy et le débit de dose en Gy/s. Ces derniers sont variables selon l'environnement investigué par la fibre optique sensible du capteur [68].

La dose totale et le débit de dose sont connus pour influencer fortement l'amplitude et les cinétiques des effets liés aux formations/transformations des défauts ponctuels [44]. Pour simuler les radiations produites par les déchets radioactifs, trois solutions techniques ont été utilisées selon le débit de dose représentatif et la dose visée à la face externe du chemisage des déchets HA: deux campagnes d'irradiation IRMA et MOPERIX sont représentatives de l'application visée en termes de débit de dose tandis que la campagne d'irradiation MOL permet d'atteindre des niveaux de dose représentatifs de ceux attendus à Cigéo. Ces différentes campagnes de tests sont présentées dans les parties suivantes.

2.5.1.1 Montages expérimentaux 'IRMA'

Les essais d'irradiation γ à débit de dose représentatif ont été réalisés auprès de la source ^{60}Co IRMA de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, de Saclay, France). Cette cellule d'irradiation est composée de 4 sources scellées de crayons de ^{60}Co [69]. Il est possible d'ajuster le débit de dose en adaptant la position des fibres par rapport aux sources. Comme entre les deux campagnes réalisées au cours de la thèse, la source a été rechargée, les débits de dose maximum accessibles ont augmenté, tout en restant de l'ordre de quelques kGy/h.

Deux campagnes d'irradiation ont été réalisées à deux débits de dose différents (Figure 25) : 370 Gy/h (à une dose de 56 kGy) et 2.6 kGy/h (à une dose de 1 MGy).

Les variations de températures durant ces deux runs d'irradiation étaient respectivement de 19 à 28°C et de 16 à 23°C.

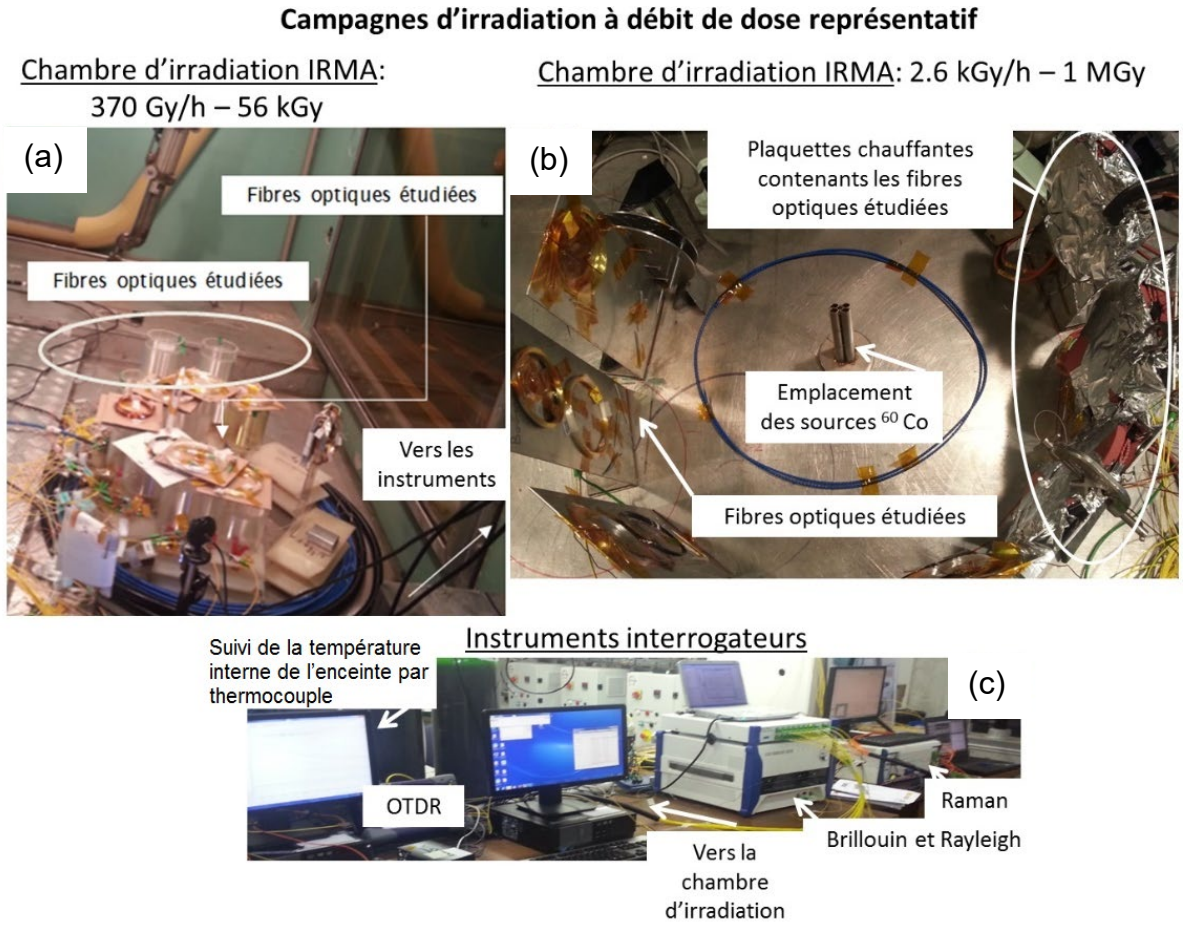


Figure 25 : Photographies du dispositif expérimental d'irradiation dénommé IRMA : les chambres d'irradiation des 2 campagnes à 370 Gy/h (a) et à 2.6 kGy/h (b), et les instruments de mesure déportés en salle de contrôle.

2.5.1.2 Montage expérimental 'MOPERIX'

Les essais d'irradiation X à débit de dose représentatif ont été réalisés grâce à l'irradiateur Moperix [93] du laboratoire Hubert Curien (cf. Figure 26). Cet équipement possède un générateur de rayon X (160 kV – 28 mA). Le débit de dose peut être ajusté en fonction de la distance des fibres par rapport au tube de rayons X. Des irradiations ont été réalisées à des débits de dose variant de 3.1 Gy/s à 4.1 Gy/s, pour atteindre une dose cumulée d'environ 1 MGy. La méthode de calcul des débits dans la silice est présentée en annexe A. Les températures au cours des essais variaient de 27 à 31°C.

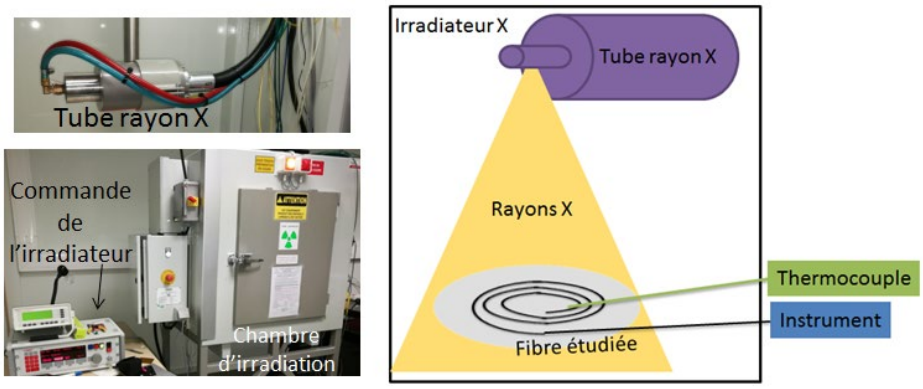


Figure 26: Photographies et schéma de l'irradiateur X (Laboratoire Hubert Curien, Saint-Etienne).[93]

2.5.1.3 Montage expérimental 'MOL'

Les essais d'irradiation γ à dose représentative ont été réalisés grâce à la source ^{60}Co de l'installation du SCK-CEN (Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire – Studie Centrum voor Kernenergie de Mol, Belgique) [60]. Une vue de la source d'irradiation BRIGITTE (Big Radius Installation under Gamma Irradiation for Tailoring and Testing Experiments) est représentée sur la Figure 27. La dose reçue dépend de la hauteur des fibres par rapport à la source, comme présenté sur la Figure 28. Une campagne d'irradiation a été réalisée pour atteindre les doses de 1 MGy, 3 MGy, 6 MGy et 10 MGy (à des débits de dose respectifs de 1.46 kGy/h, 4.25 kGy/h, 8.90 kGy/h et 14.95 kGy/h). La température variait de 30 à 55°C durant l'irradiation.

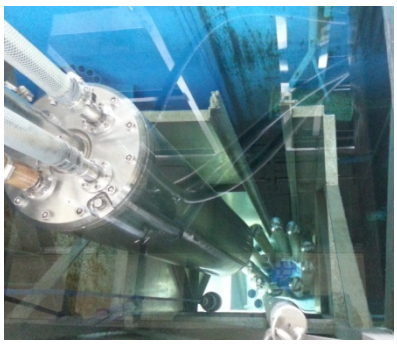


Figure 27: Photographie de cellule BRIGITTE, BR2, MOL (SCK-CEN).

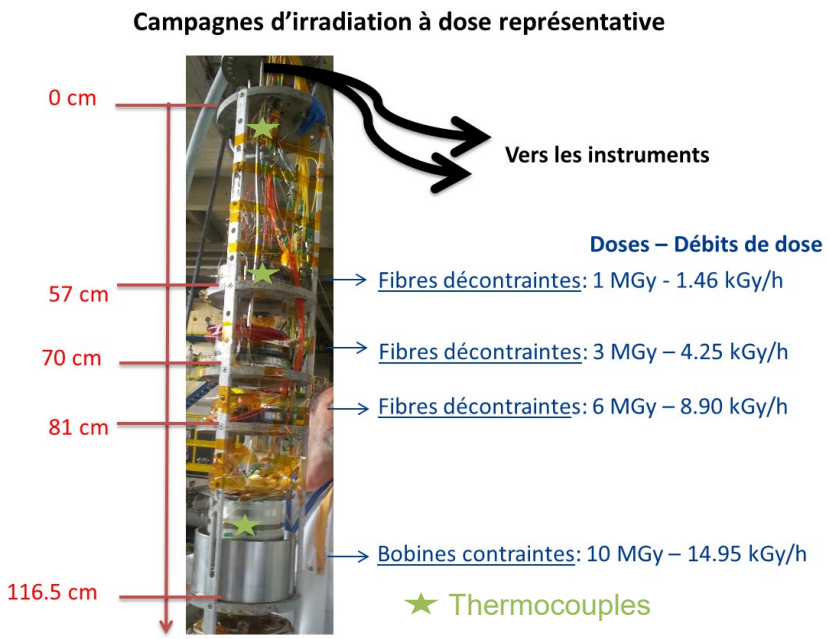


Figure 28: Dispositifs d'irradiation des différents échantillons de fibres optiques lors de la campagne MOL.

2.5.2 Méthodes et matériels de mesure de RIA

Pour mesurer la RIA, trois techniques ont été utilisées : (i) un OTDR à 1550 nm, (ii) la technique de « cut-back » pour les mesures post-mortem mais dans ce cas on mesure directement l'atténuation globale de la fibre et pas seulement sa partie induite par irradiation (sauf si l'atténuation de la fibre vierge est connue), (iii) En ligne via des acquisitions spectrales de transmission de la fibre pendant les trois phases : avant – pendant et après le run d'irradiation. Dans ce dernier cas, le domaine d'étude est déterminé par les sources lumineuses utilisées et les systèmes d'analyses et de caractérisations.

La technique OTDR a été développée en 1976 par Barnosky et Jensen [38]. Elle évalue les pertes causées par les connecteurs, les soudures et les autres évènements détectés. Son principe est d'envoyer une impulsion laser de pompe dans la fibre à tester (FUT, fiber under test) pour mesurer le temps de propagation de l'impulsion (diffusion Rayleigh) : le temps entre l'émission de l'impulsion et la réception du signal réfléchi donne la position dans la fibre, en supposant que l'indice de réfraction de la fibre est bien connu et n'a pas été modifié. Pour les systèmes usuels les largeurs d'impulsions sont de l'ordre de la ns et les résolutions spatiales métriques, par conséquent, cet équipement ne peut être utilisé 'correctement' que sur de grandes longueurs de fibres optiques. La Figure 29 représente le schéma de principe de l'OTDR. L'équipement commercial utilisé au cours de la thèse est un OTDR EXFO [54].

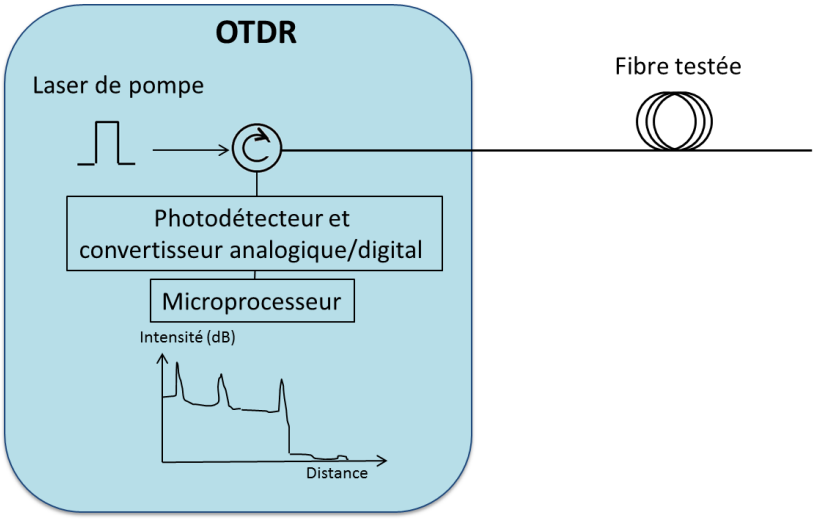


Figure 29: Schéma de l'OTDR.

La technique « cut-back » permet de quantifier l'absorption optique a(λ) d'une fibre en mesurant les intensités transmises le long de deux longueurs différentes (Lg, longueur grande et Lp, longueur petite) de cette même fibre. Expérimentalement, une des deux extrémités de la fibre est connectée à une source lumineuse (dans notre cas, une lampe halogène) [55] tandis que l'autre bout de la fibre est connecté à un système d'analyse (spectromètre : dans notre cas nous avons utilisé le QE65000 Ocean Optics ou un analyseur IR Yokogawa) [56]. La Figure 30 en donne une représentation et l'absorption optique a(λ) est calculée en appliquant la formule suivante :

$$a(\lambda) = -\frac{10}{\Delta L} * log_{10}\left(\frac{I_{Lg}(\lambda)}{I_{Lp}(\lambda)}\right) \qquad \textit{avec } \Delta L = Lg - Lp \qquad \textit{(Équation 16)}$$

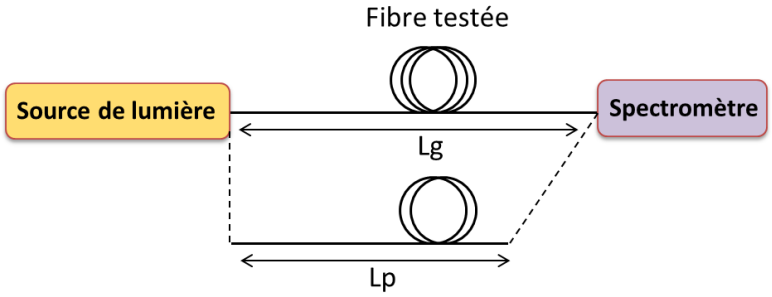


Figure 30: Configuration expérimentale du « cut-back ».

Cette technique est adaptée à toutes les longueurs de fibre. Néanmoins, pour d'obtenir des résultats fiables et corrects il faut absolument faire attention à ne pas modifier les conditions d'injection de signal dans la fibre ni les conditions d'acquisitions et donc de détection.

2.5.3 Méthodes et matériels de sollicitation thermique

Pour simuler la **température** près des alvéoles, deux solutions techniques ont été employées :

- Un **four**, pouvant aller de la température ambiante à 90°C, a été utilisé lorsque seul ce paramètre varie [71].
- Lorsque l'on souhaite évaluer l'influence croisée des 2 paramètres (de température et d'irradiation), des plaquettes chauffantes peuvent être installées dans une cellule d'irradiation. Ces plaquettes chauffantes sont composées de deux silicones de 15 cm de diamètre connectées à des régulateurs thermiques. Trois fibres enroulées suivants 3 diamètres différents (6, 8 et 10 cm) ont été installées entre ces deux silicones (Figure 31). Leurs températures de consigne étaient fixées à : 50°C, 100°C et 120°C.

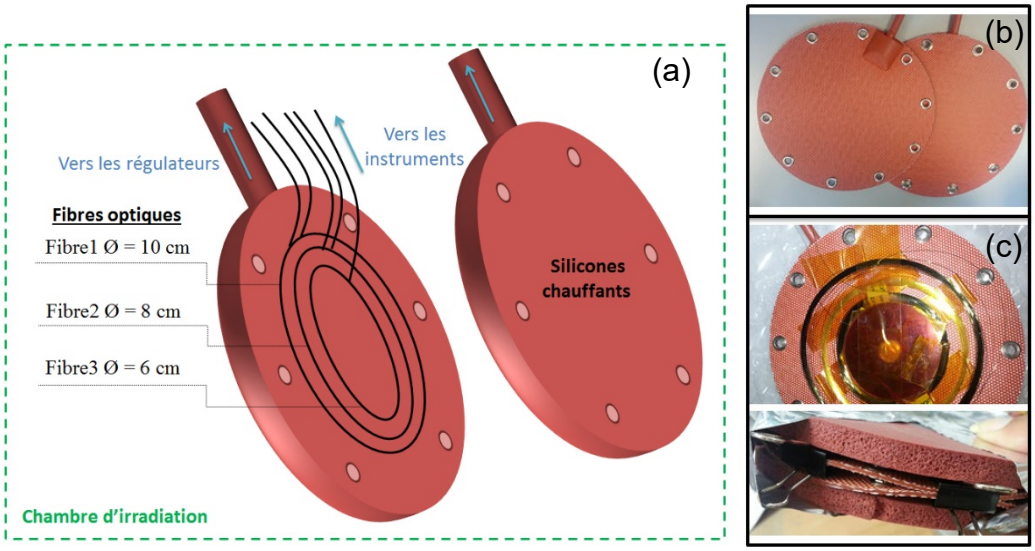


Figure 31: Représentation schématique du système expérimental chauffant utilisé durant une irradiation (a), photographie des plaquettes chauffantes (b) et de leur mise en place (c).

2.5.4 Procédure et matériels de sollicitation sous hydrogène

Pour simuler l'hydrogène produit par corrosion anoxique ou par certains déchets MAVL, un « réacteur hydrogène » adapté du Laboratoire Hubert Curien (Saint-Etienne, France – cf. Figure 32) a été utilisé pour charger les fibres en hydrogène : sous une pression de 110 bars pendant 2 semaines à température ambiante, ce qui permet d'atteindre la saturation. La désorption des fibres a été réalisée selon 2 configurations :

- A température ambiante et à pression atmosphérique,
- Durant une irradiation jusqu'à une dose de 8.90 kGy.

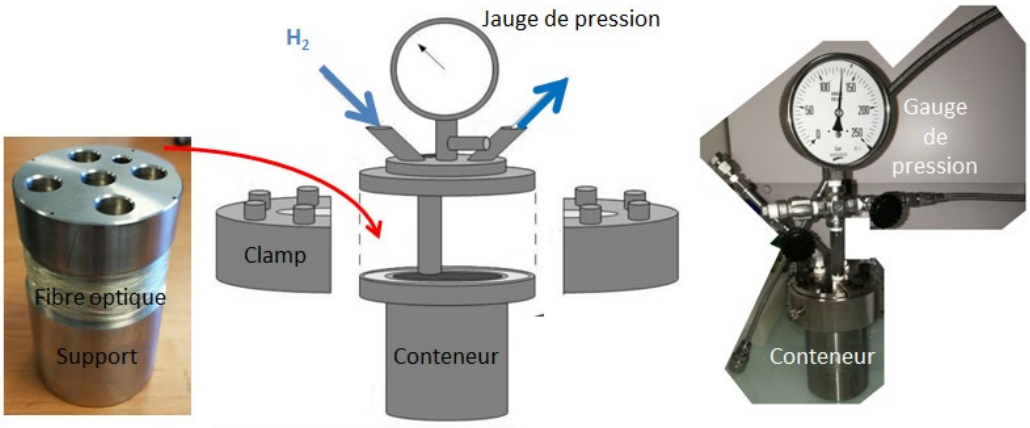


Figure 32: Photographies et schéma du réacteur d'hydrogène.

2.5.5 Méthodes et matériels de sollicitation mécanique

Pour simuler la déformation des alvéoles deux solutions techniques sont proposées selon l'unité de mesure désirée :

- Un banc de contrainte mis en place par le laboratoire Hubert Curien, a été utilisé pour faire varier de manière contrôlée l'allongement appliqué le long de la fibre (Figure 33). Ce système de mesure est composé de 5 poulies et d'une vis micrométrique. La fibre de longueur L, fixée à ses extrémités, est étirée d'un déplacement ΔL. La déformation imposée, en με, est déduite de la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \textit{(Équation 17)}$$

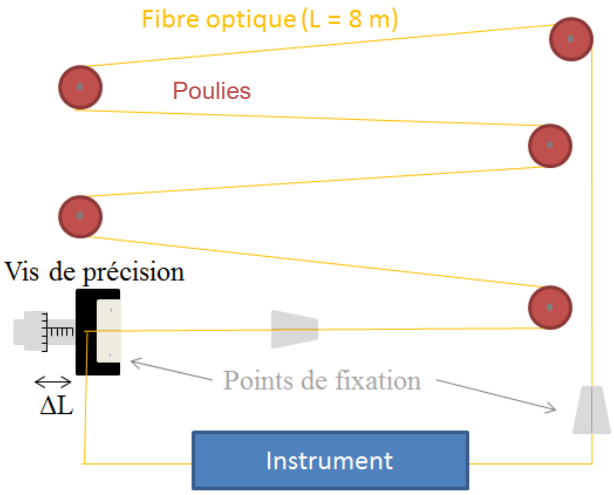


Figure 33: Schéma du banc de contrainte du Laboratoire Hubert Curien.

Ce système a été utilisé lorsque seul le paramètre de déformation varie.

- Lorsque les 2 paramètres varient, l'utilisation de bobines contraintes pouvant être installées dans une cellule d'irradiation ou dans un four a été préférable. Un profil de contrainte contrôlé a été appliqué sur la fibre étudiée, à l'aide de masses connues durant son bobinage. Le support des bobines est en borosilicate avec un coefficient d'expansion thermique très faible ($0{,}5\times10^{-6}$ k^{-1}), et proche de celui de la fibre. Les valeurs de paliers de contrainte σ sont présentées dans le tableau suivant. Le schéma d'une bobine de contrainte et ses paliers de tension associés sont respectivement présentés en Figure 34 et Tableau 6.

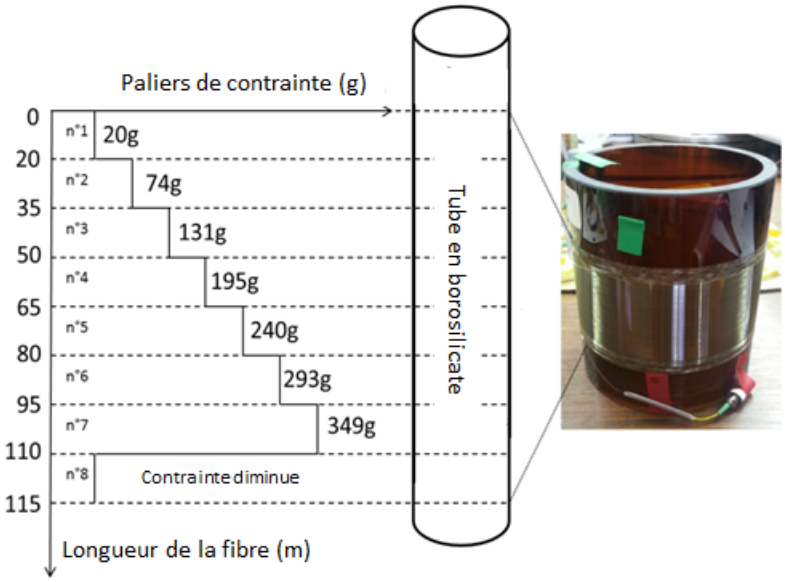


Figure 34: Schéma et photographie d'une bobine contrainte.

Tableau 6: Paliers de contrainte

N°Palier	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Longueurs (m)	0 de 20	20 de 35	35 de 50	50 de 65	65 de 80	80 de 96	95 de 110	110 de 115
masse m imposée (g)	20	74	131	195	240	293	349	Contrainte diminue

Afin de relier les déformations ε appliquées par le banc de contrainte et les paliers de contrainte σ d'une bobine contrainte, il faut connaitre le module d'Young E de la fibre qui est caractéristique du matériau. La loi de Hooke est utilisée lorsque la réponse est supposée linéaire:

$$\sigma = E * \varepsilon \qquad \text{avec } \sigma = \frac{F}{S} \qquad \textit{(Équation 18)}$$

où F est la force appliquée (dans notre cas, F = mg, g l'accélération de la pesanteur et S, la surface de section de la fibre (ici, $S = \Pi * R^2$). Nous avons négligé l'épaisseur et l'influence du revêtement primaire et utilisé un diamètre de 125 µm.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude bibliographique des influences de conditions hostiles sur les différents types de diffusions de la lumière dans la silice (Brillouin, Rayleigh et Raman).

Chapitre 3: Structure de la thèse et mise en place des moyens techniques

Dans cette partie, nous présentons la méthodologie sélectionnée pour atteindre les objectifs visés pour la thèse ainsi que l'ensemble des moyens expérimentaux (fibres testées et montage utilisés) mis en œuvre pour étudier l'évolution des performances sous irradiation des différents capteurs à fibre optique basés sur la signature Brillouin, Rayleigh, ou Raman. Ces interrogateurs utilisent l'une des rétrodiffusions pour suivre la distribution spatiale et temporelle de la température (Raman) ou de la température et de la déformation (Brillouin, Rayleigh) le long de la fibre optique. Un nouveau type de capteur combinant l'étude des deux mécanismes pour séparer les paramètres température/déformation sur une fibre unique.

3.1 Méthodologie et objectif

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté le contexte de notre étude : la surveillance du stockage souterrain définitif des déchets radioactifs à vie longue, notamment pour contribuer à conforter la démonstration de la sûreté à long terme et de réversibilité de l'installation sur les premières décennies. La technologie des capteurs à fibre optique répartis sur de longues distances est particulièrement intéressante pour caractériser les ouvrages constitutifs du stockage géologique profond. L'environnement sévère des alvéoles de stockage impose de développer des capteurs suffisamment résistants à (i) un niveau élevé de radiation gamma si le capteur est placé au plus près du colis de déchet, (ii) des températures localement élevées (100°C) et (iii) des relâchements d'hydrogène.

L'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer et d'améliorer si possible les performances des capteurs à fibre optique afin de pouvoir survivre aux contraintes environnementales de Cigéo. En particulier, notre travail est axé sur les effets des rayonnements γ, de la température T, de la déformation ε et de la présence d'hydrogène H_2 sur les diffusions Brillouin, Rayleigh, ou Raman dans les fibres optiques en silice. La méthodologie des essais réalisés durant cette thèse est une analyse de l'influence de différents paramètres (T, ε, H, γ) sur les performances des systèmes de mesure répartie de température et de déformation fondés sur les rétrodiffusions Rayleigh, Raman et Brillouin. Elle comprend la succession de différentes combinaisons de paramètres, présentées dans la Figure 35 ci-dessous.

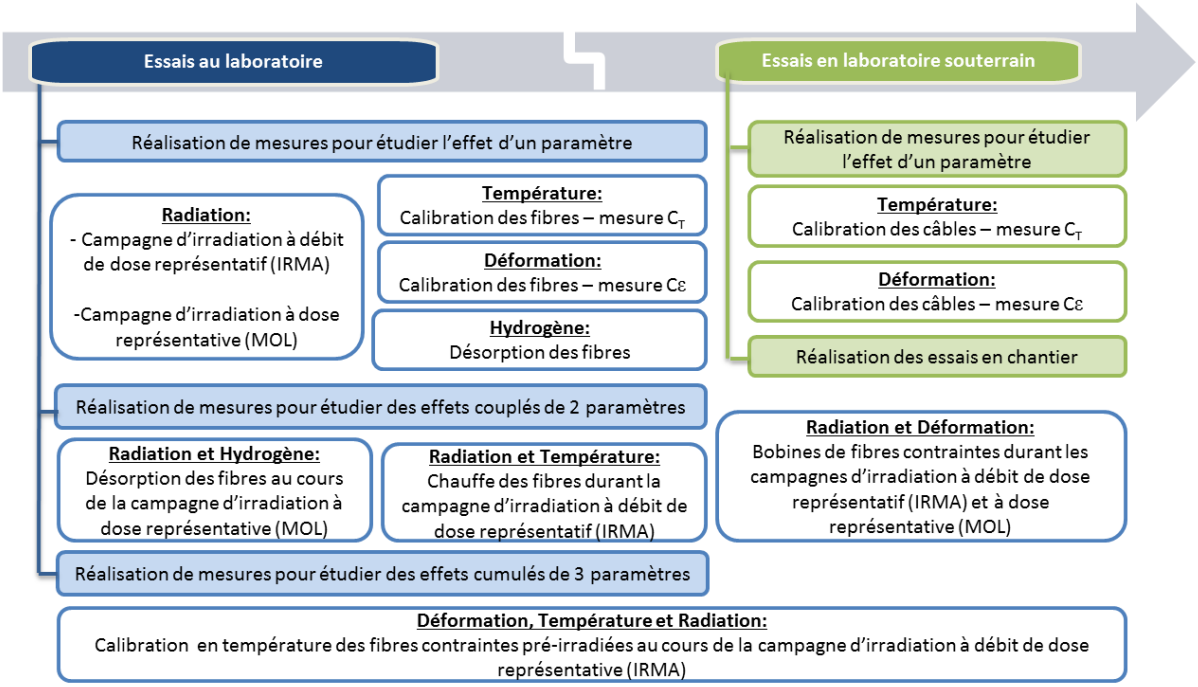


Figure 35: Méthodologie des essais réalisés durant la thèse.

Des essais au laboratoire Hubert Curien suivis des essais en chantier au laboratoire souterrain de l'Andra à Bure ont été réalisés. Les essais au laboratoire Hubert Curien se divisent en trois catégories : les études de l'influence d'un seul paramètre sur la fibre et sur les performances des capteurs à fibres optiques (parmi la température, la déformation, les radiations et la présence d'hydrogène), les études concernant les effets couplés de deux paramètres (les radiations avec la présence d'hydrogène ou la température) et les études des effets cumulés de trois paramètres (la déformation, la température et les radiations).

Les essais en chantier étaient dédiés à l'implémentation de câbles à fibre optique pour obtenir des mesures réparties de température et de déformation dans des démonstrateurs d'alvéole de stockage, pour confronter les recherches académiques et les spécificités du génie civil, les contraintes de chantier. Par soucis de cohérence scientifique, ces travaux seront présentés en annexe E.

Habituellement, pour les applications liées au génie civil, des études à un seul paramètre sont menées afin de déterminer les coefficients de sensibilité associés au capteur. Pour atteindre mes objectifs de thèse, les aspects suivants ont été traités :

- Compréhension du fonctionnement du l'interrogateur Neubrex qui en combinant la mesure Brillouin et Rayleigh vise à discriminer les distributions de température et de déformation le long d'une fibre unique.

- Etude métrologique des performances de cet interrogateur en termes de séparation de la température et la déformation.

- Comparaison des performances d'instruments utilisant les diffusions Brillouin et Rayleigh
- Etude de la réponse des fibres possédant un revêtement carbone permettant de limiter la pénétration de l'hydrogène dans ces fibres optiques.

J'ai également mené des études préliminaires sur des fibres sensibles aux radiations, dopées P et Al, pour la détection ou la mesure de radiations. Ces travaux seront également présentés en annexe D.

3.2 Eléments retenus pour la thèse

Les moyens techniques retenus pour la thèse sont présentés dans les parties suivantes : les listes des fibres étudiées et les montages expérimentaux.

3.2.1 Liste des fibres étudiées

La fibre SMF28 de Corning, est bien connue pour son utilisation en télécommunication. Elle est composée d'un cœur dopé Germanium (Ge) et son atténuation linéique est faible. Le procédé de fabrication de ce type de fibre est maîtrisé de longue date, elle est déployée dans plusieurs secteurs d'activités, elle sera utilisée comme fibre de référence dans notre étude.

La conception et 'ingénierie des fibres optiques relèvent d'une chimie-physique complexe. Les profils d'indices sont judicieusement choisis en fonction des applications visées. Cet ensemble est contrôlé par des ajouts de dopants (types et concentrations) qui modifient les propriétés optiques de la matrice hôte (tant pour le cœur que pour la gaine optique).

A titre d'exemple, les dopants germanium (Ge) ou phosphore (P) augmentent l'indice alors que les dopants bore (B) et fluor (F) le diminuent [65][66], comme le montre la Figure 36.

Utilisés dans un environnement radiatif, ces différents dopants vont jouer des rôles majeurs dans les cinétiques de génération de défauts, distinguant les fibres en deux grandes familles : sensibles ou résistantes à l'environnement considéré.

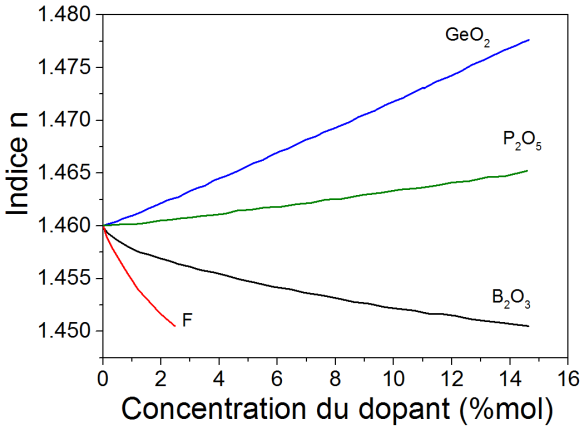


Figure 36: Evolution de l'indice n en fonction de la concentration du dopant dans une matrice de silice [65].

L'ensemble cœur-gaine de la fibre optique est entouré d'un revêtement primaire de protection dont la composition peut aussi varier : l'acrylate résiste à 65°C tandis que le polyimide peut tenir jusqu'à 300°C.

Pour être utilisée en chantier, la fibre optique est placée dans un câble. On peut en distinguer deux grandes catégories ceux qui adhérent à la fibre pour mesurer une déformation et les loose-tubes qui permettent de mesurer une température.

Nous avons testé des fibres optiques commerciales des fournisseurs Draka (aujourd'hui Prysmian Group), Fibertonix. Deux types de fibres optiques ont été conçus et produits par la société iXBlue Photonics [87]: les fibres monomodes (Single Mode SM) qui peuvent être utilisées comme les éléments sensibles d'instruments Brillouin, Rayleigh et Raman-Viavi ; et les fibres multimodes (MM) associées à l'instrument Raman-Silixa. Pour chaque type, une fibre de référence a été choisie : une fibre dopée Ge en cœur (comme la majorité des fibres utilisées dans le domaine des télécom) pour les SM et une fibre pure silice (technologie de fibre optique présentant une bonne tenue aux radiations pour les gammes de dose visées dans la thèse).

Nous disposions de plus d'un kilomètre de chacune des fibres optiques.

Des échantillons beaucoup plus courts ont été prélevés et ont subi différents traitements répertoriés dans le Tableau 7. Les dimensions géométriques des fibres monomodes et multimodes sont respectivement présentées dans les Tableau 8 et Tableau 9.

Tableau 7: Caractéristiques des fibres étudiées et leurs historiques de traitement.

Caractéristiques des fibres monomodes				Historiques de traitement des échantillons						
Noms de la fibre	**Cœur**	**Gaine optique**	**Revêtement**	**Vierges**	**Contraintes**	**Chauffées**	**Hydrogénées à RT**	**Irradiées en ligne à débit de dose représentatif (IRMA)**	**Irradiées en ligne à dose représentative (MOL)**	**Pré-irradiées**
SM-Ge14	Ge-SiO_2 (10,7 wt.%)	F (0.1 wt.%)	Acrylate							
					Jusqu'à 1105 με					
						Jusqu'à 90°C				
							Jusqu'à saturation			
								370 Gy/h et 2.6 kGy/h		
									10 MGy	
					Jusqu'à 349g			370 Gy/h et 2.6 kGy/h		
					Jusqu'à 100g				10 MGy	
							Jusqu'à saturation			
							Jusqu'à saturation			10 MGy
							Jusqu'à saturation		6 MGy	
SM-Ge16	Ge-SiO_2	Pure silice	Polyimide			50, 100 et 120°C		2.6 kGy/h		
SM-F14	F-SiO2 (0.2 wt.%) profil parabolique à gradient d'indice	F-SiO2 (1.8 wt.%)	Acrylate							
					Jusqu'à 1105 με					
						Jusqu'à 90°C				
							Jusqu'à saturation			
								370 Gy/h et 2.6 kGy/h		
									10 MGy	
					Jusqu'à 349g			370 Gy/h et 2.6 kGy/h		
					Jusqu'à 100g				10 MGy	
							Jusqu'à saturation			
							Jusqu'à saturation			10 MGy
							Jusqu'à saturation		6 MGy	
SM-F16	F-SiO_2 (0.2 wt.%)	F-SiO_2 (1.8 wt.%)	Polyimide			50, 100 et 120°C		2.6 kGy/h		
SM-N	N-SiO2 (0.67. wt.%)	Pure silice	Acrylate							
					Jusqu'à 1105 με					
						Jusqu'à 90°C				
							Jusqu'à saturation			
								370 Gy/h		
					Jusqu'à 349g			370 Gy/h		
							Jusqu'à saturation			
							Jusqu'à saturation			10 MGy
							Jusqu'à saturation		6 MGy	

Caractéristiques des fibres monomodes				Historiques de traitements des échantillons						
Noms de la fibre	**Coeur**	**Gaine**	**Revêtement**	**Vierges**	**Contraintes**	**Chauffées**	**Hydrogènées à RT**	**Irradiées en ligne à débit de dose représentatif (IRMA)**	**Irradiées en ligne à dose représentative (MOL)**	**Pré-irradiées**
SM-PSC	Pure silice	F-SiO_2	Polyimide		Jusqu'à 650g					
						Jusqu'à 90°C				10 MGy
SM-PSC-C	Pure silice	F-SiO_2	Carbone et Polyimide		Jusqu'à 650g					
						Jusqu'à 90°C				10 MGy

	Caractéristiques des fibres multimodes				Historiques de traitements des échantillons			
Noms de la fibre	**Coeur**	**Gaine**	**Ouverture numérique**	**Revêtement**	**Chauffées**	**Irradiées en ligne à débit de dose représentatif (IRMA)**	**Irradiées en ligne à dose représentative (MOL)**	**Pré-irradiées**
MM-F1	Gradient d'indice	Pure silice		Polyimide	Jusqu'à 90°C			
						2.6 kGy/h		
							10 MGy	
						2.6 kGy/h		10 MGy
					50, 100 et 120°C	2.6 kGy/h		
MM-F2	Gradient d'indice	F-SiO2 (5 wt.%)		Double couche d'acrylate UV		2.6 kGy/h		
							10 MGy	
MM-F3-C	Profil parabolique réalisé en faisant varier la concentration en fluor	Pure silice		Carbone et Polyimide	Jusqu'à 90°C			
						2.6 kGy/h		

RT = Room Temperature (température ambiante)

Tableau 8: Dimensions géométriques des fibres monomodes étudiées.

Fibre monomode	Ø cœur (µm)	Ø gaine (µm)	Ø revêtement (µm)
SM-Ge14	8.2	124.9	243
SM-Ge16	10	125	248
SM-F14	6.9	124.7	243
SM-F16	7.0	125.0	151
SM-N	7.6 à mi-hauteur du profil d'indice	124.5	242
SM-PSC	8.4	125	155
SM-PSC-C	8.4	125	155

Tableau 9: Dimensions géométriques des fibres multimodes étudiées.

Fibre multimode	ON	Ø cœur (µm)	Ø gaine (µm)	Ø revêtement (µm)
MM-F1	0.2	50	125	155
MM-F2		50	125	242
MM-F3	0.11	47.8	123.4	154

Les caractéristiques des fibres optiques monomodes face aux radiations, à la température et à la déformation sont présentées dans les parties suivantes.

3.2.2 Caractéristiques des fibres dopées Ge, F et N

Les caractéristiques optiques, notamment à la tenue aux radiations, sont présentées pour les fibres monomodes dopées Ge, F et N.

3.2.2.1 Atténuations induites par les radiations

Mesures en ligne

La caractérisation de la RIA pour les trois types de fibres monomodes étudiées est présentée dans la Figure 37 suivante. Ces mesures de RIA ont été réalisées à 1550 nm grâce à une mesure OTDR durant 3 campagnes d'irradiation gamma différentes, décrites en 2.5.1.

Comme attendu [44][47][48] , la RIA est fortement dépendante de la nature du dopant en cœur. A 1550nm, la plus faible RIA observée dans la fibre dopée F est de 5.8 dB/km pour une dose déposée de 56 kGy et de 59 dB/km pour une dose déposée de 10 MGy. Ces valeurs sont en accord avec celles disponibles dans la littérature pour ce type de fibre optique [12] : 7.5 dB/km et 58 dB/km pour les doses déposées respectives de 20 kGy et 10 MGy. Ces résultats confirment la bonne tenue aux radiations de cette fibre. E.M. Dianov et al. [89] ont montré qu'une RIA, mesurée après une irradiation de 10 kGy, est de ~3.2 dB/km à 1550nm dans leur fibre dopée N. Leur valeur est proche de celle d'une fibre silice pure (~1.5 dB/km). Durant nos campagnes de tests, nous avons observé pour une dose modérée de 10 kGy des pertes de 7.4 dB/km (SM-N) et de 4.5 dB/km (SM-F14) à 1550nm tandis que pour des doses plus importantes de 6 et 10 MGy, les pertes mesurées à la même longueur d'onde sont respectivement de 160 dB/km (SM-N) et 59 dB/km (SM-F14). Pour une dose déposée de 10 MGy à 1310nm, les pertes sont de 493 dB/km (SM-Ge14), 108.6 dB/km (SM-N) et 24 dB/km (SM-F14). Ces résultats confirment que la RIA de la fibre dopée N est plus proche de celle de la fibre dopée F que de celle de la fibre germanosilicate. L'importante différence de RIA entre les fibres dopées N et F peut probablement s'expliquer par le fait que les défauts relatifs à l'azote contribuent plus aux pertes transitoires (durant l'irradiation) à cette longueur d'onde qu'aux pertes permanentes, mesurées post-mortem. La RIA va réduire la portée (et affecter l'incertitude de mesure) des différentes technologies de capteurs à fibre optique. Par conséquence, la fibre dopée F est clairement la meilleure candidate pour le suivi de l'évolution des paramètres thermique et mécanique au sein de Cigéo.

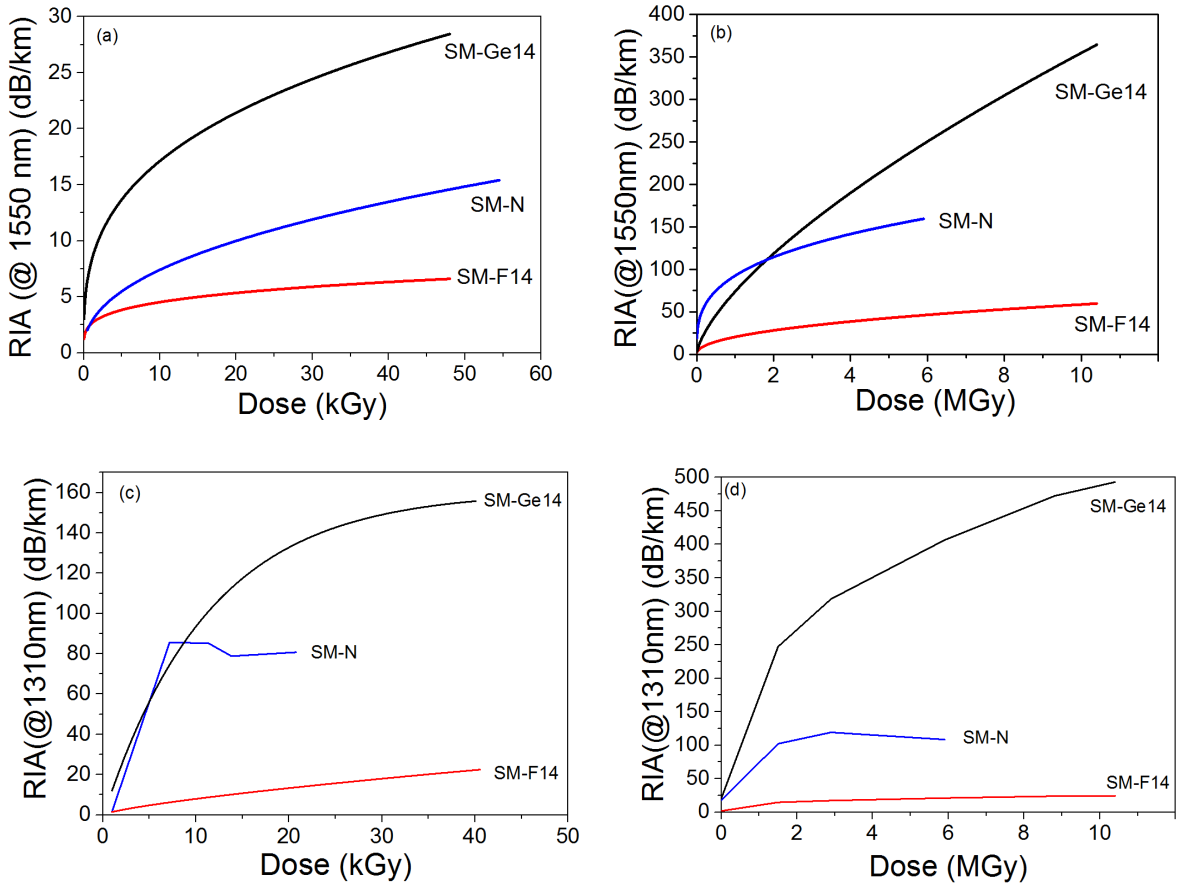


Figure 37 : Evolution des pertes linéiques à 1550 nm (haut) et 1310nm (bas) induites par les radiations en fonction de la dose déposée, à débit de dose 370 Gy/h (a), 14.95kGy/h (b,d), 2.6 kGy/h (c), pour les fibres SM-Ge14, SM-F14 et SM-N.

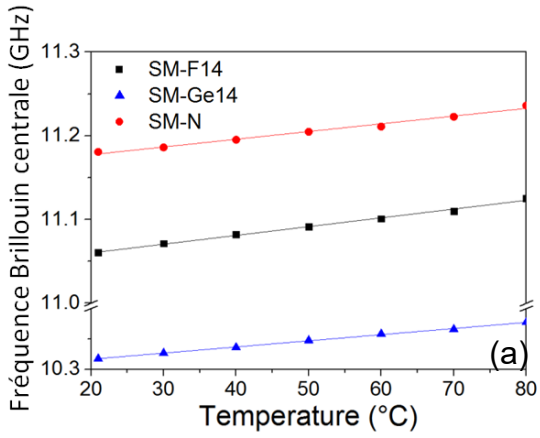
Plus précisément, nous pouvons estimer l'impact de la RIA sur les performances du capteur à fibre optique en termes de portée de la mesure. Notre système d'acquisition NEUBREX possède un budget optique d'environ 10 dB pour la technologie PPP-BOTDA et de 7 dB pour la technologie TW-COTDR. Par exemple, à 1550 nm, pour une dose de 45 kGy, la RIA est d'environ 30 dB/km pour la fibre dopée Ge, 14 dB/km pour la fibre dopée N et de 5.8 dB/km pour la fibre dopée F. Cela signifie que la longueur sensible de fibre disponible pour la mesure sera réduite à un maximum de ~300 m (SM-Ge), ~710 m (SM-N) et ~1720 m (SM-F) pour la technologie PPP-BOTDA ; et ~233 m (SM-Ge), ~500 m (SM-N) et ~1206 m (SM-F) pour la technologie TW-COTDR. Pour une longueur de fibre testée de 60 m, aucun problème associé à l'impact de la RIA sur la longueur de fibre sensible ne sera observé mais cette influence sera bien sûr à considérer du point de vue applicatif, pour la réduction associée de la portée de la mesure.

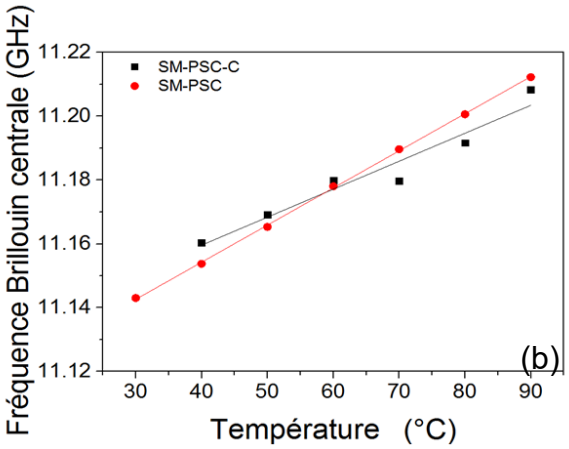
3.2.2.2 Calibrations en température

Dans cette partie, nous étudions le potentiel des différents types d'interrogateurs (Brillouin et Rayleigh de l'instrument Neubrex) à mesurer la température. Ces expériences de calibration (en température) des fibres étudiées SM-F14, SMGe14 et SM-N permettent d'obtenir les coefficients de sensibilité correspondants en Brillouin ou Rayleigh : C_T^B ou C_T^R.

Réponse de l'interrogateur Brillouin

Le coefficient de sensibilité en température Brillouin C_T^B est déterminé avec la procédure de calibration expliquée précédemment. La réponse Brillouin (fréquence du signal) augmente avec la température, et cette dépendance est reportée dans la Figure 38. Les coefficients de sensibilité en température sont déterminés à partir de la valeur de la pente obtenue par régression linéaire. Ces valeurs des coefficients C_T^B sont respectivement de 1.002 MHz/°C (SM-F14), 1.042 MHz/°C (SM-Ge14), 0.893 MHz/°C (SM-N), 1.164 MHz (SM-PSC) et 1.373 MHz (SM-PSC-C) [88][90] . Pour les fibres dopées F, Ge et N ; ces résultats sont en cohérence avec les valeurs reportées dans la littérature pour la fibre de référence SMF28 de Corning (1.07 MHz/°C) [23][43] et la valeur de 1.09 MHz/°C pour la fibre SM-Ge14 reportée dans la thèse de C. Cangialosi [14]. On peut remarquer que les coefficients des fibres SM-PSC et SM-PSC-C sont plus élevés que celui de la fibre SMF28. D'après la Figure 38(b), nous pouvons noter que la mesure de la fibre avec un revêtement carbone est moins linéaire que celle de la fibre sans revêtement carbone.





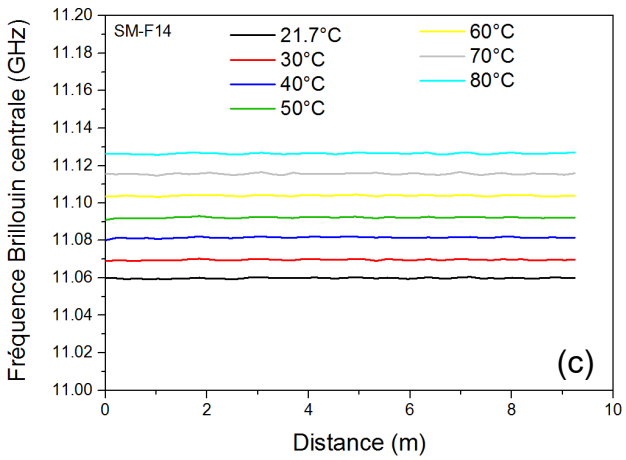


Figure 38: Fréquence Brillouin centrale en fonction de la température pour les fibres SM-F14, SM-Ge14, SM-N (a) [88][90] , SM-PSC et SM-PSC-C (b).Fréquence Brillouin centrale en fonction de la longueur de la fibre SM-F14 (données brutes sans traitements et sans correction en température)(c).

Réponse de l'interrogateur Rayleigh

Le coefficient de sensibilité en température Rayleigh C_T^R est déterminé selon la même procédure de calibration. Le décalage de fréquence change avec la température, et sa dépendance est reportée dans la Figure 39 entre 30 et 80°C. Les valeurs des coefficients C_T^R sont respectivement 1.282 GHz/°C (SM-F14), 1.388 GHz/°C (SM-Ge) et 1.270 GHz/°C (SM-N) [88][90] . Ces résultats sont eux aussi en cohérence avec la valeur connue pour la fibre SMF28 (1.5 GHz/°C) [23][43] .

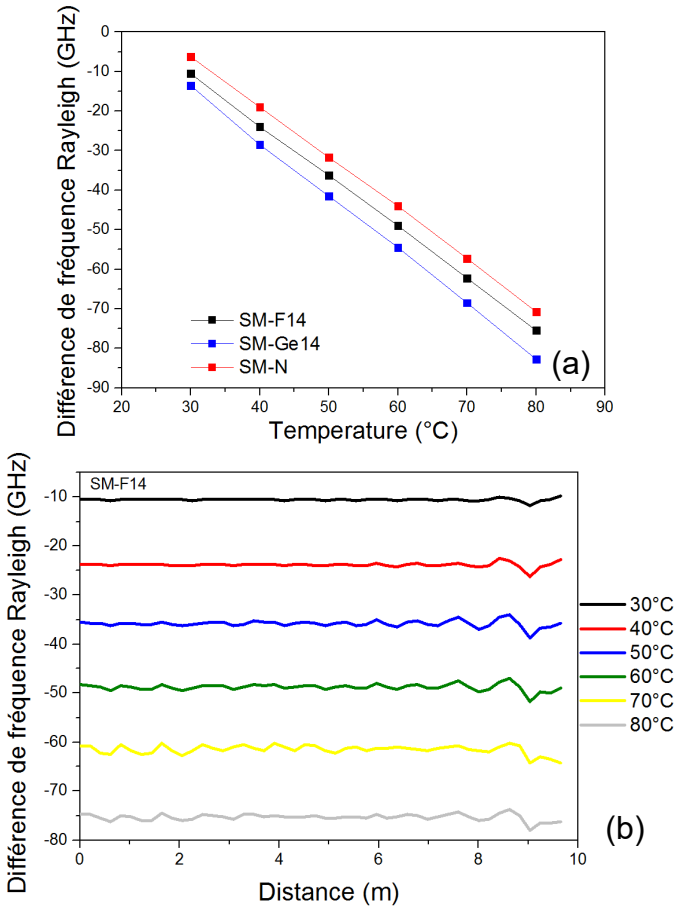


Figure 39: Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la température pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N.(a) [88][90] Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la longueur de la fibre SM-F14 (données brutes sans traitements et sans correction en température)(b).

3.2.2.3 Calibrations en déformation

Dans cette partie, nous étudions le potentiel des différents types d'interrogateurs (Brillouin et Rayleigh de l'instrument Neubrex) à mesurer la déformation. Ces expériences fournissent les coefficients de sensibilité mécanique $C\varepsilon^{B \text{ ou } R}$ obtenus pour les fibres SM-F14, SMGe14 et SM-N.

Réponse de l'interrogateur Brillouin

Les résultats de la procédure de calibration (cf. 2.5.5) mécanique sont reportés sur la Figure 40, cette dernière présente l'évolution de la fréquence Brillouin en fonction de la déformation appliquée. Les coefficients de déformation réalisés sur les fibres testées $C\varepsilon^{B}$ (SM-F14), $C\varepsilon^{B}$ (SM-Ge14) et $C\varepsilon^{B}$ (SM-N) sont respectivement 0.035 MHz/με, 0.017 MHz/με et 0.034 MHz/με [88][90] . Ces coefficients sont plus faibles que celui donné dans la littérature pour la fibre SMF28 : 0.05 MHz/με [23][43] .

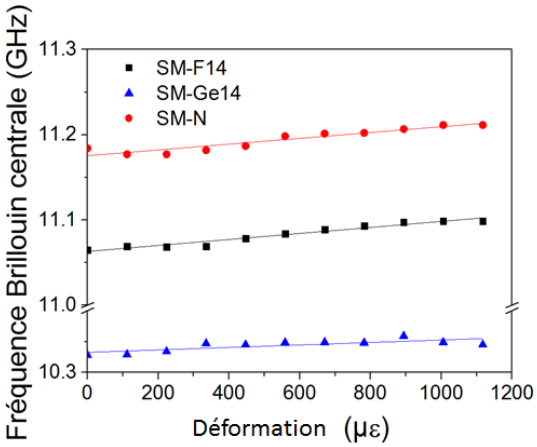


Figure 40: Fréquence Brillouin centrale en fonction de la déformation appliquée pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N. [88][90]

Réponse de l'interrogateur Rayleigh

Les résultats de la procédure de calibration (cf. 2.5.5) en contrainte sont reportés sur la Figure 41, cette dernière présente la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la déformation appliquée. Les coefficients de déformation réalisés sur les fibres testées $C\varepsilon^R$ (SM-F14), $C\varepsilon^R$ (SM-Ge14) et $C\varepsilon^R$ (SM-N) sont respectivement 0.13 GHz/με, 0.13 GHz/με et 0.16 GHz/με [88][90] . Les coefficients des fibres dopées F et N sont plus faibles que celui de la littérature pour la SMF28 : 0.15 GHz/με [23][43] . A notre connaissance, la fibre dopée N n'avait jamais été caractérisée du point de vue capteur Rayleigh.

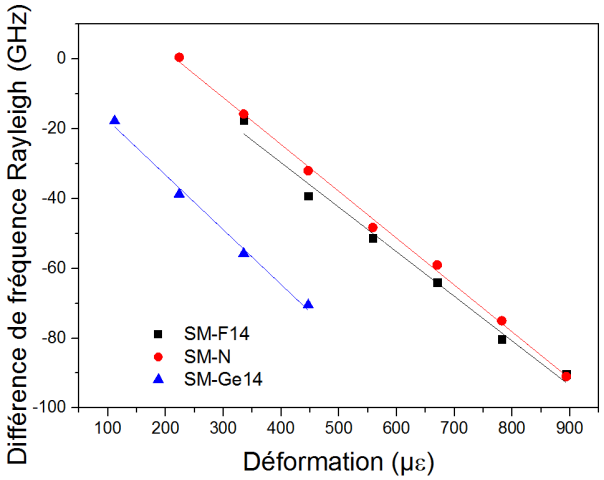


Figure 41: Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la déformation imposée pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N.[88][90]

3.2.3 Caractéristiques des fibres multimodes

Les présents travaux (cf. 2.1.3) ont capitalisé les résultats disponibles de la thèse de C. Cangialosi. Les fibres multimodes ont été utilisées couplées aux instruments Raman, mais n'ont pas été recaractérisées en RIA.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les échantillons étudiés, qui ont été caractérisés durant ce travail de thèse et leurs historiques de traitement. Les différents montages expérimentaux (campagnes d'irradiation et d'hydrogénation) ont été décrits pour introduire les chapitres de résultats expérimentaux en lien avec mon application.

Comme le résume la Figure 42, pour simuler les 4 paramètres Radiation, Température, Présence d'hydrogène et Déformations, nous avons respectivement utilisé les solutions techniques suivantes : des campagnes d'irradiation (selon le débit de dose et la dose visés), un four ou des plaquettes chauffantes, un « réacteur hydrogène » et un banc de contrainte ou des bobines de fibres contraintes.

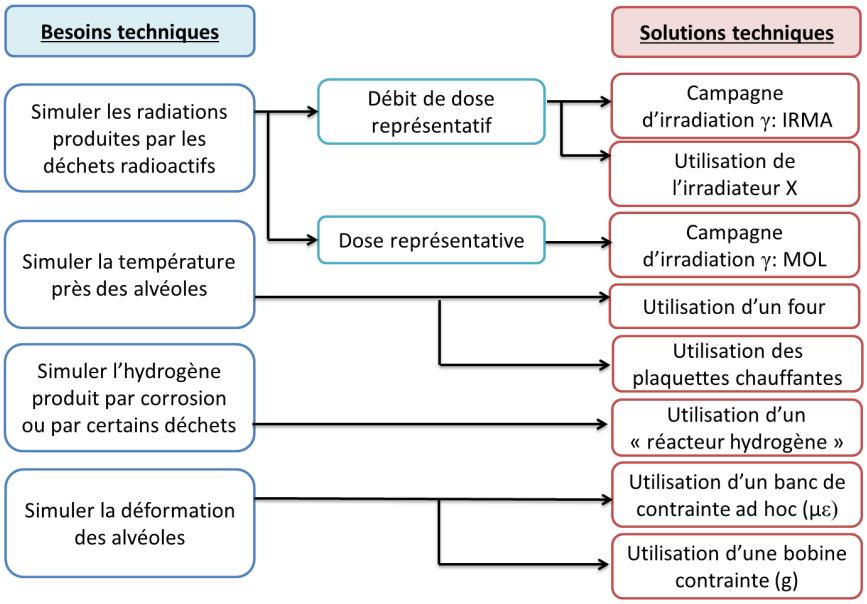


Figure 42 : Schéma représentant les besoins et les solutions techniques associées.

Partie II Résultats

Chapitre 4: Réponse de l'interrogateur Raman

Dans ce chapitre, les performances du capteur réparti de température à fibre optique basé sur la diffusion Raman seront étudiées pour des conditions radiatives représentatives de l'application Cigéo.

Comme expliqué en Chapitre 1, la mesure de la température par la technologie DTS dépend du ratio R entre les intensités des composantes AS et S, et de l'atténuation différentielle induite Δα entre ces deux composantes, suivant la relation :

$$T(z) = \frac{h\,\Delta\upsilon}{k\,ln\left[\left(\frac{\upsilon_{AS}}{\upsilon_S}\right)^4 \frac{1}{R} e^{-\int_0^z (\alpha_{AS}(u)-\alpha_S(u))du}\right]} \qquad \textit{(Équation 19)}$$

Avec $R = \frac{I_{AS}}{I_S}$, le ratio des intensités AS et S ; α_S (respectivement α_{AS}) : les atténuations spécifiques aux composantes S (AS) ; k : la constante de Boltzmann ; h : la constante de Planck et Δυ = 13.2 THz pour la silice.

Les performances de deux technologies Raman ont été étudiées in situ, c'est-à-dire durant l'irradiation de la fibre optique utilisée comme élément sensible :

- Un RDTS de Silixa [27] (λ~1064-1550 nm) utilisant des fibres multimodes MM-F1 et MM-F2 avec un échantillonnage visé de 0.13 m défini sur la gamme 30-90°C (cf. Chap4).
- Un DTS prototype de VIAVI Solutions [28] (λ~1550-1650 nm) utilisant de la fibre monomode SM-F14 avec une résolution spatiale de 3 m pour les tests sur la gamme 30-90°C.

4.1 Effets des radiations

Les premières études de l'influence des radiations sur la réponse d'un capteur à fibre optique Raman (en mode single-end) ont été réalisées en 1996 [35][82] et ont été explicitées dans le Chapitre 2: . Les études récentes [14][35][82] ont montré que la dépendance spectrale des pertes induites et le ΔRIA associé vont (i) dégrader la précision de la mesure de la température (ii) réduire la portée maximale du capteur. Nos études porteront sur l'influence de ces deux paramètres et, dans la mesure du possible, en délimiter les domaines d'utilisation.

Quand la fibre est exposée aux radiations, ses propriétés structurales évoluent. A l'échelle macroscopique ses capacités de transmission vont être altérées via la génération de RIA [44], qui dépend, au premier ordre, de la composition de la fibre sous test et du domaine spectral sondé. Par conséquent, les composantes Raman Stokes et Anti-Stokes générées par le laser pompe seront affectées différemment, entraînant l'échec de l'instrument à correctement réaliser la mesure de température [14]. Pour répondre à cette problématique, plusieurs approches ont été expérimentées pour réduire l'impact de la RIA et du ΔRIA : l'utilisation de fibres résistantes aux radiations [14], la pré-irradiation de la fibre optique sous test [102], l'impact d'un pré-chargement en hydrogène [16], et surtout l'utilisation d'une architecture de capteur basée sur une configuration dite double-end [32][33][37] qui consiste à interroger la fibre par ses deux extrémités. Dans cette partie de la thèse j'ai donc exploré les potentialités des deux configurations single-end et double-end associées à des fibres résistantes aux radiations, limitant ainsi l'impact de la RIA sur la portée de la mesure [118][120][126] .

4.1.1 Performances de la technologie DTS Silixa

Mesure single-end en ligne

Cette section présente l'étude sur les performances du capteur RDTS Silixa en utilisant des fibres multimodes (silice pure et dopée F) tolérantes aux radiations. Dans le cas des campagnes d'irradiations à MOL, au sein de l'installation Brigitte du SCK-CEN, la dose a atteint 6 MGy. La température ambiante mesurée par le thermocouple a varié de 24°C (avant l'irradiation) à 50°C (au cours de l'irradiation). Une des étapes clés consiste à bien maîtriser la répartition de la température le long de la fibre avant irradiation car elle servira de référence et permettra d'anticiper les analyses des données récoltées lors de l'irradiation. Il s'agit en effet de décorréler les impacts de l'échauffement dû à la source de rayonnement et de l'irradiation sur l'élément sensible (la fibre optique). Afin de mettre en exergue l'ampleur de ces variations et leurs conséquences sur les mesures de températures, les mesures thermiques présentées sont quasi-brutes, sans corrections.

La réponse du capteur Raman est, comme attendu, fortement influencée par les radiations γ, dont un exemple typique est illustré sur la Figure 43 pour les fibres MM-F1 (a) et MM-F2 (b) (de 70 m de longueurs, interrogées indépendamment l'une de l'autre, c'est-à-dire placées en parallèle sur deux voies d'un multiplexeur). Alors que la température devrait être constante, autour de 50°C, tout au long de la fibre optique, on constate que les évolutions de la température en fonction de la longueur de fibre optique présentent une pente négative plus ou moins importante selon le type de fibre sous test et la dose cumulée. Ce qui signifie, dans ce cas, que l'instrument sous-estime l'intensité de la composante anti-Stokes par rapport à celle de la composante Stokes. Cela se reflète sur une erreur de température qui

augmente avec la longueur de la fibre sensible, allant jusqu'à une dizaine de degrés après seulement 70m de fibre optique. Ces erreurs sont causées par la RIA et plus particulièrement par l'atténuation différentielle induite sur les composantes S et AS. Cette atténuation différentielle affecte le rapport d'intensité utilisé par le système RDTS pour calculer la température le long de la fibre étudiée, l'erreur augmentant avec la distance de fibre sondée.

La Figure 43 illustre l'évolution de la mesure de la température par le RDTS en fonction de la dose reçue et de la longueur de fibre sondée. Pour obtenir ce graphe, la mesure brute a été extraite à 6 instants clefs de l'essai d'irradiation en ligne, correspondant aux doses cumulées de 0 à 6 MGy. On constate que les courbes de la fibre MM-F1 présentent des pentes plus prononcées (tendant vers une erreur équivalente à -0.11°C/m) que celles de la fibre MM-F2 (tendant vers -0.02 °C/m). Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la bibliographie [14], où un autre interrogateur RDTS (de fabricant différent : Sensornet) a révélé une pente d'environ -0.13°C/m sur la fibre MM-F1 irradiée à une dose de 6 MGy. De plus, on peut noter que la valeur de ces pentes semble diminuer avec l'accumulation de dose ce qui signifierait que la $\Delta\alpha$ diminue aux plus fortes doses.

Ce dernier point peut être analysé plus spécifiquement, car on peut remonter aux valeurs du $\Delta\alpha$ (cf.*Figure 44*) qui expliqueraient les mesures RDTS effectuées avec les deux fibres optiques. Durant la phase de guérison de la fibre (post-irradiation), ces pentes augmentent et changent de signe pour atteindre +0.05°C/m, ce qui conforte, dans ce cas aussi, le phénomène d'évolution de la RIA via la transformation de centres optiquement actifs mais instables hors irradiation.

A la fin de l'irradiation, les défauts responsables de la RIA aux longueurs d'onde Stokes et Anti Stokes présentent des cinétiques de guérison différentes, ce qui explique l'évolution de l'impact du $\Delta\alpha$ sur la mesure de température. Du point de vue applicatif, la mesure avec cet interrogateur présente deux principaux problèmes : d'une part, les valeurs de RIA élevées limitent la distance maximale de mesure de la température et d'autre part, l'atténuation induite différentielle $\Delta\alpha$ induit des erreurs de mesures de température qui, de plus, augmentent avec la longueur de la fibre sous test.

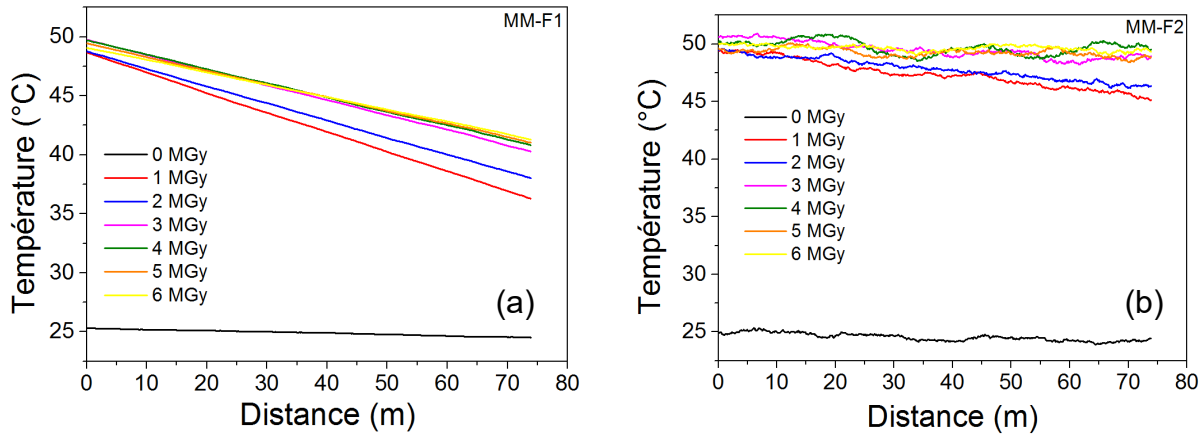


Figure 43 : Mesures brutes de la répartition de la température obtenues à 6 instants de l'irradiation en fonction de la longueur de la fibre avec le Silixa en mode single-end, pour différentes doses de rayonnement gamma déposées allant jusqu'à 6MGy, pour les fibres MM-F1 (a) et MM-F2 (b). Ces deux échantillons ont été interrogés en parallèle via deux voies distinctes du MUX relié au système d'analyse.

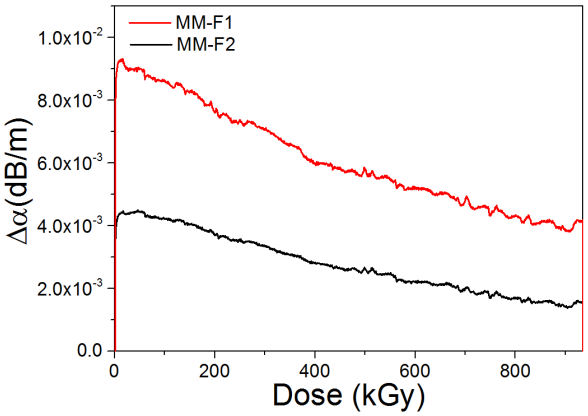


Figure 44: Evolution de l'atténuation différentielle $\Delta\alpha$ calculée à partir des mesures RDTS le long des fibres MM-F1 et MM-F2 durant leur irradiation jusqu'à la dose de 1 MGy.

On peut également remarquer que la fibre MM-F2 (dopée F) semble plus bruitée que la fibre MM-F1 (pure silice) alors que sa pente est moindre. D'après les Figure 44 et Figure 45, la fibre MM-F2 est associée à moins de Δα, mais plus de α. Nous pouvons conclure qu'une pré-irradiation des fibres optiques est une alternative intéressante car elle attenue l'ampleur du différentiel des mesures thermiques et la pente reste quasi-constante.

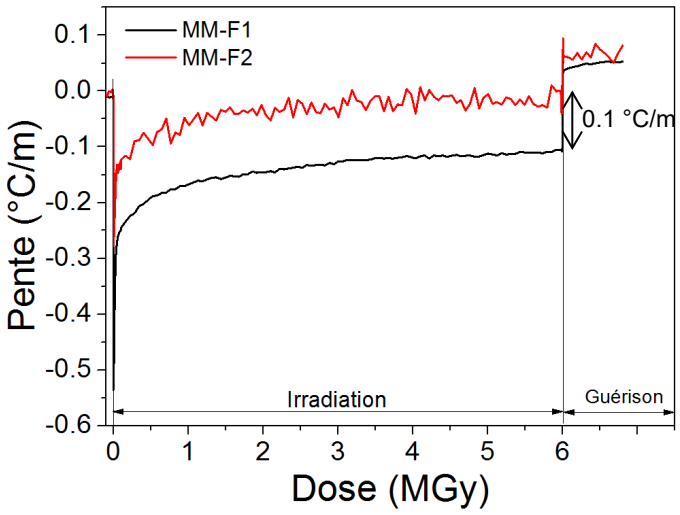


Figure 45: Variation de la pente (température/distance) induite par les radiations en fonction de la dose déposée des fibres MM-F1 (noir) et MM-F2 (rouge). Les phases d'irradiation et de guérison de la fibre sont représentées.

Mesure double-end en ligne

Dans cette section, nous présenterons les résultats de la fibre MM-F2 irradiée jusqu'à 1 MGy et acquis avec l'instrument Silixa en mode double-end. Cet essai a été réalisé en ligne et à température ambiante auprès de l'installation IRMA de l'IRSN à Saclay.

La longueur de fibre utilisée était de 35 m avec un débit de dose de 2.6 kGy/h.

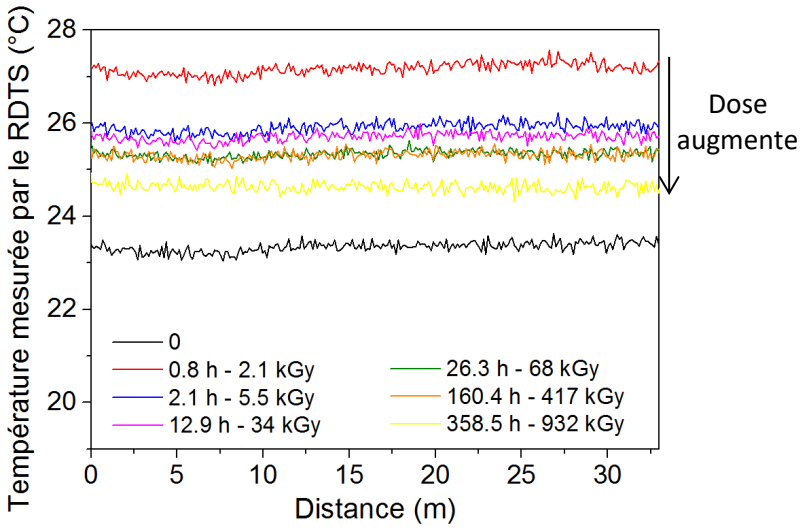


Figure 46 : Evolution de la mesure RDTS en fonction de la distance le long de la fibre MM-F2 en configuration bouclée, à température ambiante de la chambre d'irradiation et à dose déposée majorante de 1 MGy.

En configuration bouclée, la température mesurée est homogène sur toute la longueur de la fibre sensible MM-F2 avec un revêtement en acrylate (Figure 46). On note également que la température indiquée évolue de quelques degrés avec le temps d'irradiation (et donc de la dose reçue), mais aucune erreur de mesure évolutive avec la distance dans l'échantillon n'apparaît (aucune pente dans la trace Raman). L'utilisation de cette configuration permet donc de s'affranchir de l'impact négatif du $\Delta\alpha$ sur la mesure de température : ce qui représente une grande avancée en soi.

Pourtant, bien qu'aucune pente n'apparaisse, sur la Figure 46, nous constatons que la mesure de température dans la fibre optique évolue de près de 3 degrés lors de la campagne d'essai. Dans la Figure 47 (a), nous comparons la température enregistrée pendant l'irradiation avec un thermocouple de type K et celle enregistrée par le RDTS dans cette configuration double-end, en considérant des points spécifiques dans la fibre optique à 5 et 25 m. La mesure est moyennée sur une longueur de 3 m autour de de valeur cible. A noter, que la mesure initiale juste avant l'irradiation (à t= 0 h – 0 kGy) est bien à 23.4°C environ, comme dans la Figure 46 précédente : une phase de stabilisation de la température est remarquée.

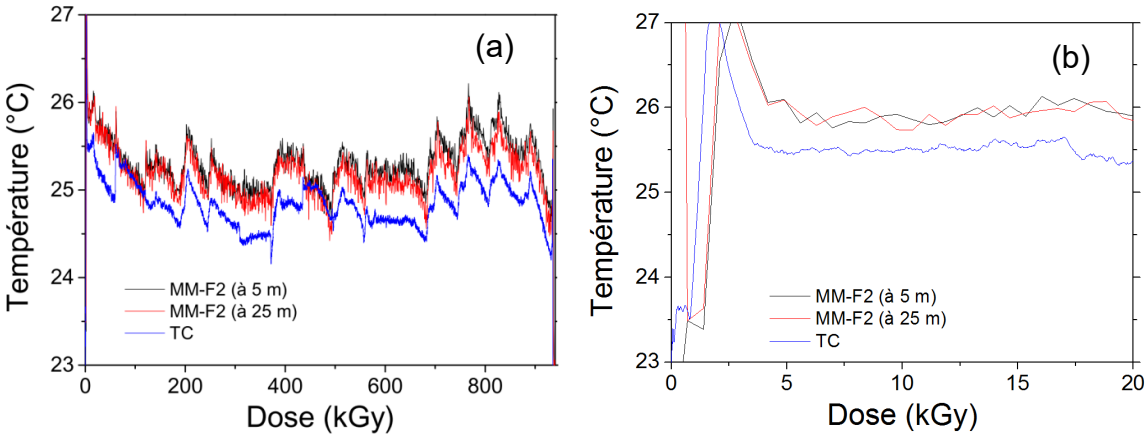


Figure 47 : (a) Comparaison entre la température mesurée pendant l'irradiation par le thermocouple et le RDTS en configuration double-end avec les fibres MM-F1 et MM-F2 (b) Zoom de cette comparaison en début d'irradiation.

La Figure 47 (a) montre que les variations de température sont bien réelles au cours de l'irradiation : les crayons de cobalt induisent de l'échauffement. Les valeurs de température mesurées par les RDTS en configuration double-end sont très légèrement supérieures à la mesure thermocouple. La faible différence (d'environ 0.5°C) est liée à la configuration initiale de l'instrument, intentionnellement choisie minimaliste alors que l'instrument permet divers ajustements pris en compte par post-traitement automatiques sur lesquels nous perdons les informations de post-traitement.

En conclusion, la configuration double-end du RDTS Silixa est capable de fournir une mesure de température correcte (c'est-à-dire à quelques degrés près) quelle que soit la dose reçue et la position le long de la fibre sensible, au prix d'une sensibilité doublée au phénomène de RIA.

4.1.2 Performances de la technologie DTS Viavi

Nous avons testé les performances du RDTS développé par Viavi Solutions. Cet instrument est équipé de deux lasers sondes, dont les longueurs d'ondes ont été judicieusement choisies (~1550 nm et ~1650 nm) [103] pour détecter les composantes Stokes et Anti-Stokes de la diffusion Raman dans une configuration single-end. Le premier laser permet d'obtenir la trace OTDR de la composante Stokes, tandis que le second laser permet quant à lui d'obtenir la composante Anti Stokes. Ceci permet outre la mesure de ces deux composantes de la diffusion Raman d'acquérir les traces OTDR, donc de remonter aux pertes linéiques, aux longueurs d'onde Stokes et Anti-Stokes.

La fibre monomode dopée F (SM-F14) a été utilisée car elle possède un revêtement acrylate. Afin de calibrer la version actuelle de l'instrumentation, en cours de développement dans le cadre de la thèse, il était nécessaire d'avoir 2 longueurs de fibres de référence à 2 températures différentes : dans notre cas, nous avons utilisé des fibres immergées pour l'une dans de l'eau froide (21°C) et l'autre dans de l'eau chaude (55°C). Les échantillons de fibre de références et la fibre sous test irradiée possèdent des longueurs respectives d'environ 40 m, 58 m et 50 m. Une fois cette procédure de calibration appliquée et validée, la fibre optique SM-F14 est employée comme capteur réparti de température. L'irradiation de cette fibre optique a été réalisée dans l'enceinte MOPERIX du Laboratoire Hubert Curien avec un débit de dose 760 mGy/s jusqu'à la dose de 60 kGy.

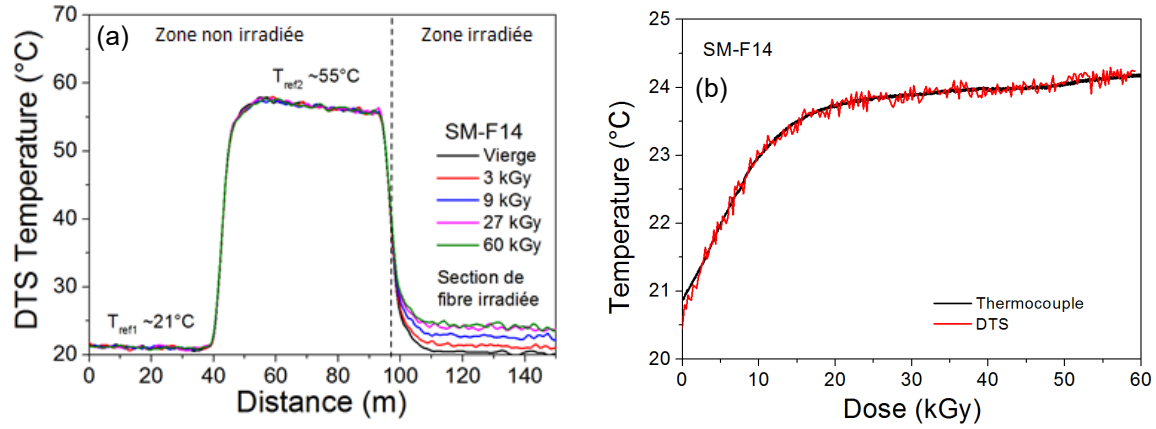


Figure 48 : (a) Température mesurée par le RDTS-Viavi en fonction de la distance dans la fibre SM-F14 durant une irradiation X à un débit de dose de 760 mGy/s. Les températures de références sont suivies avec des thermocouples de même que la température dans l'enceinte d'irradiation. (b)

Comparaison entre les températures mesurées par le RDTS et le thermocouple durant cette même campagne d'irradiation [103].

Un résultat de cette nouvelle configuration est présenté sur la Figure 48. Dans la partie (a), on retrouve clairement nos deux fibres de références dont les traces suivent parfaitement les consignes thermiques appliquées (21°C et 55°C) alors que la troisième zone (plongée dans l'enceinte de l'irradiateur) exalte une double réponse :

- Pour une dose donnée, la température est relativement constante sur l'ensemble de la longueur de la fibre sous test (entre 110 et 150 m);
- La température varie au cours de l'irradiation.

La Figure 48 (b) compare les mesures du RDTS à celles du thermocouple. Les valeurs utilisées pour le RDTS correspondent aux moyennes sur l'ensemble de la longueur de la fibre sous test (SM-F14) soit environ sur 40m. On constate que même pour une variation globale de quelques degrés (environ 3°C) pendant toute la période d'irradiation (d'une durée de 22 heures), les mesures du RDTS rejoignent parfaitement celles du thermocouple. Cette configuration associant le système RDTS-single-end de Viavi n'est pas affectée par les phénomènes de RIA ni de Delta-Alpha [104] . Si besoin est, cette expérience valide la performance du système dans sa globalité : couple de lasers d'interrogation, choix de la détection associés à la fois aux fibres de références (pour une calibration thermique) et surtout à la fibre durcie de type SM-F14. Cette solution, qui ne nécessite que l'accès à un seul bout de la fibre pourra être adaptée et appliquée aux mesures de températures dans le cadre du projet Cigéo.

4.2 Effets couplés de la température et des radiations (RDTS Silixa)

Dans cette partie, nous étudions le possible couplage entre deux paramètres : les éventuelles influences croisées de la température et de l'irradiation.

Dans Cigéo, les radiations seront permanentes pendant la période de surveillance et la température évoluera au sein des alvéoles. Or la plupart des travaux étudient l'influence de deux paramètres imposés l'un après l'autre et non pas simultanément : ainsi dans [14][15][16] des fibres pré-irradiées sont placées sous température. Pour être représentatif de l'application visée et afin de poursuivre les travaux de la littérature, nous avons étudié les effets couplés de la température et de l'irradiation in-situ c'est-à-dire pendant l'irradiation de la fibre optique [121].

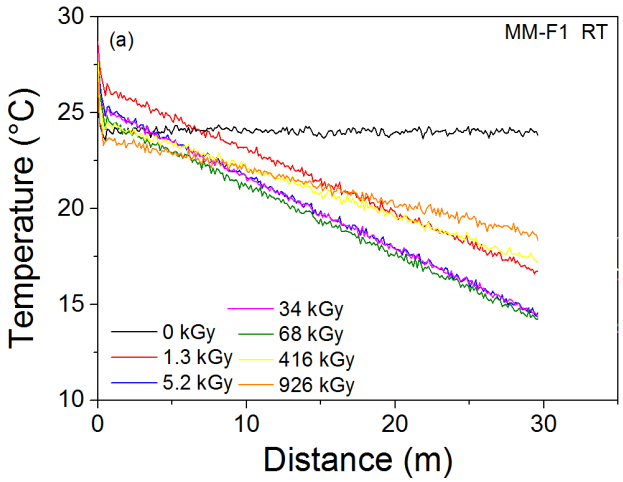
Les performances de l'interrogateur Silixa en configuration single-end exploitant la fibre MM-F1 pendant les expériences combinant irradiation et température sont présentées en Figure 49. Expérimentalement, la fibre était confinée entre des plaquettes chauffantes (cf. 2.5.3). Nous avons initié la chauffe avant le début de

l'irradiation, qui a permis d'atteindre la dose de 1 MGy avec un débit de dose de 2,6 kGy/h. La fibre MM-F1 a été privilégiée bien qu'elle soit moins performante sous radiations que la MM-F2 car son revêtement primaire en polyimide permet de réaliser des tests au-delà de 80°C.

Les valeurs de température mesurées par le RDTS sur toute la longueur de la fibre MM-F1 sont présentées sur la Figure 49 à différents temps (doses) durant l'irradiation. Différents échantillons étaient mesurés en parallèle et placés à différentes températures d'irradiation : RT (température ambiante), 50°C, 100°C et 150°C. Les résultats sont respectivement présentés dans les Figure 49(a), (b), (c) et (d).

Dans la Figure 49(a), comme attendu, nous observons clairement un effet sévère de l'irradiation sur l'échantillon irradié à température ambiante. La pente causée par le phénomène de $\Delta\alpha$ dans la fibre MM-F1 testée à RT et à 1.3 kGy de dose déposée est de -0.3 °C/m, en adéquation avec les essais présentés en Figure 45 (-0.2 °C/m).

Remarquablement, sous irradiation à 50°C, le comportement de la fibre est complètement différent de celui observé à RT ; mais est en revanche similaire à ceux relevés sous irradiation à 100 et 150°C. Les mesures RDTS à 50°C, 100°C et 150°C sont plus bruitées que la mesure à RT : ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres testées à ces températures étaient mécaniquement très contraintes entre les deux silicones chauffants (cf. 2.5.3). En sélectionnant des zones, le long de la fibre optique sous test, où la répartition thermique est relativement constante, on peut aussi relever des inhomogénéités de chauffe par les silicones conformément à la Figure 49. Ces écarts augmentent avec la température et sont de l'ordre de ~0.8°C à 50°C, 1.2°C à 100°C et 3.4°C à 120°C. Nous en déduisons que les futures expérimentations devront s'effectuer avec des échantillons moins serrés, moins comprimés dans les silicones chauffants. Les quelques degrés de fluctuations, d'incertitudes de mesure, permettent encore d'analyser les résultats sur l'influence croisée des paramètres température et radiations.



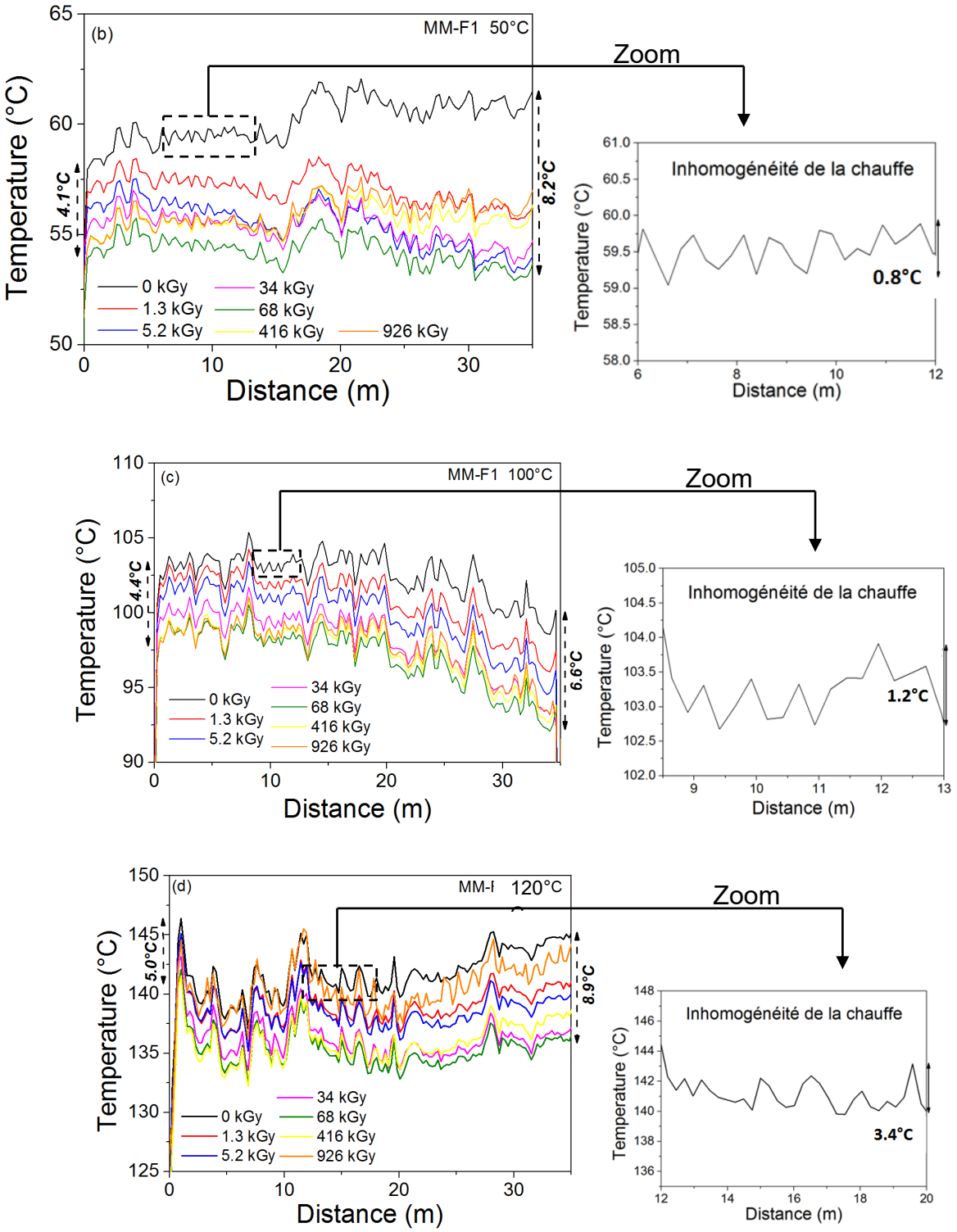


Figure 49 : Température mesurée par le DTS en fonction de la longueur de la fibre MM-F1 durant l'irradiation à différentes températures : RT (a), 50°C (b), 100°C (c) et 120°C (d) jusqu'à 1 MGy.

Dans la Figure 50 suivante, l'atténuation différentielle Δα induite par les radiations est représentée. Ces valeurs ont été estimées à partir des traces Stokes et Anti-Stokes. A température ambiante, l'atténuation différentielle induite par le rayonnement est

importante en tout début d'irradiation puis son évolution tend à baisser avec le temps et donc avec la durée d'irradiation. Le couplage des effets température et irradiation est ici très net : pour la fibre optique MM-F1, la température réduit significativement l'apparition de pertes différentielles aux longueurs d'onde Stokes et Anti-Stokes (pour un instrument fonctionnant à 1064nm).

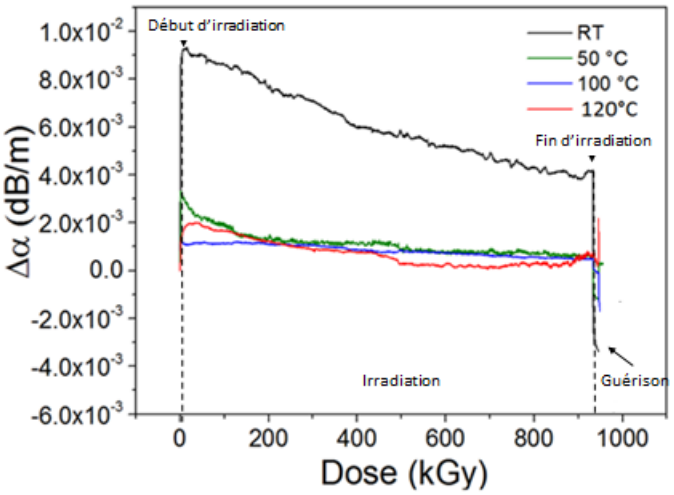


Figure 50 : Evolution de l'atténuation différentielle calculée à partir des résultats DTS utilisant la fibre MM-F1durant l'irradiation allant jusqu'à environ 1MGy.

A la fin de l'irradiation, vers 950 kGy, l'arrêt de l'irradiation est nettement visible : il était impératif de réaliser des mesures en ligne (et ne pas se contenter d'essais post-mortem) pour rendre compte du vieillissement de systèmes de surveillance d'alvéoles de stockage où les déchets imposent des impacts thermiques et radiologiques et où l'on souhaite fournir une mesure fiable de température.

Malgré des difficultés expérimentales pour réaliser un essai couplant simultanément deux paramètres, ici température et irradiation, nous avons montré très nettement que la température améliore significativement la tenue aux radiations des systèmes fondés sur la rétrodiffusion Raman.

4.3 Conclusion sur la vulnérabilité de la rétrodiffusion Raman

Ce chapitre a permis d'étudier les performances de certaines technologies RDTS Raman et leurs réponses face aux effets couplés ou non des paramètres 'température' et 'radiation'. Les principaux résultats peuvent se résumer en :

- Nous confirmons que les réponses DTS en mode ‘single-end’ sont fortement influencées par l’irradiation. Les défauts ponctuels induits dans la fibre modifient, à travers la RIA, la réponse du capteur DTS en causant une erreur de mesure en température et en dégradant le rapport signal-sur-bruit. La RIA limite la distance sensible de notre capteur. La $\Delta\alpha$ affecte fortement la qualité de la mesure de température par RDTS. Cette erreur de mesure augmente avec la longueur de fibre optique. Même avec une fibre dopée F, l’erreur sur la mesure de température dépasse la dizaine de degrés en quelques centaines de mètres ce qui est rédhibitoire pour un système de surveillance d’alvéoles de stockage de déchets radioactifs.
- La fibre dopée MM-F1 a été étudiée sous radiation γ à différentes températures (RT, 50°C, 100°C et 120°C) en configuration single-end. L’effet négatif des radiations sur les fibres optiques est plus important à température ambiante qu’aux trois températures supérieures étudiées. Pour les fibres testées l’effet couplé entre la température et les radiations s’avère très favorable et améliore les performances de mesure de température Raman, notamment en diminuant le $\Delta\alpha$. Des difficultés expérimentales empêchent de quantifier l’impact sur la portée de mesures ainsi que sur leurs robustesses et/ fiabilités des mesures. Cet aspect (très intéressant) mérite d’être vérifié. Un soin particulier devra être apporté sur les systèmes de températures afin de garantir une répartition thermique relativement homogène sur la totalité de la longueur de la fibre sous test, tout en réduisant les effets générés par les contraintes mécaniques (notamment leur non-uniformité spatiale).
- La configuration double-end du RDTS Silixa est capable de fournir une mesure de température correcte (c’est-à-dire à quelques degrés près) quelle que soit la dose reçue et la position le long de la fibre sensible. Toutefois, dans cette configuration la portée est réduite de moitié.
- L’architecture de capteur Raman développée par Viavi, à deux longueurs d’ondes spécifiques adaptées aux réponses Stokes et anti-Stokes, permet d’obtenir la meilleure mesure sous irradiation. Cet interrogateur, fonctionne en mode single-end, et permet de contrecarrer l’impact négatif de $\Delta\alpha$ tout en limitant l’impact de la RIA sur la portée de la mesure.

Pour notre application Cigéo, l’interrogateur Raman reste un élément intéressant pour la chaine de mesure de température. En l’état des connaissances, la solution la plus prometteuse est une architecture d’interrogateur à double longueur d’onde de pompe (par exemple, le RDTS Viavi) associé avec une fibre durcie pour minimiser l’impact de la RIA et de s’affranchir de l’influence de $\Delta\alpha$.

Chapitre 5: Réponse de l'interrogateur Rayleigh

Dans ce chapitre, les performances de capteurs à fibre optique de température et de déformation basés sur la diffusion Rayleigh sont étudiées en environnement sévère. En particulier, les influences de quatre paramètres : température, radiation, déformation et hydrogène sont caractérisées. La technologie TW-COTDR utilisée par l'instrument Neubrex [23] est évaluée dans des conditions représentatives de notre application Cigéo, c'est-à-dire lorsque les effets de ces paramètres sont combinés : effets couplés hydrogène/radiation, déformation/radiation, température/radiation. Nous présenterons également la comparaison des performances de la technologie TW-COTDR sous radiations avec celles d'un autre instrument Rayleigh de technologie OFDR de Luna Technology [25].

5.1 Influence du choix de l'instrument de mesure Rayleigh

Différents instruments exploitant la signature Rayleigh des fibres optiques ont été développés pour la mesure répartie de température et/ou de déformation. En fonction des objectifs visés en termes de résolution spatiale et de sensibilité, deux principales architectures de capteurs ont été disponibles dans le cadre de cette thèse. Nous comparons les performances de ces deux architectures de capteurs à fibre optique basés sur la signature Rayleigh des fibres sous test [128]: l'instrument OBR4600 de Luna [25] basée sur une technique de réflectométrie optique dans le domaine fréquentiel (Optical Frequency Domain Reflectometry ; OFDR) et l'instrument NBX-7000 de Neubrex [23] exploitant la technologie TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domaine Reflectometry). Ces instruments se différencient par leurs caractéristiques. En effet si l'instrument OBR4600 permet d'acquérir la trace Rayleigh avec une résolution spatiale millimétrique, celle du Neubrex est de l'ordre de 2 cm. En revanche, cet appareil, qui combine à la fois des mesures Rayleigh et Brillouin, permet la discrimination des effets de déformation et de température sur une fibre unique, ce que ne permet pas l'appareil OBR4600. Afin de mener une comparaison entre les effets des radiations sur la capacité de mesure de ces appareils, il a été choisi de fixer les mêmes paramètres de mesure pour chaque instrument: un pas spatial de 2 cm et une résolution spatiale de 2 cm, ce qui est obtenu en utilisant pour la source accordable une plage fréquentielle de mesure de 194000 à 194500 GHz avec un pas de 1 MHz (annexe F). Il est à noter que les performances de l'instrument Neubrex utilisant la technologie TW-COTDR dépendent de cette plage de mesure et de la résolution fréquentielle choisie (c'est-à-dire le pas fréquentiel). Nous avons ensuite pour une même fibre optique comparé les coefficients de sensibilité en température et en déformation de ces deux technologies d'interrogateurs. Après cette phase de calibration, une expérimentation a été menée sous irradiation X au LabHC pour mettre en évidence l'influence d'une irradiation de la fibre optique sur les

performances de ces deux catégories d'interrogateurs Rayleigh. Pour ces essais et pour chaque technologie, la mesure repose sur la détermination du décalage de fréquence Rayleigh, obtenu par corrélation, entre une mesure de référence avec celles réalisées en variant soit la température, soit la déformation, soit les deux paramètres simultanément. Dans ce dernier cas, comme la différence de fréquence Rayleigh $\Delta\upsilon$ dépend à la fois de la déformation appliquée, donc de la déformation de la fibre, $\Delta\varepsilon$, et de la variation de température ΔT, il n'est pas possible pour les deux technologies Rayleigh sous test de directement discriminer les contributions relatives de ces deux paramètres.

5.1.1 Comparaison des performances des technologies OFDR et TW-COTDR pour la mesure de température ou de déformation

Les solutions techniques, présentées au Chapitre 2:, permettant de calibrer la sensibilité d'une fibre optique à des changements de température ou de déformation ont été utilisées pour déterminer la réponse de la fibre germanosilicate SMF28 de Corning avec les deux technologies d'interrogateurs.

Nous commencerons par calibrer, en fonction de la température (à contrainte fixe), les réponses Rayleigh de cette fibre optique. Pour cela, sept températures ont été successivement appliquées à la fibre optique avec une rampe de température de 10°C/min : 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C et 90°C. Les réponses des technologies OFDR de Luna et TW-COTDR de Neubrex ont été comparées et suivies par des mesures témoins réalisées avec un thermocouple de type K. En traçant l'évolution de la différence de fréquence Rayleigh (la référence étant acquise à la température stabilisée de 30°C) en fonction de la température mesurée par le thermocouple, il est possible de déterminer le coefficient de sensibilité en température de la fibre testée (cf. Figure 51). Ces coefficients sont : 1.29 GHz/°C pour l'OFDR et 1.30 GHz/°C pour le TW-COTDR [105]. Ces valeurs sont totalement cohérentes mais légèrement plus faibles que celle utilisée dans la littérature (1.5 GHz/°C) [43]. Il est également très intéressant de constater que ce coefficient de calibration s'ajuste aux mesures thermiques tout au long de la fibre, et ce pour les deux technologies d'interrogateurs. Ceci est illustré sur la Figure 52(a) qui représente la distribution spatiale de la température mesurée le long de la fibre en appliquant les coefficients déterminés, pour les instruments TW-COTDR et OFDR.

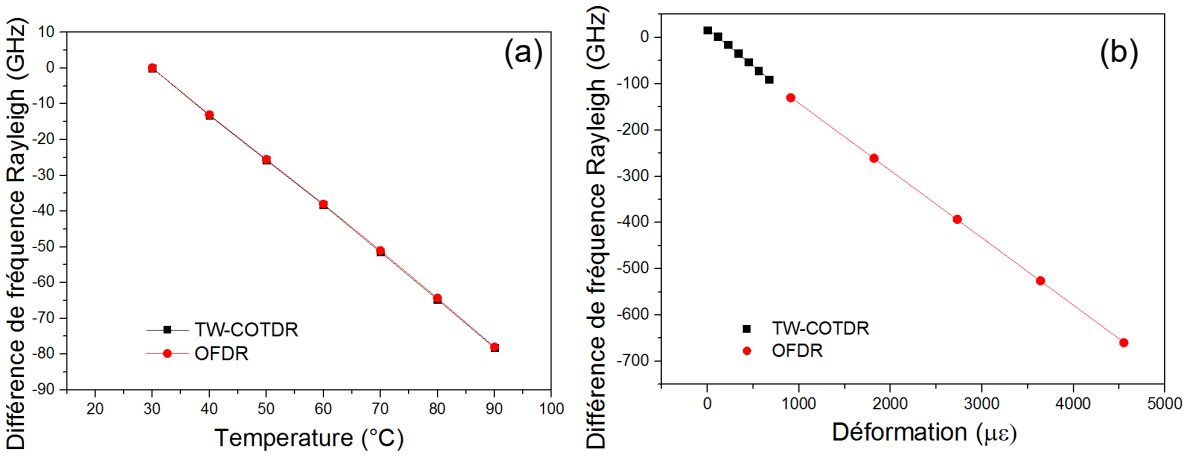


Figure 51: Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la température (a) et de la déformation appliquée (b) pour la fibre SMF28corning : les mesures réalisées par l'OFDR et le TW-COTDR sont respectivement en rouge et en noir [105]

Sur toute la longueur de fibre (1 mètre), la différence de température observée sur le palier le moins favorable à 90°C entre la valeur donnée par le thermocouple et celle fournie par le capteur OFDR est plus faible que celle mesurée par la technologie TW-COTDR. En effet, l'écart entre les valeurs du thermocouple et de l'OBR4600 varie entre 0.01 et 0.75°C avec une valeur moyenne de 0.24°C tandis que pour le Neubrex cet écart varie de 0.01 à 0.91°C avec une valeur moyenne de 0.41°C. Cette différence met en exergue les variations entre les 2 lignes distinctes de mesure (OFDR et TW-COTDR). En revanche, l'analyse de ces résultats montre que la dispersion des mesures OFDR (variant de 0.17 à 2.10 GHz équivalent à la plage de température de 0.16 à 1.22°C) est plus importante que celle des mesures TW-COTDR (variant de 0.50 à 1.50 GHz équivalent à la plage de température de 0.77 à 1.14°C). Ces dispersions légèrement différentes peuvent s'expliquer par des temps d'acquisition et de traitement des données différents. En effet, la technique OFDR réalise plusieurs mesures successives (~1 min pour une résolution de 2 cm) durant le temps nécessaire à l'acquisition d'une unique mesure TW-COTDR (~20 min pour une résolution de 2 cm). Cependant, quelle que soit la température, les résultats fournis par les deux instrumentations restent très proches : à titre d'exemple, la différence entre les températures mesurées par les techniques OFDR et TW-COTDR est de -0.10°C à 30°C et de 0.43 °C à 90°C. L'écart croît avec la température.

Un travail de calibration pour déterminer le coefficient de sensibilité en température de la fibre SMF28 de Corning pour les instruments de technologies OFDR et TW-COTDR. Les mesures ont été réalisées sur le même échantillon de fibre de 8m environ. Les points se superposent parfaitement. La Figure 52 représente la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la température appliquée. Le coefficient de sensibilité en température mesurés pour la fibre SMF28 est de 1.30 GHz/°C quelle que soit la technologie testée.

Un travail de calibration similaire a été réalisé pour déterminer le coefficient de sensibilité en déformation de la fibre SMF28 de Corning pour les deux instruments. Les longueurs de fibres testées en OFDR et TW-COTDR sont respectivement de 8 m et 0.5 m, cela explique la différence de gamme de déformation. La Figure 51(b) représente la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la déformation appliquée. Les coefficients de déformation mesurés pour la fibre SMF28 sont très cohérents et valent respectivement : 0.15 GHz/με pour l'OFDR et 0.16 GHz/με pour le TW-COTDR [105].

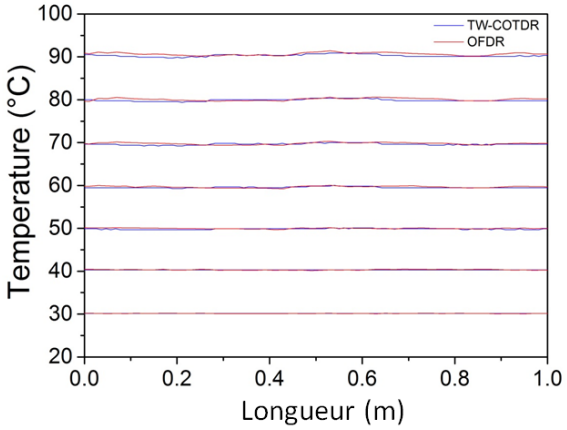


Figure 52 : Evolution des températures en fonction de la longueur de la fibre SMF28corning : les mesures réalisées par l'OFDR et le TW-COTDR sont respectivement en rouge et en bleu.[105]

5.1.2 Comparaison des performances des OFDR et TW-COTDR sous radiation

Après avoir montré que les deux appareils possèdent des performances quasiment identiques lorsqu'ils sont utilisés avec des paramètres proches (dont la résolution spatiale de 2 cm, explicitée en annexe F), nous avons étudié les effets induits par une irradiation de la fibre sur la capacité des deux instruments à mesurer la température et/ou la déformation. La comparaison entre la vulnérabilité aux radiations des technologies OFDR de Luna et TW-COTDR de Neubrex est présentée en Figure 53(a), pour une fibre germanosilicate (SM-Ge14) exposée aux rayonnements X de l'irradiateur MOPERIX (dose ~ 1 MGy, débit de dose ~ 4.3 Gy/s) avec l'aide d'un switch optique.

Les variations de fréquence Rayleigh des deux technologies en fonction du temps d'irradiation sont présentées sur la Figure 53(b). Les mesures présentées sont corrigées des fluctuations de température mesurées dans la chambre d'irradiation grâce à un thermocouple. Il n'est en revanche pas possible dans la configuration (2cm de résolution spatiale, longueur de fibre de ~10 m) utilisée pour ces tests de

s'affranchir de possibles évolutions sous irradiation ou en température du conditionnement de la fibre sous test.

Au cours de l'irradiation X et au début de la guérison (post-irradiation), les réponses des instruments OFDR et TW-COTDR se superposent parfaitement, il est donc démontré que ces deux instruments se comportent de manière très proche lorsque la fibre sensible est irradiée.

Sur la Figure 53, durant le début de l'irradiation, les décalages en fréquence peuvent être interprétés comme des effets thermiques de l'ordre de 4-5°C suivis d'une évolution plus lente atteignant la dizaine de degrés au bout de 60 h d'irradiation (pour une dose cumulée de l'ordre de 1 MGy).

On peut remarquer que l'incertitude liée à la mesure OFDR, représentée par les barres d'erreur, évolue peu au cours de l'irradiation (jusqu'à~ 3-4 GHz), contrairement à celle de la mesure TW-COTDR qui augmente au cours de l'irradiation de 2 à 5 GHz. Ces barres d'erreur sont les moyennes le long de la fibre à un temps donné, les mesures sont faiblement bruitées au cours de l'irradiation.

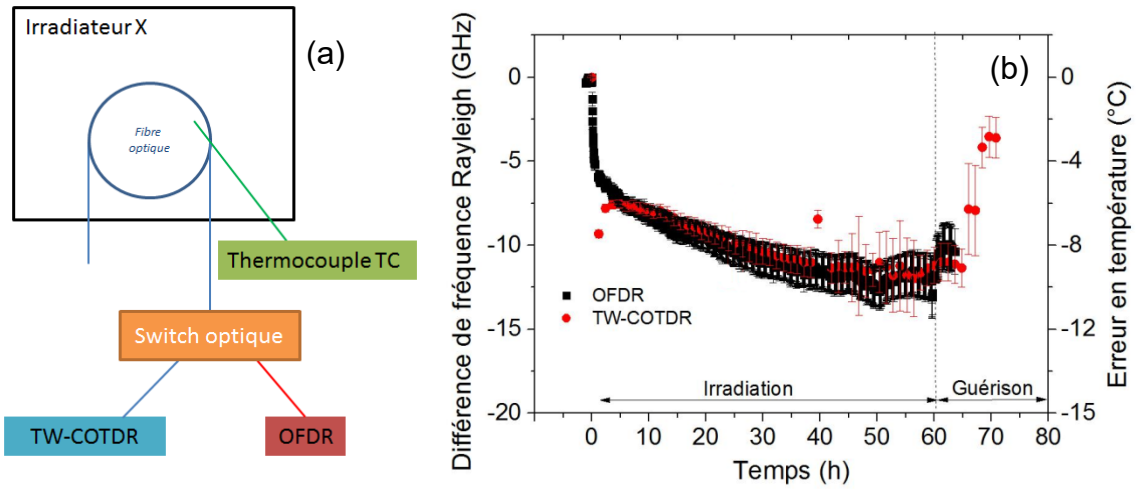


Figure 53: (a) Schéma du montage de comparaison des technologies Rayleigh OFDR et TW-COTDR sous radiation X avec un switch optique. (b) Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la dose déposée allant jusqu'à 1000 kGy pour la fibre SM-Ge14 : les mesures réalisées par l'OFDR et le TW-COTDR sont respectivement en noir et en rouge.

Cette expérience montre que les deux équipements possèdent des performances comparables pour instrumenter une fibre optique soumise à un flux radiatif. Ils sont complémentaires du point de vue de leurs spécificités : dans un environnement hors irradiation ; l'un est plus rapide tandis que l'autre à travers sa capacité à combiner des mesures Rayleigh et Brillouin permet de discriminer température et déformation sur une seule fibre. Les fiabilités de ces instruments en environnement radiatif, sont également comparables et leur utilisation dépend du cahier des charges de l'application visée : l'un donne des barres d'erreur de mesure plus petites, tandis que l'autre est plus performant sur la durée.

5.2 Effets des radiations sur les fibres optiques

Dans le paragraphe 2.1.4, nous avons introduit les effets des radiations sur les réponses d'un interrogateur Rayleigh de type OFDR (OBR4600 de Luna). Deux principaux effets sont à noter : Après une dose reçue de 10 MGy, la RIA limite la gamme de sensibilité et la portée du capteur OFDR en dégradant le rapport signal/bruit [73][74][75][76][77]. Les coefficients de température et de déformation restent inchangés après des irradiations allant jusqu'à 10 MGy de dose accumulée [77], en particulier si des prétraitements thermiques sont appliqués à la fibre optique en vue de stabiliser son revêtement face aux radiations. Les expérimentations détaillées ci-après visent à compléter ces précédentes études, en effectuant des mesures en ligne sur différentes catégories de fibres optiques avec le Neubrex d'abord à un débit de dose de 370 Gy/h [114] et ensuite à un débit de dose plus élevé jusqu'à une dose cumulée de 10 MGy correspondant à celle attendue en 100 ans dans les alvéoles de stockage de déchets HA1 et HA2 dans Cigéo [123] .

Mesure en ligne

Les effets d'une irradiation gamma continue sur la réponse des capteurs sont présentés pour les échantillons SM-Ge14, SM-F14 et SM-N, irradiés gamma jusqu'à 56 kGy à IRMA (IRSN) et jusqu'à 10 MGy à Brigitte (SCK-CEN) [88].

Les échantillons sont des fibres contraintes sur tubes, comme expliqué dans la partie 2.5.5. Cependant, comme le signal de référence Rayleigh a été réalisé après les bobinages contraints des échantillons, il n'est pas possible de détecter par TW-COTDR les différentes zones de contrainte le long des fibres sous test (sauf à débobiner et détruire les échantillons après l'essai ou de reprendre l'essai sur d'autres échantillons l'un contraint et l'autre libre). Néanmoins, nous connaissons les longueurs des différents tronçons de fibre bobinés à différentes tensions et l'objectif de cette expérience est de suivre en temps réel les évolutions des réponses optiques de l'interrogateur en cours d'irradiation sur un même support de fibre qui combine aussi des contraintes mécaniques.

La Figure 54 illustre l'évolution du décalage de la fréquence Rayleigh en cours d'irradiation lors de deux campagnes distinctes : l'une à IRMA (Saclay) avec un débit de dose de 370 Gy/h tandis que la seconde a été conduite auprès de l'irradiateur Brigitte (Mol) avec un débit de dose de 14.95 kGy/h. Ces évolutions mettent en exergue l'influence des conditions d'irradiations sur les réponses des fibres sous tests.

En pratique et pour une dose donnée, la répartition des réponses Rayleigh tout le long de la fibre optique permet de :(i) remonter à la mesure de la fréquence Rayleigh

centrale (et par conséquent au décalage par rapport à la référence), (ii) accéder à la dispersion des mesures tout au long de la ligne et donc à l'évaluation de la barre d'erreur pour cette dose: $barre\ d'erreur = \pm 2\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ avec σ, l'écart-type et n, le nombre de mesures (n ~ quelques centaines). Elle reflète l'homogénéité de la mesure sur une longueur de 3 m de l'échantillon considéré.

Les résultats IRMA (à débit de dose représentatif) sont reportés dans la Figure 54(a) qui donne l'évolution du décalage Rayleigh en fonction de la dose pour les trois types de fibres optiques. Pour les fibres dopées F et N, le décalage spectral Rayleigh varie de 0 (acquisition de la référence) à environ 3 GHz. Pour la fibre dopée Ge, le décalage est de l'ordre de -3 GHz, en considérant le point à 55 kGy, comparables aux autres fibres. On peut également noter que la fibre dopée Ge montre une différence de fréquence négative, en opposition aux fibres dopées F et N. Des mesures de calibration en température de ces fibres optiques ont fourni des coefficients de sensibilités valant 1.39 GHz/°C, 1.27 GHz/°C et 1.28 GHz/°C pour les fibres Ge, N et F, respectivement. Cela implique que les variations observées sous irradiation, si elles sont interprétées en tant que fluctuations de température, représenteraient moins de 3°C d'erreur. La mesure de température ou de déformation par rétrodiffusion Rayleigh semble donc peu impactée par l'utilisation en milieu radiatif à ces faibles niveaux de dose et de débit de dose.

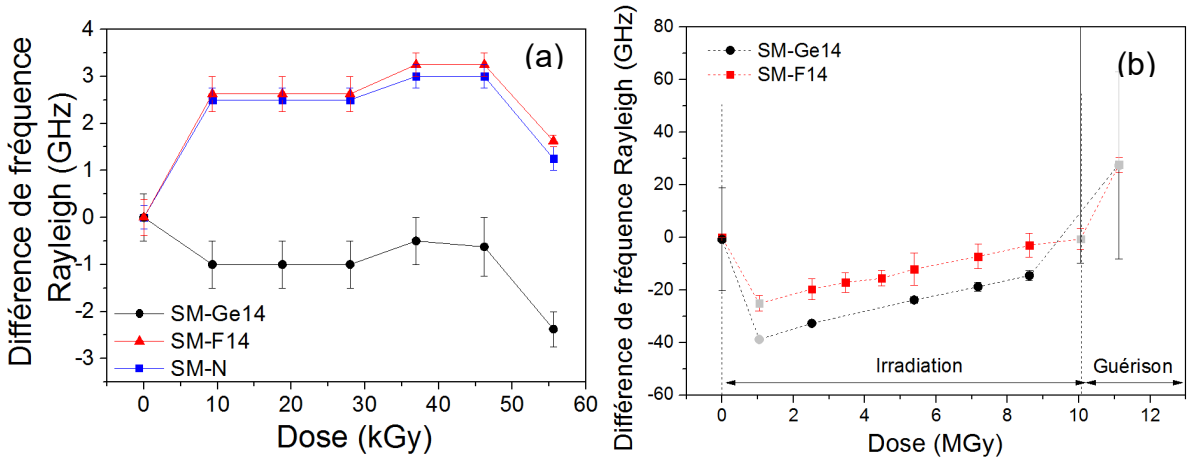


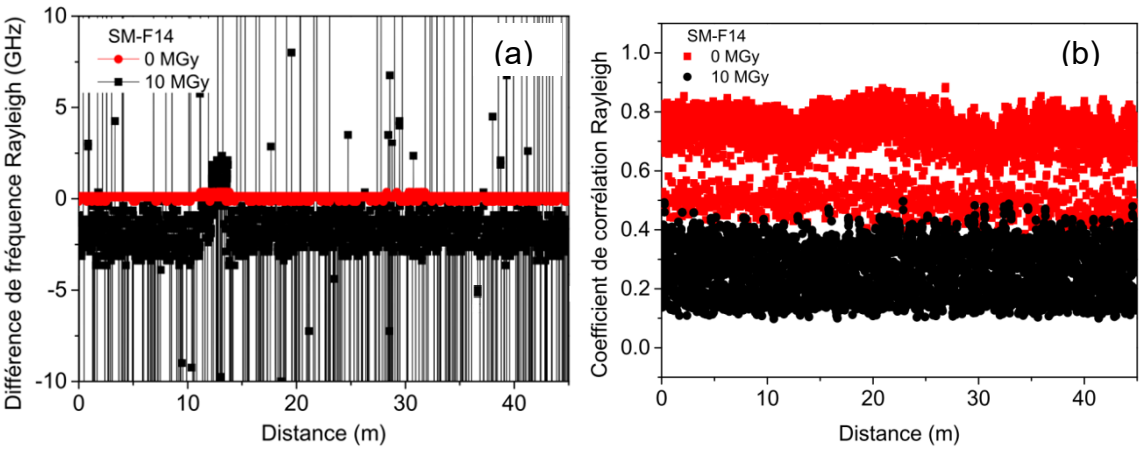
Figure 54: Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la dose déposée, sur deux campagnes d'irradiation distinctes (a) avec un débit de dose de 370 Gy/h sur les fibres SM-Ge14, SM-F14 et SM-N, (b) avec un débit de dose de 14.95 kGy/h (une dose de 10 MGy) sur les fibres SM-Ge14 et SM-F14

Pour l'irradiation à fort débit de dose, pour les fibres dopées F et Ge, les différences de fréquence Rayleigh varient respectivement de 19 à -3 GHz et de -32 à -15 GHz au cours de l'irradiation entre 2 et 8.5 MGy, ce qui, cette fois, est une variation importante. Si nous étudions les mesures aux doses extrêmes reçues (1 MGy), à la guérison (10 et 11 MGy) et au cours de l'irradiation (entre 2 et 8 MGy), afin de vérifier

la validité des mesures grâce au coefficient de corrélation Rayleigh (cf. 3.2.2.2 et 3.2.2.3) :

- A 1 MGy, malgré la barre d'erreur faible qui est indépendant du coefficient de corrélation, ce dernier était trop faible (<0.5) pour accorder du crédit au décalage de -40GHz observé sur la Figure 54(b).
- De même, la qualité de la corrélation n'est pas suffisante (<0.5) pour que les mesures de guérison soient significatives.
- En revanche, entre 2 MGy et 8 MGy la corrélation était de bonne qualité (>0.5). Nous avons alors observé 15 GHz de variation dans ces 6 MGy d'irradiation (entre 2 et 8 MGy).

Au final, la procédure choisie pour ces essais souffre de la méthode de corrélation utilisée. Certaines mesures sont peu exploitables. Elles indiquent des décalages de fréquences Rayleigh de plus de 10 GHz, ce qui devient important par rapport à l'incertitude de mesure recherchée pour la surveillance de Cigéo. La bonne qualité de mesure repose sur les conditions de manipulation, de mode d'acquisition et d'analyse/traitements des données. En effet, les mesures devront être corrélées deux à deux et non plus avec une trace de référence.



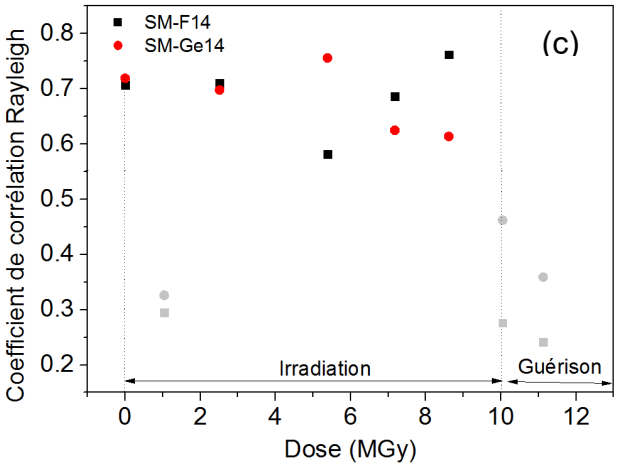


Figure 55: (a) Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la longueur de l'échantillon SM-F14 pour les doses reçues de 0 MGy et 10 MGy. (b) Coefficient de corrélation Rayleigh en fonction de la longueur de l'échantillon SM-F14 pour les doses reçues de 0 MGy et 10 MGy. (c) Coefficient de corrélation Rayleigh en fonction de la dose déposée représentative de 10 MGy pour les fibres SM-Ge14 et SM-F14.

5.3 Effets de l'hydrogène sur les fibres optiques

Dans le chapitre 2.3, nous avons vu l'impact d'une incorporation d'hydrogène sur les propriétés des fibres optiques et des capteurs à fibres optiques. Outre un changement d'indice du verre lié à la présence du gaz, l'hydrogène peut interagir avec des défauts ponctuels, passivant certains types de centres mais favorisant par exemple l'apparition de groupements hydroxyls (SiOH) dans la fibre optique [57][62][64] . Si ces interactions sont déjà bien connues, l'effet de l'hydrogénation dans la fibre utilisée en tant qu'élément sensible sur les performances d'un capteur TW-COTDR n'était pas encore reporté en début de thèse. Ce paragraphe décrit l'approche retenue pour caractériser ces effets et présente les principaux résultats acquis.

La Figure 56 présente l'impact de la désorption de l'H_2, par conséquence la mesure de référence Rayleigh a été réalisée sur les fibres déchargées (après la désorption H_2). La fréquence Rayleigh augmente de 120 GHz durant la désorption de l'hydrogène, quelle que soit la fibre optique et ses dopants. La seule différence observée est la cinétique de diffusion, plus rapide dans les fibres dopées F, ce qui est cohérent avec la littérature [87]. Nos conditions d'hydrogénation (25°C et 110 bars pendant 2 semaines) permettent d'atteindre une concentration de saturation H_2 d'environ 450 mol/m^3 (1.22 %mol) dans la silice.

Ces décalages de fréquence Rayleigh sont importants vis-à-vis d'une mauvaise interprétation en mesure de température (environ 80°C) ou de déformation (environ 80 με). Cependant, avec un revêtement primaire en carbone, la migration de l'hydrogène dans la silice constitutive des fibres optiques peut être empêchée et la nuisance écartée.

Le décalage de fréquence Rayleigh est induit par la variation d'indice Δn dû à la présence d'hydrogène et l'ensemble peut être décrit par l'équation (cf chapitre 2) [57]. Une approximation de l'indice $n_{initial}$ par rapport à n (t) est à noter.

$$\frac{\Delta n}{n_{(t)}} = -\frac{\Delta \upsilon_R}{\upsilon_R} \qquad \textit{(Équation 20) [64]}$$

L'indice de réfraction n varie de 9.10^{-4} au cours de la désorption. Avec le modèle simplifié choisi, les tendances de la courbe calculée à partir de l'équation sont en accord avec les mesures, sauf pour la cinétique permettant des prédictions précises de la variation d'indice induit par la out-diffusion d'hydrogène dans la silice. De plus, ces résultats sont en accord avec les mesures Rayleigh réalisées par S. Leparmentier [57] sur une fibre G652 : l'indice de sa mesure varie d'environ 10.10^{-4} pour une concentration d'H_2 de1.22 %mol (hydrogénation à 110 bars, à température ambiante pendant 2 semaines).

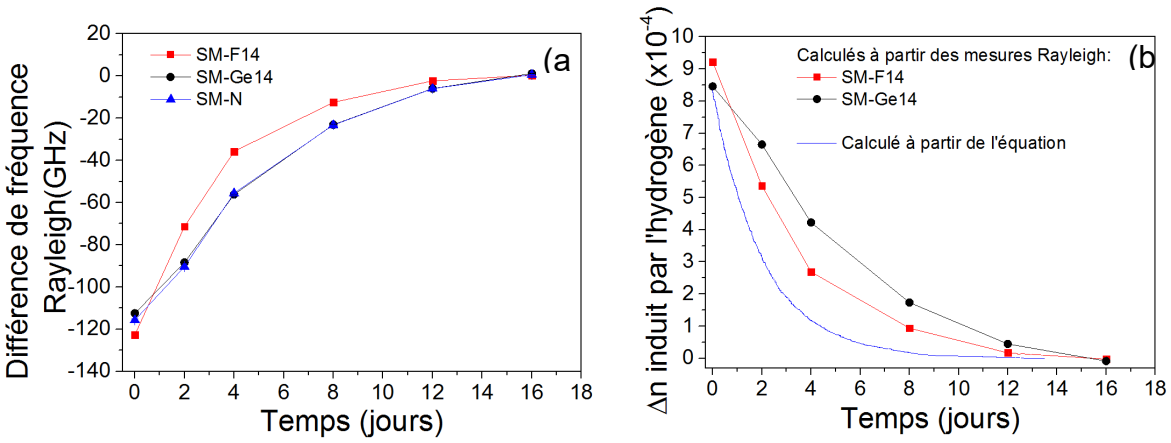


Figure 56 : (a)Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction du temps de désorption d'hydrogène dans les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N vierges. (b) Variation d'indice induit par H_2 dans les conditions : à température ambiante et à pression atmosphérique.

Ces variations d'indice de réfraction sont utiles pour cerner l'impact de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Rayleigh. Dans la pratique, il faudra distinguer le décalage en fréquence dû à de l'hydrogène mais aussi son action sur l'indice de réfraction qui altèrera la location spatiale des évènements le long de la fibre optique lors de mesures réparties.

5.4 Effets couplés de l'hydrogène et des radiations

Dans les précédentes parties, nous avons reporté les résultats liés aux effets indépendants des radiations et de l'hydrogène sur la réponse de l'interrogateur Rayleigh, dans cette partie actuelle, nous présenterons les effets combinés des radiations et de l'hydrogène. La désorption de l'hydrogène au cours d'une irradiation

γ et sur des échantillons pré-irradiés à 10 MGy (en post-mortem) a été étudiée sur les fibres dopées Ge et F.

Mesures en ligne

La Figure 57(a) illustre la différence de fréquence Rayleigh pendant l'irradiation γ (campagne de Mol) d'un échantillon subissant en même temps la désorption de l'hydrogène. Notons T_0 l'instant où les échantillons ont été sortis du réservoir à hydrogène, T_1 le début de l'irradiation et T_2 la fin de l'irradiation. Entre T_0 et T_1 se sont écoulées quelques heures seulement, si bien que les fibres étaient encore fortement chargées en hydrogène à T_1. L'irradiation a duré 27 jours, quand une désorption dure quelques jours environ.

Les mesures de référence de Rayleigh sont effectuées sur la fibre non irradiée et chargée en H_2 (avant irradiation - Figure 57(a)) afin de mettre en évidence l'impact des rayons γ.

Les incertitudes sont évaluées selon le même protocole cité précédemment et basées sur les dispersions des mesures le long de quelques mètres d'échantillons.

Comme illustré dans la Figure 57 (a), pour les deux fibres étudiées, nous observons trois phases: (i) entre 0 et 1 MGy, la différence de fréquence Rayleigh diminue à -70 GHz, (ii) entre 1 et 6 MGy, la différence de fréquence Rayleigh est quasi-constante autour de -60 GHz pour la fibre dopée Ge et ~ -100 GHz pour la fibre dopée F, (iii) après irradiation et pendant la guérison, la différence de fréquence Rayleigh est stable pour le fibre F, et semble diminuer pour la fibre Ge.

Une tendance similaire est observée lors de l'irradiation des mêmes fibres mais non hydrogénées (cf. Figure 57 (b)) et on relève aussi les deux phases: (i) entre 0 et 1 MGy, la différence de fréquence Rayleigh atteint les -20 GHz et -40 GHz (pour les deux fibres respectivement), (ii) entre 1 et l'arrêt de l'irradiation, où les tendances sont différentes, les différences de fréquences diminuent et remontent vers des valeurs nulles.

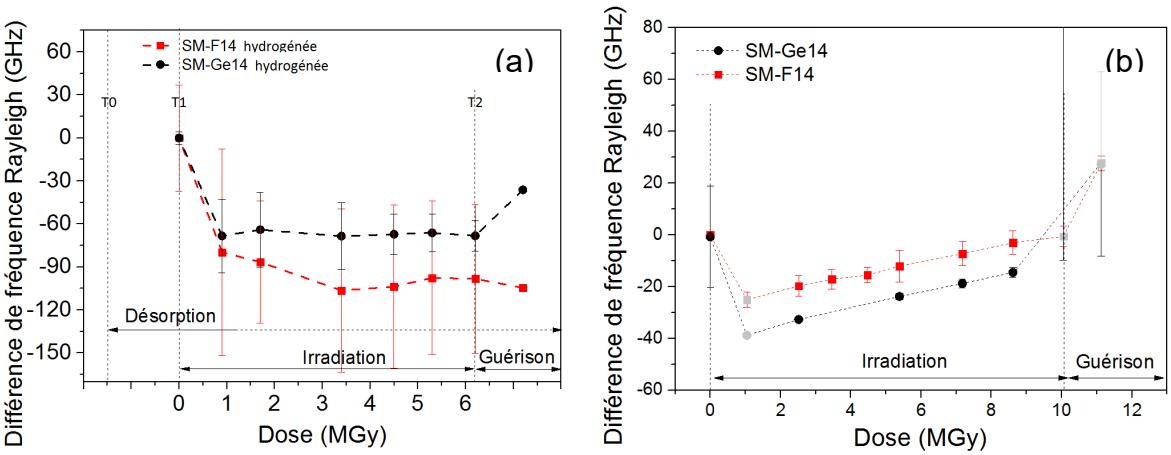


Figure 57 : Différence de fréquence Rayleigh (a) en fonction de la dose reçue pour les fibres décontraintes chargées en H_2, dopées F et Ge durant l'irradiation jusqu'à 6 MGy. La mesure de référence est prise à T_0 (sans irradiation). (b) Rappel de la Figure 54 (b) (sans H_2)

Mesures post-mortem

La Figure 58 présente l'impact de la désorption d'hydrogène sur des mesures Rayleigh réalisées sur des fibres dopées F et Ge ayant subies une pré-irradiation gamma à 10 MGy. Pour comparaison, cet impact sur les fibres non irradiées est également rappelé sur cette même figure. Les cinétiques d'évolution de la fréquence Rayleigh sont identiques dans les 2 configurations : aucun impact de la pré-irradiation sur la signature Rayleigh associée à la présence d'hydrogène n'est noté.

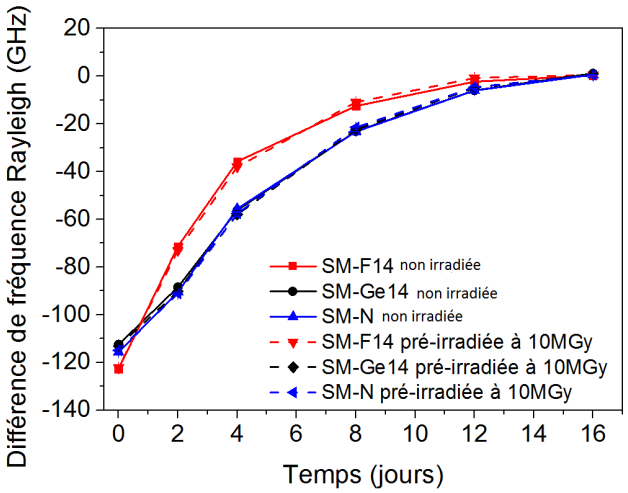


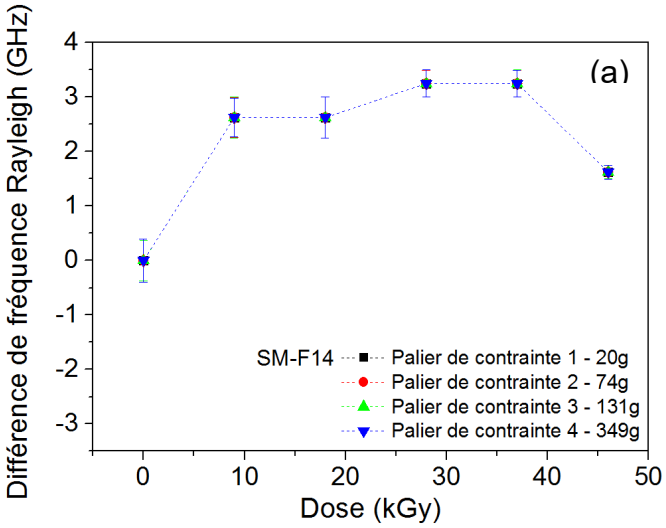
Figure 58: Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction du temps de désorption pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N pré-irradiées à 10 MGy et non irradiées.

5.5 Effets couplés de la déformation et des radiations

Il est bien connu qu'une perturbation liée à un changement de contrainte se répercute sur la réponse Rayleigh de la fibre optique sous test [80]. Nous avons vu précédemment les effets des radiations sur la réponse de l'interrogateur Rayleigh. Dans cette partie, nous étudions les effets combinés de la déformation et des radiations, étude rendue possible par la nature du conditionnement des échantillons utilisés pour les irradiations gamma.

Mesures en ligne

Les influences des paliers de contrainte sur les réponses Rayleigh ont été étudiées en ligne pour la fibre dopée F jusqu'à de faibles doses gamma de 50 kGy. Seules les données acquises pour les paliers 1, 2, 3 et 7 (respectivement 20g, 74g, 131g et 349g) sont présentées sur la Figure 59. Cette figure présente pour chaque palier l'évolution de la différence de fréquence Rayleigh de la fibre dopée F durant l'irradiation IRMA. Les références des signatures Rayleigh ont été réalisées après les mises sous tensions des fibres. Par conséquent cette expérience mettra plus en exergue l'effet de l'irradiation. Pour autant, si l'on veut suivre l'évolution des décalages Rayleigh, en tenant compte aussi des tensions appliquées, cela est possible car on connaît les longueurs des différents segments associés. Il est plus judicieux de s'affranchir de ce paramètre car, comme on le constate sur la figure, l'ensemble de tous les segments et donc de toutes les tensions appliquées à la fibre optique, affichent la même réponse Rayleigh en cours d'irradiation. Par conséquent et en accord avec des mesures post-irradiation réalisées sur fibres irradiées, dont les analyses ont été conduites à l'aide d'un OBR4600 de Luna [77], le coefficient de sensibilité en déformation de la fibre n'évolue pas avec la dose.



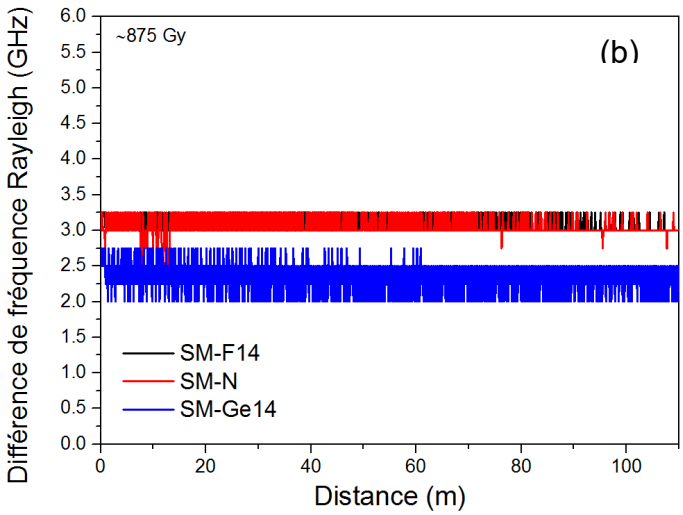


Figure 59 : Evolution de la différence de fréquence Rayleigh induite par l'irradiation en fonction de la dose (jusqu'à 50 kGy) pour la fibre dopée F conditionnée avec différents paliers de tension.(a) Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la longueur de la fibre SM-F14 à environ 875 Gy (données brutes sans traitements et sans correction en température) (b)

Les influences des paliers de contrainte sur les réponses Rayleigh au rayonnement γ à plus fortes doses (10 MGy) et débits de dose ont également été étudiées in situ pour la fibre dopée F. La Figure 60(a) présente l'évolution de la différence de fréquence Rayleigh brute (sans correction en température) en fonction de la longueur de fibre optique et de la dose, permettant de voir l'impact des différentes tensions appliquées: 40 g, 75g et 100 g. On peut noter que les 3 paliers de contrainte (l'ensemble des 3 paliers mesure 50 m de longueur) sont bien repérés et que la différence de fréquence Rayleigh augmente avec la dose reçue de manière peu dépendante vis-à-vis de la tension de bobinage initialement appliquée. La Figure 60(b) présente un zoom sur le palier de contrainte à 75g de la Figure 60(a). Sur toutes les traces Rayleigh, nous pouvons repérer l'enroulement de la fibre contrainte sur le tube (cf. 2.5.5), dont le diamètre est d'environ 14.5 cm.

La Figure 60(c) présente la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la dose déposée pour chaque palier de contrainte. La différence de fréquence de Rayleigh varie de -30 à 20 GHz lorsque la dose varie de 1 à 10 MGy. Par rapport à l'expérience exposée à faible dose de rayons γ, un faible effet de la contrainte appliquée semble visible : une variation de 60 g induit un décalage de ~ 5 GHz. Cela correspondrait à une erreur de ~ 33 με si la fibre optique était utilisée en capteur de déformations. Toutefois, ces variations restent faibles au regard des incertitudes de mesure. L'effet couplé de la tension d'enroulement et du rayonnement γ élevé semble apparaître avec la technique TW-COTDR, et reste à confirmer. Une des origines est la variation du coefficient C_T^R au cours de l'irradiation, détaillée en 5.6.

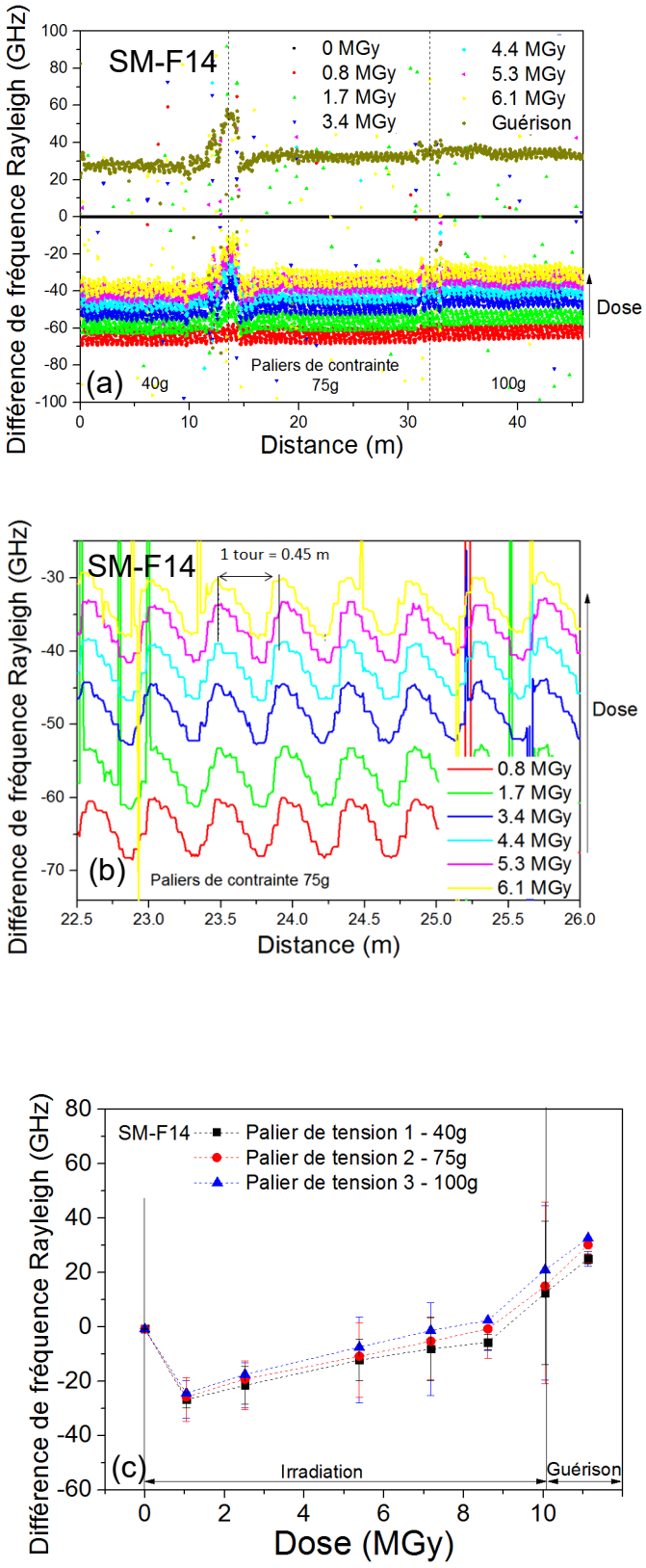


Figure 60: (a) Répartition de la différence de fréquence Rayleigh (non corrigée en température) le long de la fibre sous test (SM-F14) et à différentes doses d'irradiation gamma. La fibre possède 3 niveaux de contraintes (tensions) : 40g, 75g et 100g. (b) Zoom sur le palier de contrainte à 75g. (c) Différence de fréquence Rayleigh (corrigée en température) induite par l'irradiation en fonction de la dose pour la fibre dopée F pour différents paliers de tension, durant l'irradiation allant jusqu'à 10 MGy.

5.6 Effets couplés de la température et des radiations

D'après la littérature concernant l'effet des radiations sur la mesure par un interrogateur Rayleigh OFDR [77], nous savons que le coefficient de sensibilité en température de fibres PSC et dopée F restent inchangés après des radiations allant jusqu'à 10 MGy de dose cumulée. Dans cette partie, nous présentons les effets combinés de la température et des radiations à la dose de 1 MGy, via les réponses de l'interrogateur Rayleigh sur nos échantillons de fibres de 20 m de longueur [121]. Les réponses de l'instrument dans les conditions données de l'interrogateur Rayleigh TW-COTDR pendant des irradiations gamma à température ambiante, 100°C et 120°C sont présentées sur la Figure 61. Bien que les fibres SM-Ge16 et SM-F16 avec un revêtement polyimide soient chauffées à différentes températures (RT, 100°C et 120°C), l'évolution des températures, extraites des mesures de différences de fréquence Rayleigh grâce au coefficient de sensibilité en température, sont significatives par rapport aux mesures de référence du thermocouple : de 0 à 8 GHz selon la température et la dose reçue, ce qui correspond à une variation de température de 0 à 5.3°C environ. Les plus grandes variations de températures mesurées par le thermocouple placé à 120°C est de 2°C (~ 3 GHz). Le changement de différence Rayleigh le plus important mesuré à la température la plus élevée (120°C) est de 8 GHz (ce qui correspondrait à une variation de température ~ 5.3° C) est reporté pour les fibres SM-Ge16 et SM-F16. De plus, il est à noter que les mesures de la fibre SM-Ge sont plus dispersés en termes de fréquence que ceux de la fibre SM-F16.

En conséquence, ces mesures, présentées en Figure 61 ne permettent pas de conclure sur l'amplitude d'éventuels effets combinés entre température et radiations sur la performance d'un capteur Rayleigh. On peut conclure qu'il faut :

- Prendre beaucoup de précautions lors de ces tests (contrôle et homogénéités de la répartition des températures et des contraintes sur le long des échantillons, test des liaisons optiques… et choix des paramètres des instruments par exemple),
- Effectuer des analyses initiales des données brutes,
- Effectuer des analyses critiques des résultats délivrés par les instruments.

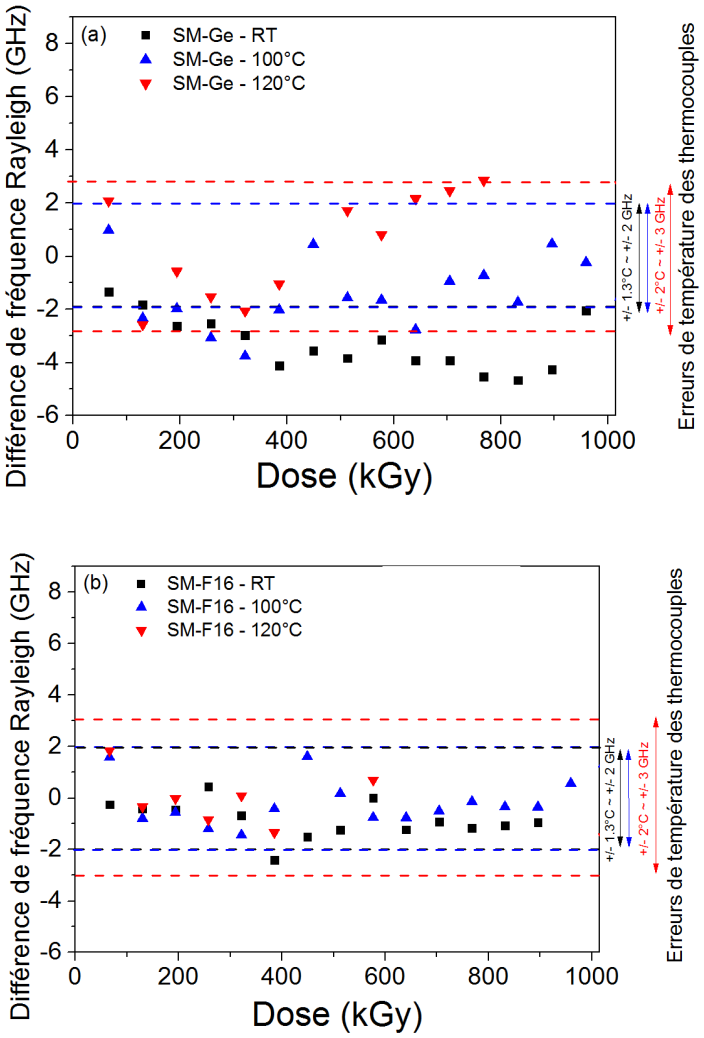


Figure 61: Evolution de la différence de fréquences Rayleigh en fonction de la dose reçue pour les fibres SM-Ge16 (a) et SM-F16 (b) à différentes températures d'irradiation (RT, 100°C et 120°C). Les erreurs de température des thermocouples sont représentées en pointillés.

5.7 Conclusion sur la vulnérabilité de la rétrodiffusion Rayleigh

Nous avons étudié les performances de deux technologies de mesures réparties de déformations ou de température, fondées sur la rétrodiffusion Rayleigh (TW-COTDR de Neubrex et OFDR de Luna technology) et la réponse de l'interrogateur TW-COTDR aux effets couplés ou cumulés des paramètres 'température', 'déformation', 'présence d'hydrogène' et 'radiation'. Les principaux résultats sont les suivants :

- La qualité de mesure repose sur les conditions de manipulation, de mode d'acquisition et d'analyse/traitements des données.

- Pour la fibre standard SMF28, les coefficients de sensibilité thermique et mécanique des deux instruments sont très cohérents. De plus, les deux instruments se comportent de manière très proche lorsque la fibre sensible est irradiée. Des décalages de fréquences Rayleigh de l'ordre de 15 GHz sont mesurés pour une dose X d'environ 1 MGy (associée à une élévation thermique estimée à 5°C). L'OFDR donne des barres d'erreur de mesure plus petites, tandis que le Neubrescope est plus performant sur la durée, sous réserve de corréler les mesures deux à deux et non plus avec une trace de référence.

- Sous rayonnement gamma, à faible débit de dose (370 Gy/h) et jusqu'à 55kGy, le décalage spectral Rayleigh est inférieur à 5 GHz quel que soit le dopage de la fibre optique, F, Ge ou N. La mesure de température ou de déformation par rétrodiffusion Rayleigh TW-OTDR semble robuste pour une utilisation en milieu irradiant.

- A fort débit de dose, des décalages de fréquences Rayleigh de plusieurs dizaines de GHz sont mesurés à 10 MGy, avec un fort décalage au moment de l'exposition puis une faible augmentation au cours de l'irradiation, de l'ordre de 15 GHz. Les méthodes de corrélation et de mesure de l'instrument TW-OTDR ne sont pas fonctionnelles pour caractériser les effets instantanés au moment de l'exposition à des sources radioactives ; d'autres expériences sont nécessaires pour approfondir ces mesures préliminaires. Ensuite, l'évolution de fréquence Rayleigh de 15 GHz pour 10MGy pour les différents dopages testés est importante, au-delà de l'incertitude de mesure recherchée pour la surveillance des processus mécanique et thermique dans Cigéo.

- La migration de l'hydrogène dans les fibres optiques en silice induit un décalage Rayleigh très important, 120 GHz quelle que soit la fibre optique et ses dopants, pour une concentration en H_2 d'environ 450 mol/m^3. Nous avons montré que ces décalages correspondent à l'influence de l'hydrogène sur l'indice de réfraction. Ils pourraient induire une mauvaise interprétation en mesure de température (environ 80°C) ou de déformation (environ 80 με). En conséquence, un revêtement primaire hermétique à l'hydrogène, par exemple en carbone, est indispensable la surveillance de Cigéo.

- Concernant la mesure des effets couplés de l'hydrogène et des radiations post-mortem, aucun impact de la pré-irradiation sur la signature Rayleigh associée à la présence d'hydrogène n'est noté.

- Concernant la mesure des effets couplés de la déformation et des radiations, la tension d'enroulement n'a aucune influence sur l'impact d'un rayonnement γ à faible débit de dose. A débit et dose élevés, un faible effet de la contrainte appliquée semble visible : une variation de 60 g induit un décalage de ~ 5 GHz. Cela correspondrait à une erreur de ~ 33 με si la fibre optique était utilisée en capteur de

déformations. Toutefois, ces variations restent acceptables au regard des incertitudes de mesure.

- Les expérimentations réalisées pour mettre en évidence d'éventuels effets couplés de la température et des radiations ont été perturbées par l'inhomogénéité de la répartition des températures sur les échantillons et l'incertitude des capteurs de référence, les thermocouples. Les fréquences Rayleigh varient au maximum de 8 GHz à 1 MGy pour la fibre Ge (respectivement 4GHz pour la fibre dopée F), quelle que soit la température de fonctionnement, température ambiante, 100 ou 120 °C.

Pour l'application Cigéo, l'interrogateur Rayleigh est un élément très intéressant pour la chaîne de mesure capteur à fibre optique, notamment parce qu'il permet d'effectuer une mesure précise (jusqu'à 2 cm de résolution spatiale) en ayant accès à une seule extrémité de la fibre.

Chapitre 6: Réponse de l'interrogateur Brillouin

Ce chapitre sera consacré aux performances de capteurs à fibre optique de température et de déformation, en environnement sévère via la diffusion Brillouin. On passera en revue les influences des quatre paramètres : température, radiation, déformation et hydrogène. La technologie PPP-BOTDA utilisée par l'instrument Neubrex [23] est évaluée dans des conditions représentatives de notre application Cigéo, c'est-à-dire lorsque les effets de ces paramètres sont combinés : effets couplés hydrogène/radiation, déformation/radiation, température/radiation. Nous présenterons également la comparaison des performances de la technologie PPP-BOTDA sous radiations avec celles d'autres instruments Brillouin tels que les technologies BOTDA de OZ [22] et BOTDR de Febus Optics [24].

6.1 Effets de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Brillouin

Les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus en utilisant l'instrument Neubrex donc la technologie PPP-BOTDA.

Mesure en ligne

La diffusion de l'hydrogène dans la silice induit une augmentation de la fréquence Brillouin mais cet effet est réversible (cf.2.3). Il est donc également possible de caractériser l'effet de l'hydrogène sur la signature Brillouin d'une fibre optique en suivant l'évolution de sa réponse après son chargement en hydrogène et pendant la phase de désorption qui sera associée à une diminution de sa fréquence Brillouin.

Les Figure 62(a) et (b) présentent cet impact de la désorption de l'H_2 à température ambiante et à pression atmosphérique sur la réponse Brillouin de fibres optiques chargées en hydrogène : fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N. Des échantillons vierges de 10 m de longueurs ont été exposés à 110 bars d'hydrogène, à température ambiante et pendant 15 jours afin d'atteindre théoriquement leur saturation en gaz. Ces fibres dopées Ge, F et N ont des fréquences Brillouin variant respectivement entre 10.337 et 10.323 GHz, 11.081 et 11.062 GHz, 11.194 et 11.176 GHz durant la phase de mesure, ce qui correspond à des variations de fréquences Brillouin respectives de 14 MHz, 19 MHz et de 18 MHz. Ces variations de fréquences sont importantes car elles induisent des erreurs d'évaluation de la température supérieures à 15°C. L'hydrogène a donc une influence non négligeable sur la rétrodiffusion Brillouin et les performances des capteurs exploitant ce phénomène physique. Il est à noter que les derniers points de la Figure 62(a) sont les fréquences Brillouin des fibres vierges (non chargées en hydrogène). Les fréquences associées à ces échantillons sont supérieures d'environ 3 MHz à celles mesurées en fin de désorption de l'hydrogène ; ce léger écart peut être attribué à nos

conditions de mesure, en particulier à une évolution de la température ambiante du laboratoire entre les deux séries de mesure.

Les travaux de S. Leparmentier [57] avaient également montré une variation de fréquence Brillouin de l'ordre de 18 MHz au cours de la désorption à température ambiante et à pression atmosphérique d'une fibre de type G652 chargée initialement à 150 bars et à 25°C (cf. Chapitre 2:) [57]. Nos résultats confortent et approfondissent donc ces conclusions pour d'autres catégories de fibres optiques. La durée de désorption, de 16 jours en conditions normales, est reproductible en cohérence avec les résultats présentés précédemment lors des expériences en Rayleigh. On peut aussi relever que si la fréquence de la signature Rayleigh augmente au cours de la désorption en H_2, cette dernière diminue pour la signature Brillouin. D'où l'intérêt de ces mesures mixtes et complémentaires.

Les fibres dopées Ge et N ont des cinétiques de désorption d'hydrogène similaires. La fibre dopée F montre une cinétique plus rapide conformément aux résultats antérieurs obtenus sur la rétrodiffusion Rayleigh et à la littérature (cf. Figure 62(b)).

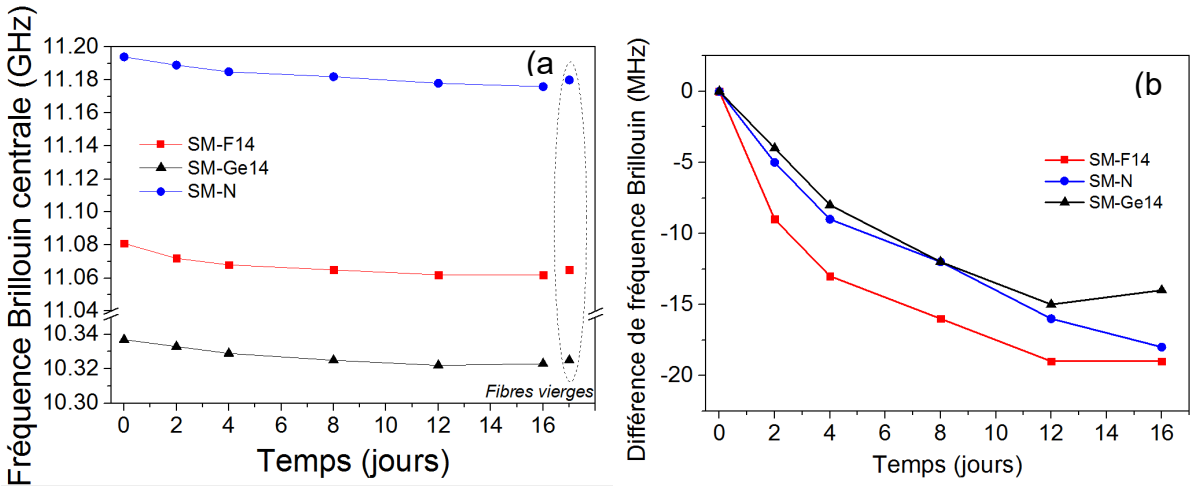


Figure 62: Evolution des réponses Brillouin en cours de désorption de H_2 (a) Fréquence Brillouin centrale et (b) différence de fréquence Brillouin en fonction du temps de désorption pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N.

Il est intéressant de présenter l'évolution de la fréquence centrale pour au moins deux raisons :

- On remarque directement dans quelles gammes de fréquences on se trouve, ce qui permet à un utilisateur de se faire une idée directement ;
- On comprend immédiatement les spécifications des appareils et les domaines de travail des composants : (typiquement 9-13 GHz) pour leurs réponses.

6.2 Effet des radiations sur la rétrodiffusion Brillouin

Effet des radiations : Mesures post-mortem

Les effets post-mortem γ sur les réponses PPP-BOTDA sont présentés dans la Figure 63. Trois fibres de compositions différentes ont été testées : SM-F14, SM-Ge14 et SM-N. Pour chacune, des échantillons d'une longueur de ~30 m ont été irradiés et caractérisés en post irradiation. L'évolution du pic Brillouin est reportée sur la Figure 63(b) pour des doses allant jusqu'à 10 MGy (réalisées durant la campagne d'irradiation de Mol – cf. 2.5.1). Pour chaque fibre, la fréquence Brillouin évolue avec l'irradiation. Ce résultat pour une fibre dopée F est en accord avec ceux précédemment présentés dans la littérature [12][14] , où les variations maximales étaient de 4-5 MHz. En particulier, la fréquence Brillouin pour la fibre dopée N semble très sensible à la dose totale reçue, jusqu'à 20 MHz de variation à 10 MGy, ce qui correspondrait à une erreur de 22,4 °C si elle était interprétée en mesure de température.

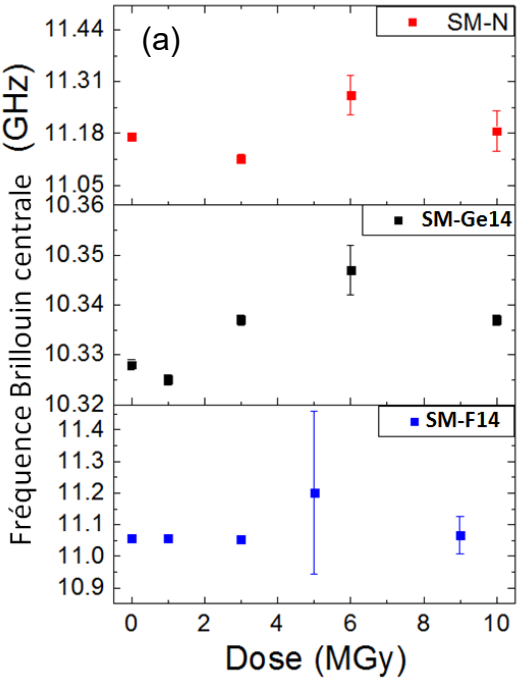


Figure 63 : (a) Evolution de la fréquence Brillouin centrale pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N.

On constate que la fibre F confirme sa robustesse aux radiations, comme déjà constaté avec l'évolution de sa signature Rayleigh sous irradiation, et c'est une candidate potentielle pour l'application visée.

6.3 Effets couplés de l'hydrogène et des radiations

Mesures post-mortem

La Figure 64(a) présente l'impact de la désorption d'hydrogène sur la signature Brillouin de fibres vierges ou pré-irradiées gamma (10 MGy). Trois types de fibres sont testés : dopées F, Ge et N. L'ensemble de ces échantillons ont été chargés en hydrogène à température ambiante, 110 bars, pendant 2 semaines pour atteindre la saturation en gaz. Les fréquences Brillouin centrales à saturation d'H_2 pour les fibres dopées F et N sont identiques dans les 2 cas présentés : aucun changement n'est noté. Pour les fibres dopées Ge, les variations des fréquences Brillouin pour la fibre vierge et pour la fibre irradiée sont identiques et sont de l'ordre de 20 MHz. La Figure 64(b) représente les différences de fréquences Brillouin en fonction du temps de désorption : celles-ci diminuent jusqu'à -15 MHz pour la fibre vierge dopée Ge et jusqu'à -17 MHz pour la fibre vierge dopée F.

La diffusion de l'hydrogène s'effectue dans les fibres optiques indépendamment des défauts créés par l'irradiation.

Les résultats de la Figure 64a montrent clairement que les cinétiques, de désorption d'hydrogène, des fibres vierges sont similaires à leurs analogues irradiées à 10 MGy. Concrètement, le chargement en post-irradiation, en hydrogène, peut générer un shift dans les réponses de la signature Brillouin (cas de la SM-Ge14) mais il ne modifie pas leurs évolutions temporelles.

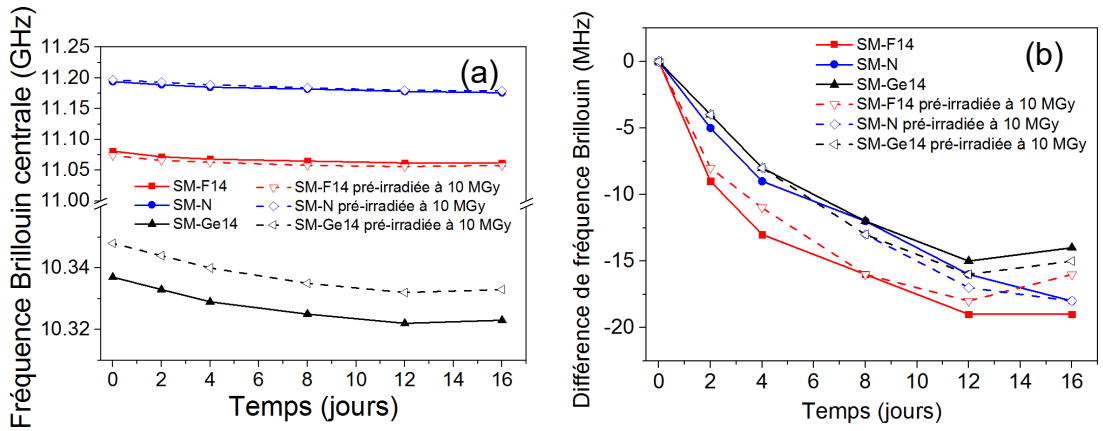


Figure 64: Evolution de la fréquence centrale Brillouin en phase de désorption d'hydrogène(a) ; Evolution de la différence de fréquence Brillouin (b) en fonction du temps de désorption pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N pré-irradiées à 10 MGy et vierge.

6.4 Effets couplés de la déformation et des radiations

Dans la partie 6.2, nous avons introduit les effets des radiations sur les réponses d'un interrogateur Brillouin. Deux principaux effets sont à noter : un décalage de la fréquence Brillouin causée par les radiations sans que sa dépendance à la température et/ou la déformation ne soit affectée de manière permanente par les radiations. Cet effet dégrade la précision de mesure, et altère la mesure de déformation et/ou de température tandis que la RIA dégrade les performances du capteur en limitant la longueur de fibre sensible exploitable.

Les précédentes études en ligne et post-mortem [12][14] ont montré que l'amplitude et les cinétiques de ces deux effets des radiations dépendent de sa composition [10][12] mais sont indépendants de la tension d'étirage de la préforme sous forme de fibres optiques [14][106] (du moins dans le domaine usuel d'étirage des fibres optiques). Notre étude vise à compléter ces précédents travaux qui avaient été réalisés principalement en post irradiation. Pour cela, nous avons mené une étude in situ et post-mortem de la réponse Brillouin de différentes catégories de fibres optiques (Ge, N et F), bobinées de façon à contrôler les contraintes qui leur sont appliquées. Les évolutions in situ des fréquences Brillouin centrales mesurées sur les longueurs de fibres soumises à différentes contraintes appliquées permettent d'étudier l'effet des radiations sur la sensibilité en déformation longitudinale de la fibre en fonction de la dose.

Mesures réalisées en ligne

Grâce à notre configuration de fibres bobinées sur un tube en borosilicate avec des tensions contrôlées (2.5.5), il est possible de caractériser en ligne la dépendance de la fréquence Brillouin avec la déformation pendant l'irradiation lorsque la dose varie de 0 à 56 kGy : les trois fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N ont été contraintes et irradiées sous rayonnement γ [114]. Les effets de ce type de rayonnement sur la fréquence centrale Brillouin pour les trois échantillons sont présentés dans la Figure 65. De plus, cette étude a également été réalisée pour différents paliers de contrainte (allant de 20g à 349g). Les barres d'erreur associées aux mesures expérimentales sont obtenues en considérant la dispersion de la fréquence centrale mesurée le long des segments de fibres contraints de 7 m de longueur avec une erreur systématique de 1 MHz attribuée à notre configuration d'analyse expérimentale. D'après les résultats obtenus, il est évident que la fréquence Brillouin centrale reste essentiellement inchangée pour toutes les doses et tous les paliers de contraintes testés. Ce résultat est en accord avec la littérature : une étude sur la fibre dopée Ge (en ligne et post-mortem) a montré que l'effet de l'irradiation sur la fibre est indépendant de la contrainte appliquée [14]. Dans nos cas, les RIAs à 1550 nm des fibres dopées Ge, N et F sont respectivement de 27 dB/km, 15 dB/km et 5 dB/km pour une dose cumulée de 60 kGy (cf. Chapitre 3:). Ce qui correspond respectivement à des portées maximales de 370m, 667 m et 2000 m, pour un budget

optique de 10 dB. Quelle que soit la contrainte appliquée, les radiations influencent essentiellement la RIA [46][49] .

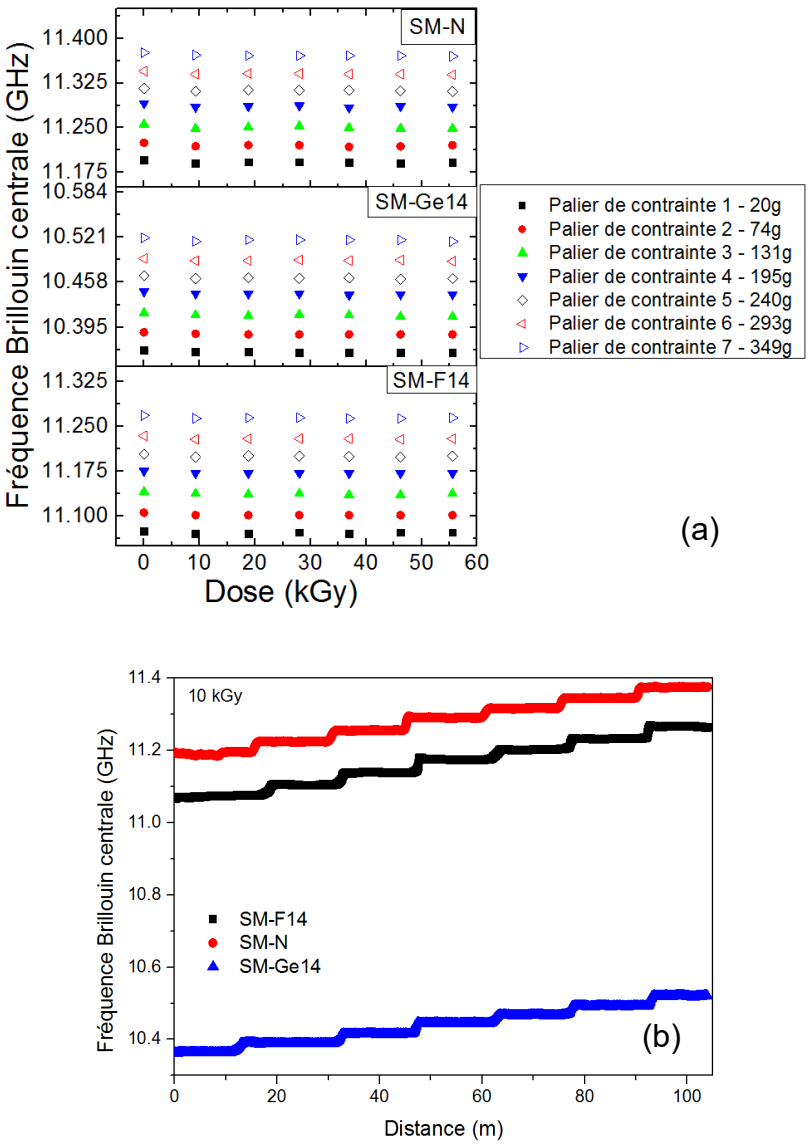


Figure 65: Evolution de la fréquence Brillouin centrale en fonction de la dose pour différents paliers de contrainte des fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N durant une irradiation de débit de dose 370 Gy/h.(a) [88]Fréquence Brillouin centrale en fonction de la longueur de la fibre SM-F14 à 10 kGy (données brutes sans traitements et sans correction en température)(b).

Cet ensemble de résultats permet de d'avoir une vue globale de l'évolution des fréquences centrales Brillouin de chaque fibre, à chaque dose et aussi sur chaque segment de contrainte. Il est aisé d'extraire le coefficient de la sensibilité à la déformation des échantillons Figure 66 et Figure 67. Au cours de l'irradiation, nous constatons de légères évolutions des coefficients de sensibilité : 0,7%, 1,2% et 0,9% pour les fibres dopées F, Ge et N respectivement. De tels changements sont de l'ordre des incertitudes expérimentales de nos mesures.

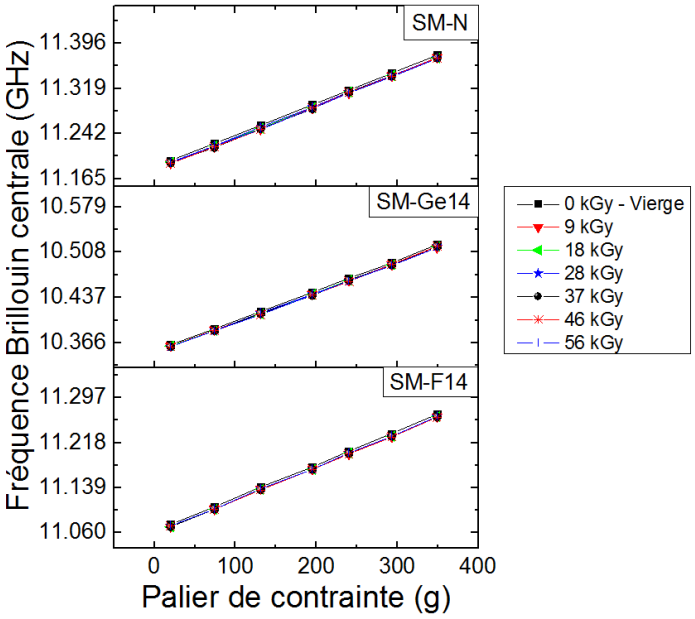


Figure 66: Evolution de la fréquence Brillouin centrale en fonction de la contrainte appliquée pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N, vierges et irradiées de 9 à 56 kGy. [88]

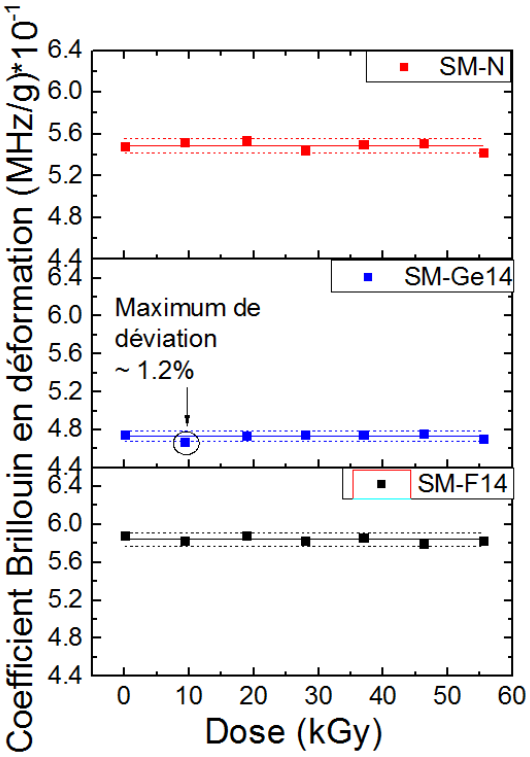


Figure 67: Evolution du coefficient Brillouin en déformation C_{ε^B}' en fonction de la dose pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N. Les traits pleins indiquent les valeurs moyennes, les traits pointillés indiquent les variations maximales de 1.2% pour la fibre dopée Ge, variation inférieure à notre incertitude de mesure. [88]

Ces trois fibres, avec différents niveaux de contrainte appliquée, ont été caractérisées en ligne et après une irradiation de 56 kGy. Les mesures Brillouin sont présentées dans le Tableau 10 et les deux coefficients de sensibilité mécanique

avant et après l'irradiation sont comparés : Le premier coefficient $C\varepsilon^B$ a été déterminé en utilisant le banc de contrainte ad hoc du Laboratoire Hubert Curien (l'unité est MHz/με) tandis que le second coefficient $C\varepsilon^{B'}$ a été évalué en utilisant des fibres contraintes sur un tube de verre (l'unité est MHz/g).[88].

Tableau 10: Coefficients Brillouin en déformation en MHz/με et MHz/g [88] (cf.$C\varepsilon^B$ Figure 40).

Fibres	$C\varepsilon^B$ avant irradiation (MHz/με)	$C\varepsilon^{B'}$ avant irradiation (MHz/g)	$C\varepsilon^{B'}$ après irradiation de 56 kGy (MHz/g)
SM-F14	0.035	0.559	0.583
SM-Ge14	0.017	0.475	0.471
SM-N	0.034	0.548	0.542

Nous confirmons à nouveau que la sensibilité mécanique de la rétrodiffusion Brillouin n'est pas impactée par l'irradiation à de tels niveaux de dose.

6.5 Effets couplés de la température et des radiations

Les effets séparés des paramètres 'Température' et 'Radiation' sur les fibres sont bien connus : Nous avons vu que la signature Brillouin de la fibre dépend de la température et permet de suivre ce paramètre environnemental et que les pertes dues aux radiations dégradent les performances du capteur en limitant la portée d'analyse de la fibre sensible [91]. Notre étude en ligne nous a permis compléter ces acquis en évaluant les effets couplés de la température et de l'irradiation, qui sont connus pour impacter les amplitudes et les cinétiques de la RIA [44].

Une étude post-mortem complémentaire a été réalisée afin d'étudier les effets des variations de température sur un revêtement carbone d'une fibre. Les évolutions des fréquences Brillouin centrales en fonction de la température nous ont permis d'étudier l'évolution du coefficient Brillouin en température en fonction des doses reçues par les fibres [124].

6.5.1 Influence croisée température-radiation sur les diffusions Brillouin

Mesures réalisées en ligne

Les performances de l'interrogateur Brillouin PPP-BOTDA sur des fibres dopées Ge, N et F pendant les expériences combinant irradiation et température sont présentées à la Figure 68. Nous avons initié la chauffe des échantillons sous tests avant l'irradiation. La fréquence Brillouin utilisée en référence est donc sélectionnée à la température de chauffe. Pour faciliter la comparaison, les échelles des graphes

correspondants aux deux types de fibres sont imposées identiques. Les paramètres choisis pour les instruments sont détaillés en annexe F.

Les mesures réalisées à RT ont été perdues à 500 kGy pour deux des fibres sous tests, et le signal est devenu trop bruité. Ce résultat est surprenant : en effet, X. Phéron [12][125] est parvenu à obtenir des mesures au-delà de 400 kGy grâce à la technologie BOTDA. Les échantillons étaient très fortement contraints dans les supports (cf. 2.5.5) et les paramètres de réglage de l'instrument probablement trop ambitieux (pas assez de moyennage – cf. Annexe F).

Malgré ces difficultés, nous constatons une réelle amélioration de la tenue aux radiations sous chauffe : l'erreur de mesure représentée par la barre d'erreur est divisée par environ 4. Cette influence est connue pour la RIA [77]. C'est pourquoi le rapport signal sur bruit est autant impacté : les mesures de fréquence Brillouin sont beaucoup moins bruitées à 50°C et 120°C qu'à température ambiante.

Plus précisément, pour la fibre dopée Ge : les mesures réalisées à 100°C montrent que la fréquence Brillouin n'évolue pas. A température ambiante, la fréquence évolue de ~10 MHz, ce qui est cohérent avec les résultats connus en post-mortem. Les mesures réalisées à 120°C montrent une différence de fréquence Brillouin allant jusqu'à -20 MHz entre 200 et 700 kGy, et une différence relativement faible entre 700 kGy et 1 MGy. Nous attribuons ce changement de comportement à des instabilités et à l'inhomogénéité de la température dans des silicones chauffants observées sur les mesures Raman et de même qu'en Rayleigh (cf. Chapitre 4:).

Malgré les difficultés expérimentales, ces mesures permettent de conclure que la température réduit l'influence des rayons γ sur la rétrodiffusion Brillouin. Pour la fibre dopée F : la fréquence Brillouin à 50 °C est constante quelle que soit la dose reçue. Comme pour la fibre Ge, un changement de comportement est noté à 700 kGy pour les fibres dopées F à 100 et 120°C. Cette fois les mesures sont de bonne qualité avec une incertitude sur $\Delta\upsilon_B$ de ~ 2 MHz. Il est à nouveau constaté une évolution négative de la fréquence Brillouin sous irradiation γ et température.

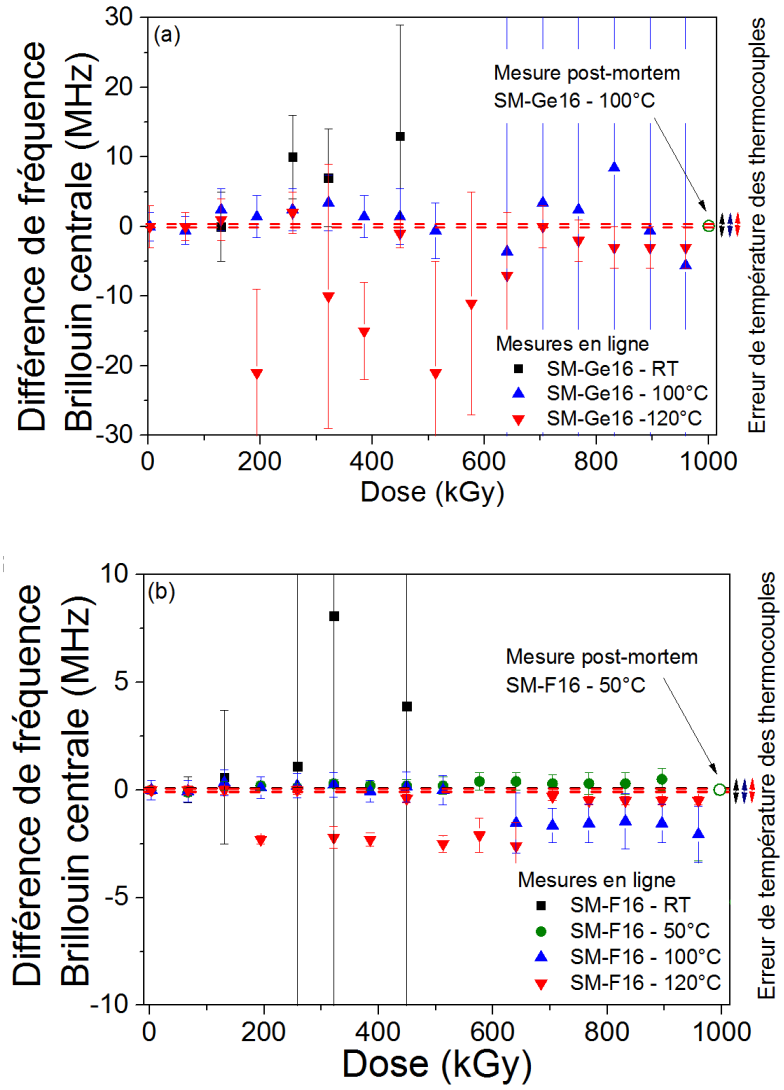


Figure 68: Evolution de la fréquence Brillouin en fonction de la dose reçue pour les fibres SM-Ge16 (a) et SM-F16 (b) à différentes températures d'irradiation (RT, 50°C, 100°C et 120°C).

Des mesures post-mortem ont été réalisées sur l'échantillon dopé F (SM-F16 – 50°C). Cette différence de fréquence Brillouin tend vers 0 MHz. La guérison des fibres optiques durant les mesures en ligne n'était pas terminée, ce qui met en cohérence les mesures en ligne avec les mesures post-mortem. Ce résultat est très encourageant pour l'application Cigéo où les effets de la température et de l'irradiation se combineront.

6.6 Effets cumulés de la température, de la déformation et des radiations

Fibres dopées Ge, F et N

Pour déterminer les coefficients de température de Brillouin, nous avons sélectionné une longueur pour chaque palier de contrainte de l'échantillon irradié caractérisée par un rapport signal / bruit élevé (Figure 69). Pour chaque palier de contrainte choisi, nous avons extrait le coefficient grâce à une régression linéaire (Figure 69). Sur cette figure, l'erreur de température augmente de 2,3 à 6°C avec la température (de 30°C à 80°C). Toutes les mesures du décalage spectral en fonction de la température peuvent être résumées par l'évolution de leurs coefficients de température par rapport à la dose d'irradiation pour toutes les fibres testées. Pour chaque palier de contrainte de chaque échantillon (20, 74, 131, 195, 240, 293 et 349 g), les coefficients de température Brillouin C_T^B sont indépendants en déformation, même après irradiation à la dose maximale de 56 kGy. Tous les résultats sont en effet dispersés autour de leurs valeurs moyennes (ligne continue dans chaque graphique) : 1,17 MHz/°C (SM-F14), 0,91 MHz/°C (SM-Ge14) et 1,18 MHz/°C (SM-N) dans une incertitude d'environ 1% (Figure 70). Les coefficients de température de Brillouin avant irradiation et pour les fibres non contraintes sont de 1,00 MHz /°C (SM-F14), 1,04 MHz/°C (SM-Ge14) et 0,89 MHz/°C (SM-N). Pour les fibres SM-F et SM-N, les coefficients de température Brillouin augmentent respectivement de 0,9% et 0,6% avec l'irradiation, alors qu'il diminue pour l'échantillon SM-Ge14. Ces coefficients avec leurs erreurs relatives sont rapportés dans le Tableau 11 [88].

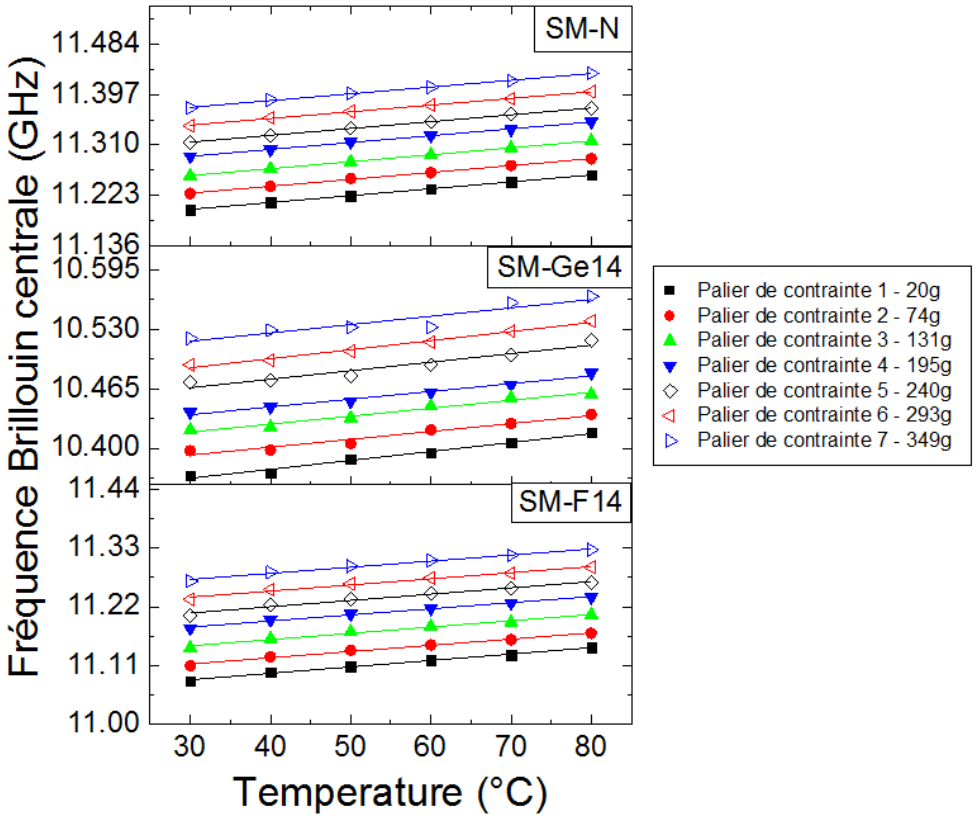


Figure 69: Evolution de la fréquence Brillouin centrale en fonction de la température pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N pré-irradiées à 56 kGy, à différents paliers de contrainte (20-74-131-195-240-293-349g).

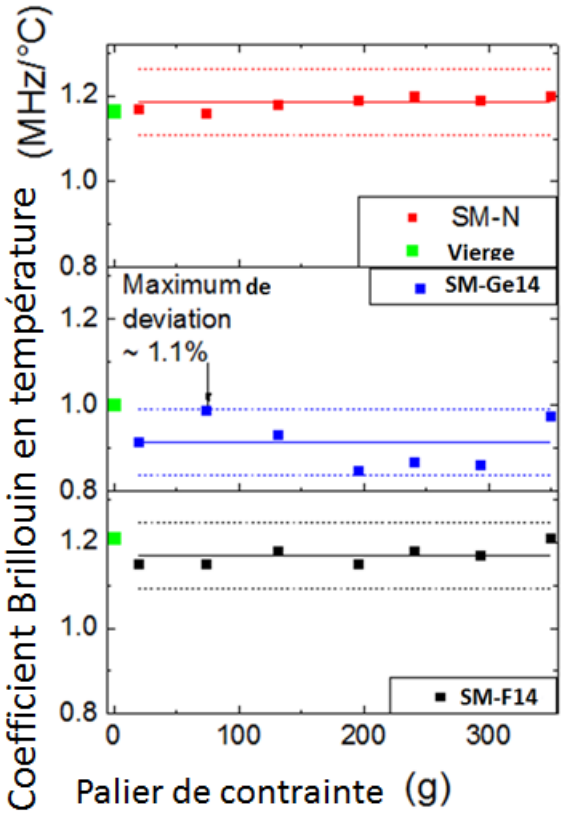


Figure 70: Evolution du coefficient Brillouin en température C_T^B en fonction des différents paliers de contrainte pour les fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N. Les traits pleins indiquent les valeurs moyennes, les traits pointillés indiquent les variations maximales de l'ordre de 11% pour la fibre dopée Ge.

Tableau 11: Sensibilité en température de la rétrodiffusion Brillouin C_T^B extraite des mesures Brillouin et leurs erreurs relatives après l'irradiation de 56 kGy.

C_T^B (MHz/°C)							
N°palier	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Contrainte (g)	20	74	131	195	240	293	349
SM-F	1.15±0.06	1.15±0.07	1.18±0.07	1.15±0.05	1.18±0.07	1.17±0.06	1.21±0.05
SM-Ge	0.9±0.2	0.99±0.05	0.9±0.1	0.85±0.06	0.87±0.07	0.86±0.09	0.87±0.06
SM-N	1.17±0.02	1.16±0.02	1.18±0.02	1.19±0.02	1.20±0.02	1.19±0.02	1.20±0.03

Ces coefficients de sensibilité thermique sont plus élevés que la valeur de la fibre SMF28 vierge de référence (1.07 MHz/°C) [23][43] et la mesure de la thèse de C. Cangialosi (1.09 MHz/°C pour la fibre vierge SM-Ge14) [14].

6.7 Influence du choix de l'instrument de mesure de rétrodiffusion Brillouin

Cette partie présente les performances des différents systèmes de mesure de rétrodiffusion Brillouin dans des fibres optiques monomodes. Nous avons étudié les instruments PPP-BOTDA de Neubrex Technologies, BOTDA de OZ et BOTDR de Febus Optics.

6.7.1 Etude de la technologie PPP-BOTDA (Neubrescope)

Les performances de l'instrument – notamment sa résolution spatiale et la puissance des lasers pompe/sonde, ont été testées avec comme fibre support la SMF-28 de chez Corning [90]. La résolution spatiale et la puissance des lasers pompe/sonde ont été testées.

Résolution spatiale

Pour tester les performances de l'instrument en résolution spatiale, nous avons fait varier ce paramètre (200-100-20-10-5-2 cm) avec un moyennage de 2^13 (moyenne de 8192 acquisitions distinctes et évaluons l'incertitude de la fréquence Brillouin mesurée sur la longueur de la fibre relâchée de référence d'environ 15 m. Ces mesures sont présentées sur la Figure 71. La résolution spatiale par défaut de l'instrument est de 10 cm (Figure 71 (d)). Un compromis entre le temps de mesure et une bonne résolution est à choisir selon le besoin de l'expérience : Avec une petite résolution de 200 cm, la mesure est rapide (~1 min), tandis que qu'avec une grande résolution de 2 cm, la mesure est plus longue (~5 min) pour une distance de fibre d'environ 20 m. Pour cette même longueur de fibre, le BOTDA (de OZ technologie [22]) propose un compromis temps de mesure/résolution d'environ 15 min de mesure pour 1 m de résolution. La technologie PPP-BOTDA donne alors un meilleur compromis.

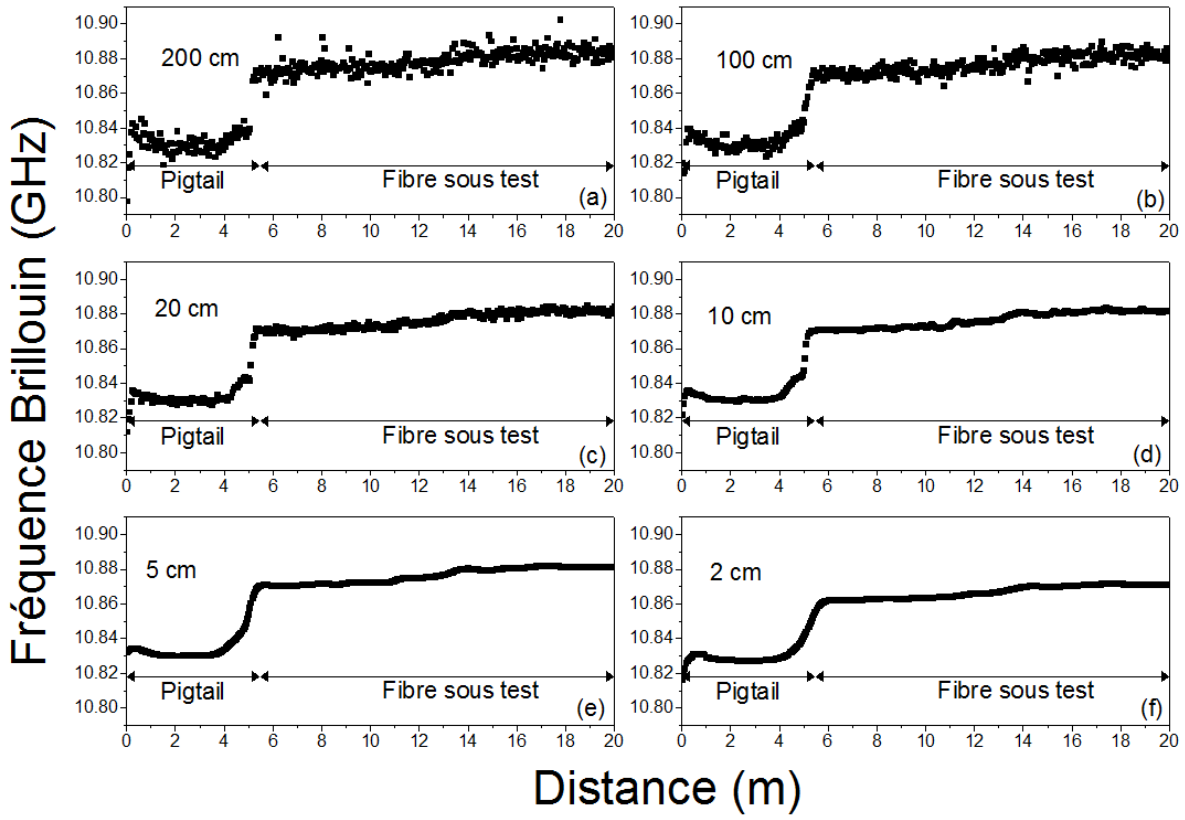


Figure 71: Réponse Brillouin PPP-BOTDA de l'instrument Neubrex en fonction de la longueur de la fibre SMF28 pour différentes résolutions spatiales : 200 cm (a), 100 cm (b), 20 cm (c), 10 cm (d), 5 cm (e), 2 cm (f). Parce que la fibre sous test est relâchée, la fréquence Brillouin n'est pas totalement constante le long de l'échantillon.

Dans notre cas, l'application Cigéo requiert une résolution de mesure de déformation (ou température) d'environ 20µm/m (ou 1°C soit 1 MHz) cela nous conduit vers un choix de résolution spatiale d'au moins 10 cm. Il faudra réaliser des mesures d'au moins ~3.5 minutes de temps de mesure et ~2 MHz d'incertitude de détermination de la fréquence Brillouin (Figure 72).

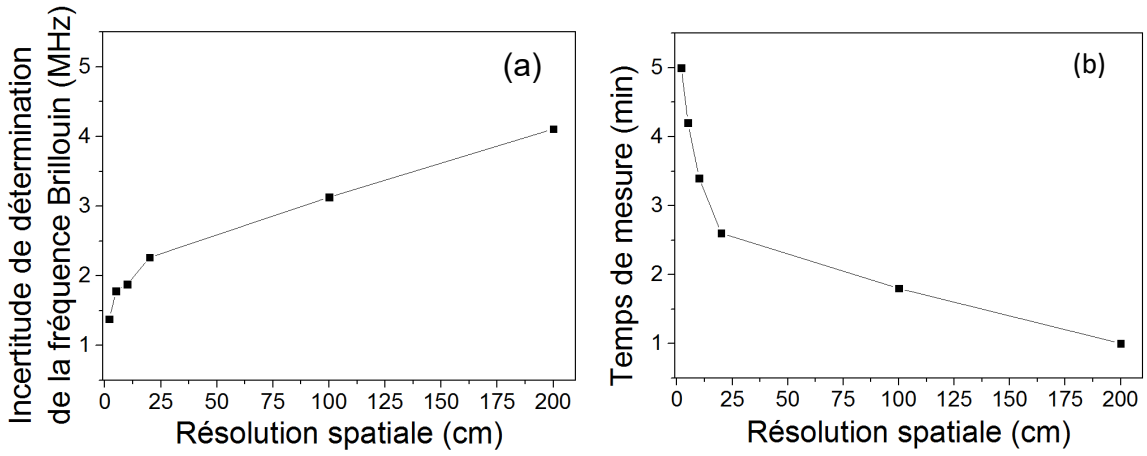


Figure 72: Incertitude de mesure de la fréquence Brillouin PPP-BOTDA de l'instrument Neubrex en fonction de la résolution spatiale (a) et Temps de mesure sur une longueur d'échantillon SMF28 de 16 m en fonction de la résolution spatiale (b).

Puissances des lasers pompe/sonde

Pour nos tests, nous avons sélectionné 4 couples de puissances laser pompe et sonde : 25 dBm / 0 dBm, 30 dBm / 0 dBm, 25 dBm / 3 dBm et 30 dBm / 3 dBm (à la résolution définie en annexe F). Par défaut, l'instrument propose le couple de 25 dBm / 0 dBm. La Figure 73 représente la forme de la réponse Brillouin à 5 m de la fibre SMF-28 et aux différents couples de puissance choisis (a) ainsi que l'évolution de la fréquence centrale en fonction de la distance de la fibre (b). La forme particulière du pic Brillouin en cloche-triangle est en partie causée par la pré-impulsion (Pre-Pulse Pump, PPP) du Brillouin, mais peut également être influencée par le phénomène de déplétion de la puissance de pompe [39]. Lorsque l'on augmente la puissance du laser de pompe de 5 dBm, la réponse augmente de 4 dB, quelle que soit la valeur de la sonde. D'autre part, lorsqu'on augmente la puissance du laser sonde de 3 dBm, la réponse du signal augmente de 3 dB, quelle que soit la valeur de la puissance du laser de pompe. On peut également remarquer que plus on augmente ces valeurs pompe/sonde, plus l'incertitude de la puissance s'améliore (Figure 73 (b)) : lorsque l'on augmente simultanément la pompe de 25 à 30 dB et la sonde de 0 à 3 dB, l'incertitude diminue de 0.3 à 0.1 dB. Il est alors préférable de réaliser les mesures avec les plus hautes puissances de pompe/sonde pour le Brillouin PPP-BOTDA de l'instrument Neubrex. Toutefois, l'information essentielle est la qualité de la détermination des fréquences Brillouin υ_B. Ces fréquences Brillouin pour les valeurs respectives pompe/sonde 25 dBm / 0 dBm, 30 dBm / 0 dBm, 25 dBm / 3 dBm et 30 dBm / 3 dBm sont 10.873 GHz, 10.869 GHz, 10.873 GHz et 10.873 GHz. Quelle que soit les couples pompe/sonde, la fréquence Brillouin mesurée correspond à la fréquence de 10.8 GHz de la fibre SMF28.

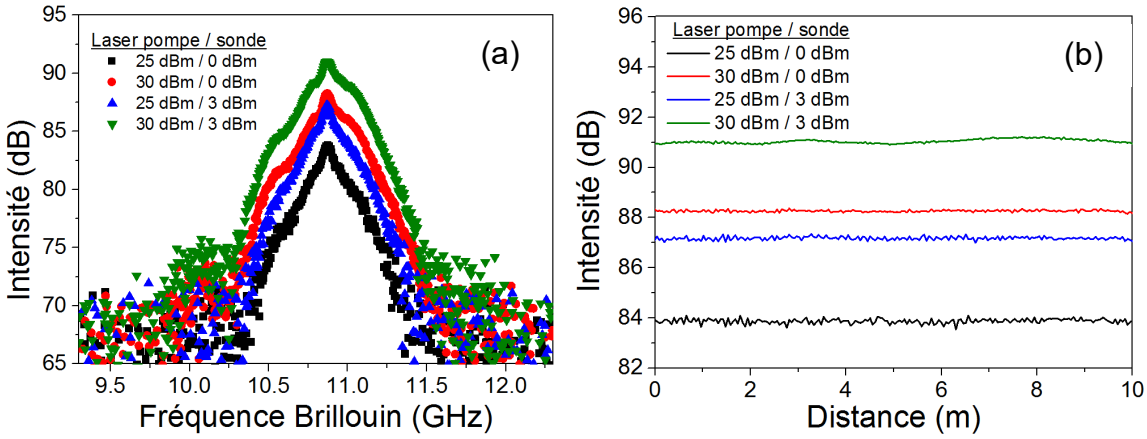


Figure 73 : Réponses de l'instrument Neubex pour une fibre sous test SMF-28. (a) Evolution de la forme du signal de rétrodiffusion Brillouin stimulée à 5 m de l'échantillon. (b) évolution de la fréquence centrale en fonction de la distance le long de la fibre. .

6.7.2 Comparaison des performances des BOTDA et PPP-BOTDA

Nous avons comparé deux instruments commercialement disponibles [90]: BOTDA de l'entreprise OZ Optics (Canada) et PPP-BOTDA de l'entreprise Neubrex (Japon). Le même échantillon de fibre SMF28 de longueur 10 m a été testé avec les 2 instruments et une résolution spatiale comparable de 1 m. Les paramètres de ces mesures sont précisés en annexe F. Les signatures Brillouin, pour la même fibre (SMF-28), sont représentées sur la Figure 74. Leurs formes de pic Brillouin sont différentes, cela est causé par la spécification du système d'interrogation PPP-BOTDA qui utilise une pré-impulsion de pompe (PPP, Pre-Pump Pulse), contrairement au système d'interrogation BOTDA. Les fréquences Brillouin en fonction de la longueur de la fibre pour les données traitées sont représentées sur la Figure 74 : Pour les mêmes paramètres des instruments, on peut remarquer que les BOTDA et PPP-BOTDA donnent des valeurs différentes pour la fréquence de la fibre de référence SMF28, généralement repérée à 10.8 GHz. En données brutes, le BOTDA et le PPP-BOTDA fournissent respectivement les valeurs de ~10.848 GHz et de ~10.870 GHz. En données traitées par leurs programmes de traitement dédiés, ils fournissent respectivement les valeurs de ~10.850 GHz et de ~10.875 GHz. Ces différences de valeurs de fréquences Brillouin peuvent s'expliquer par l'utilisation de deux lasers différents et donc deux longueurs d'onde de pompe différentes pour chaque instrument [107].

On peut remarquer que la zone de transition entre la pigtail et la fibre sous-test est mieux définie lors des mesures réalisées en PPP-BOTDA que celles réalisées en BOTDA avec les résolutions spatiales de 1 m. Cela met en évidence l'incertitude sur la mesure de la longueur de l'échantillon.

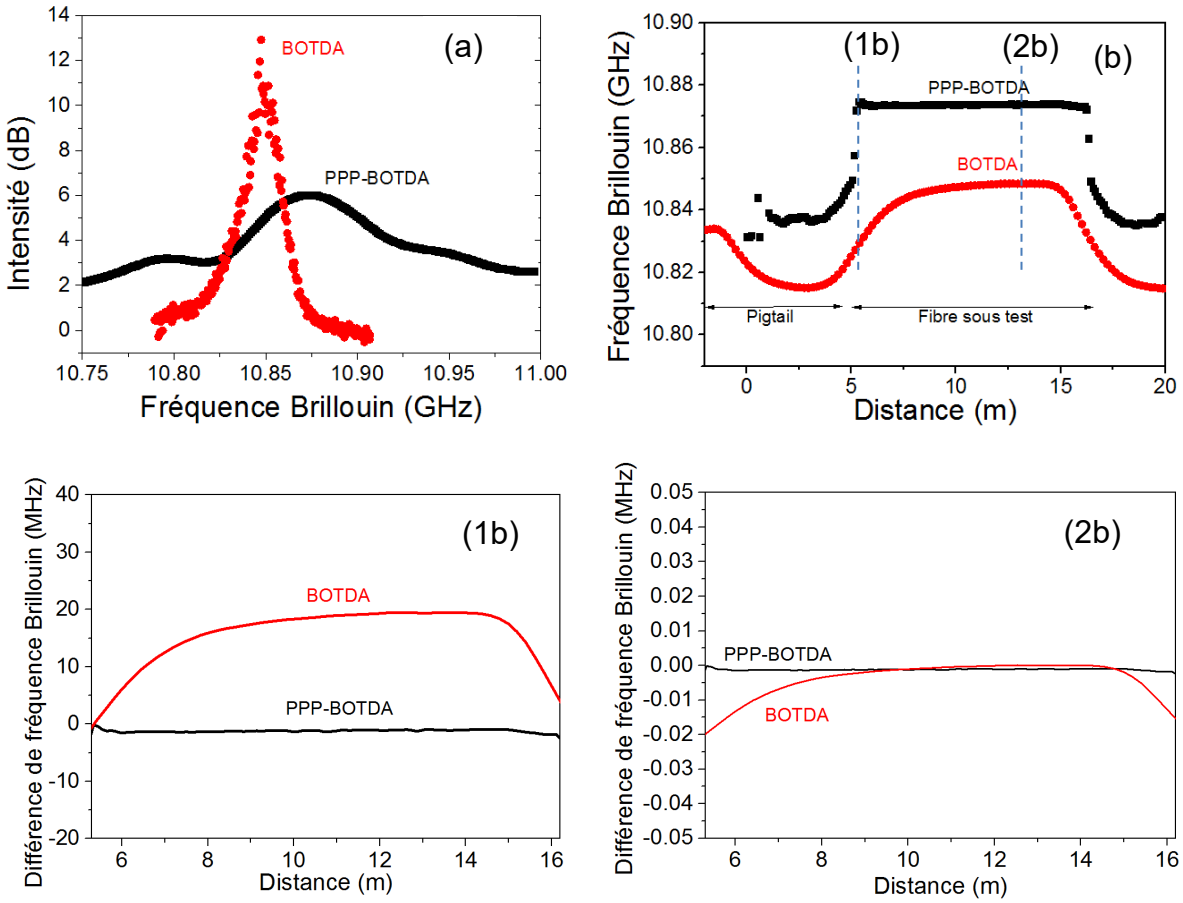


Figure 74 : Evolution du signal Brillouin de la fibre sous-test en fonction de la fréquence (a) et en fonction de la longueur de la fibre SMF28 (b) réalisé par le BOTDA (en rouge) et le PPP-BOTDA (en noir). Les différences de fréquences ont été réalisées avec les références prises à 5.3 m (repère en (1b) en début de la fibre sous test) et 13.7 m (repère en (2b) sur le plateau de la mesure BOTDA).

6.7.3 Comparaison des performances des BOTDA et BOTDR sous radiation

Des études ont déjà été reportées sur les réponses de capteurs à fibre optique en environnement radiatif avec les technologies Brillouin BOTDR et BOTDA [10][12][13][14][108] .

Les deux instruments présentant des caractéristiques différentes ont été comparés [127] : L'instrument BOTDA nécessite l'accès aux 2 bouts de la fibre et est équipé d'un laser de quelques mW de puissance [22] à 1550 nm. Alors que l'instrument BOTDR nécessite l'accès à un seul côté de la fibre et a un laser de 500 mW de puissance à 1550 nm. De plus, un spectre avec un rapport signal-sur-bruit de plus de 20 dB est obtenu avec un temps acquisition de seulement 1 ou 2 minutes avec l'instrument BOTDR, alors que 20 minutes sont nécessaires pour l'instrument BOTDA. Les paramètres d'acquisition des instruments sont répertoriés en annexe F.

Dans notre cas, on s'est focalisé sur les effets induits par des irradiations γ et/ou X (cf. 2.1.1) sur des fibres monomodes de compositions dédiées telles que les fibres SMF-Ge14 et SMF-F14. Les fibres étudiées en BOTDA ont été irradiées sous rayonnement γ (dose ~ 10 MGy et débit de dose ~15 kGy/h) tandis que celles étudiées en BOTDR –[24]) ont été irradiées sous rayonnement X (dose ~ 1 MGy et débit de dose ~4 kGy/s).

Fibre dopée Ge, SM-Ge14

Contrairement à la réponse du BOTDA, les effets des radiations sur l'aire du pic dépendent fortement de la longueur de la fibre pour le BOTDR. En effet, le BOTDR est un instrument qui ne nécessite l'accès qu'à un seul bout de la fibre sous test. Cependant, à une distance de 5 m du début de la fibre connectée à l'instrument et ayant reçue une dose cumulée de 1 MGy, le signal a encore un bon rapport signal sur bruit (Figure 75 (b)). L'aire du pic est réduite de seulement 40% pour le BOTDR (Figure 76(2)), comparé à 80% observé à la même distance de la même fibre irradiée à la même dose par le BOTDA (Figure 76(1)).

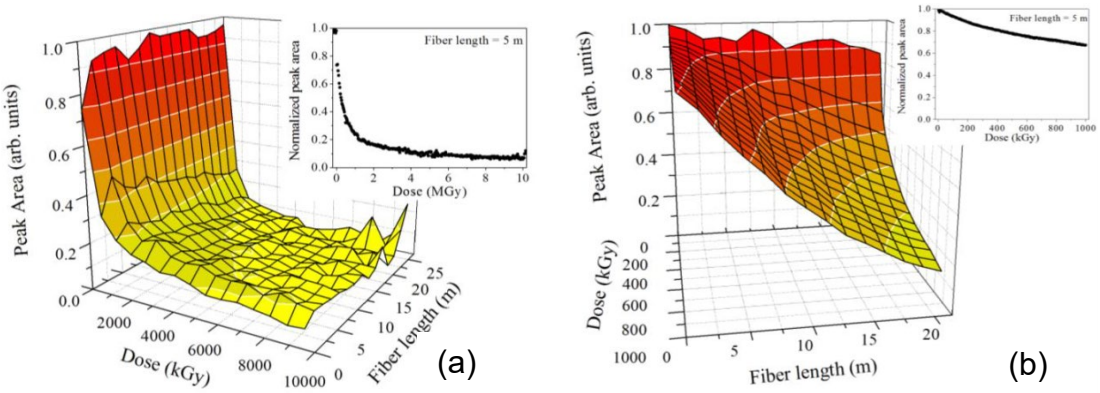
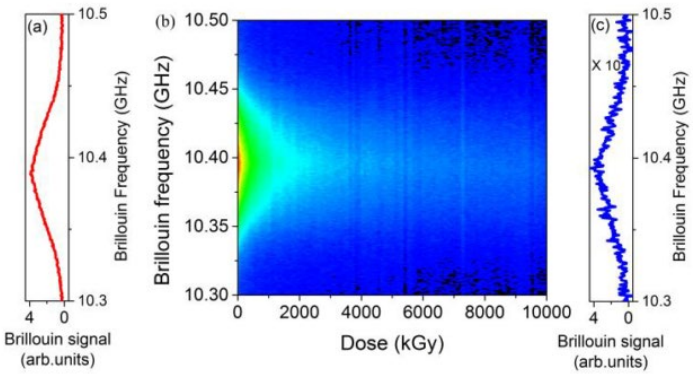


Figure 75: Evolution de l'aire du pic Brillouin en fonction de la longueur de la fibre SM-Ge14 et de la dose reçue, analysée par BOTDA (a) et BOTDR (b).[109]

(1)



(2)

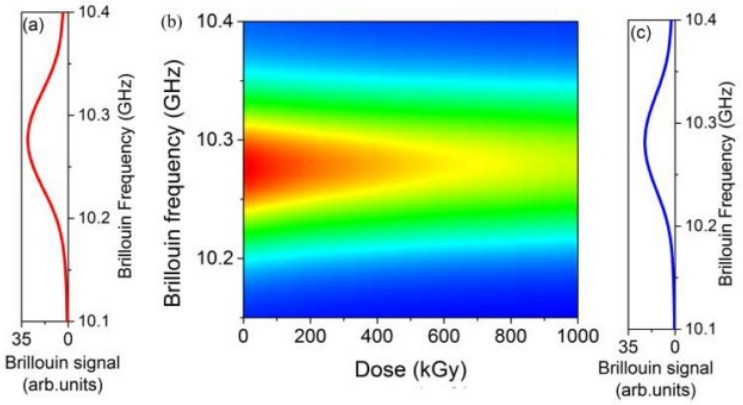
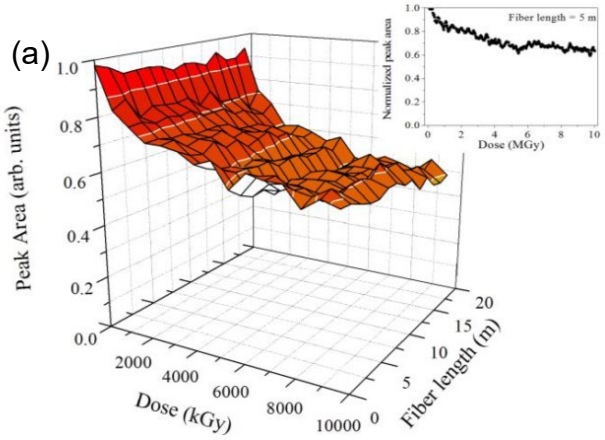


Figure 76: Evolution de l'intensité du signal Brillouin en fonction de la fréquence Brillouin et de la dose reçue, à la position de 5 m de la fibre SM-Ge14, analysé par BOTDA (1) et BOTDR (2). Du rouge au bleu, l'intensité diminue. [109]

Fibre dopée F, SM-F14

La Figure 77 montre qu'il n'y a pas de réduction significative de la signature Brillouin quand une fibre résistante aux radiations est investiguée avec l'instrument BOTDR à une dose de 1 MGy. Une réduction de seulement 20 % est observée à une distance de 20 m de la fibre et à une dose de 1 MGy. Par exemple, la Figure 77 montre que l'intensité du signal Brillouin à la distance de 5 m de la fibre dopée F n'est pas significativement influencée par une irradiation de 1 MGy, contrairement à la réponse observée avec la fibre dopée Ge (cf.Figure 78). Ces résultats sont totalement cohérents avec l'évolution des pertes à la longueur d'onde de pompe, 1.55 µm. En effet, les mesures RIA présentées dans la partie 3.2.2.1 montrent que les plus faibles pertes sont de l'ordre de 59 dB/km pour la fibre dopée F. En effet, pour comparaison à 1550 nm et pour une dose de 10 MGy, les niveaux de RIA sont de l'ordre de 375 dB/km pour la fibre dopée Ge et de 50 dB/km pour la fibre dopée F.



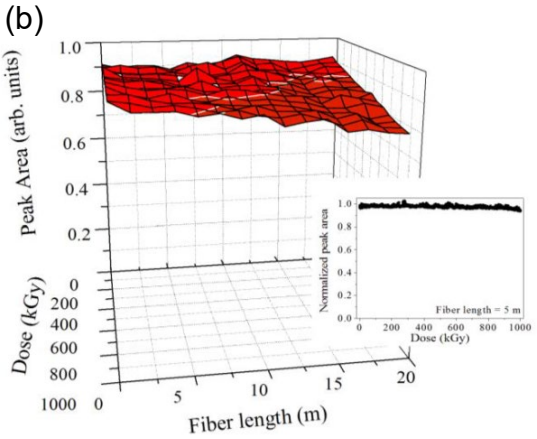


Figure 77: Réduction de l'aire du pic Brillouin en fonction de la longueur de la fibre SMF-F14 et de la dose reçue, analysée par BOTDA (a) et BOTDR (b). [109]

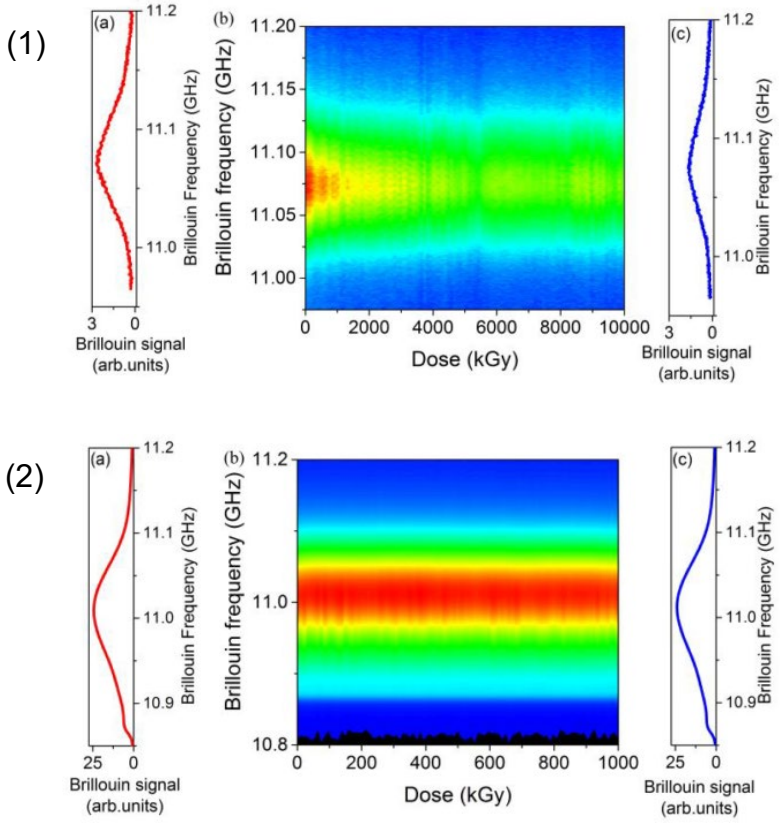


Figure 78 : Evolution du signal Brillouin en fonction de la dose reçue, à la position de 5 m de la fibre SMF-F14, analysé par BOTDA (1) et BOTDR (2). Du rouge au bleu, l'intensité diminue [109].

Comparaison des performances des instruments BOTDA (OZ) et BOTDR (Febus)

Les Tableau 12 et Tableau 13 récapitulent leurs évolutions respectives du rapport signal-sur-bruit avec l'irradiation et la réduction de l'aire du pic Brillouin induit par les radiations (1 MGy).

Tableau 12: Evolution du rapport signal sur bruit (en dB) induite par les radiations pour les instruments BOTDA et BOTDR, sachant que la RIA (après une dose d'irradiation de 1 MGy) pour la fibre dopée Ge est de 180 dB/km à la longueur d'onde d'interrogation de 1.5 micron (cf. 3.2.2.1).

	BOTDA		BOTDR	
	Avant irradiation	Après irradiation (1 MGy)	Avant irradiation	Après irradiation (1 MGy)
SM-Ge14	10.7 dB	9 dB	30 dB	28.8 dB
SM-F14	12 dB	11.9 dB	30.9 dB	30.8 dB

Tableau 13: Effet d'une dose d'irradiation de 1 MGy sur la réduction de l'aire du pic Brillouin pour les instruments BOTDA et BOTDR.

	Position sur la fibre (m)	BOTDA	BOTDR
SM-Ge14	5	80 %	40 %
	20	80 %	85 %
SM-F14	5	20 %	15 %
	20	30 %	20 %

Quand la fibre SM-Ge14 est couplée avec l'instrument BOTDA, le rapport signal-sur-bruit diminue de 12 à 11.9 dB (c'est-à-dire de moins de 1 % environ) pour une dose cumulée reçue de 1 MGy, alors qu'aucun effet significatif n'est observé pour la fibre SM-F14. Lorsque l'on utilise l'instrument BOTDR, le rapport signal-sur-bruit varie seulement de 5 %, indépendamment de la fibre testée. Pour notre application, le BOTDR semble le mieux adapté. Car, il présente une meilleure dynamique avec un effet direct sur la qualité des réponses optiques correspondantes. Cela se reflète sur le traitement de donnée qui se complexifie et qui augmente l'erreur sur la détermination de la position du pic Brillouin pour le BOTDA et par conséquent sur la mesure des grandeurs étudiées avec des effets possibles sur la localisation spatiale des évènements lors de mesures distribuées.

6.8 Conclusion sur la vulnérabilité de la rétrodiffusion Brillouin

Nous avons étudié les performances de différentes technologies Brillouin (PPP-BOTDA de Neubrex, BOTDA d'OZ, BOTDR de Febus Optics) et la réponse de l'interrogateur Brillouin face aux effets couplés ou cumulés des paramètres 'température', 'déformation', 'présence d'hydrogène' et 'radiation'. Les résultats peuvent se résumer en:

- Une attention particulière doit être dévolue aux paramétrages des instruments de mesures. Un compromis entre le temps de mesure et une bonne résolution est à choisir selon l'expérience menée : Le PPP-BOTDA de Neubrex technologies donne un meilleur compromis entre le temps de mesure rapide et une bonne résolution spatiale que la technologie BOTDA OZ pour une même longueur de 20 m : 4 min de mesure pour 2 cm de résolution (PPP-BOTDA) et 15 min de mesure pour 1 m de résolution.
- Pour la technologie PPP-BOTDA : lorsque l'on augmente la puissance du laser de pompe de 5 dBm, le signal réponse augmente de 4 dB, quelle que soit la valeur de la sonde. Lorsque l'on augmente le laser sonde de 3 dBm, l'intensité augmente de 3 dB, quelle que soit la valeur du laser de pompe. Le couple « 3 dBm (sonde) / 30 dBm (pompe) » semble adapté au suivi des environnements étudiés dans ce travail.
- Le rapport signal-sur-bruit varie selon le type de technologie Brillouin couplée à une même fibre : Pour l'instrument BOTDA associé avec la fibre SM-Ge14, le rapport signal-sur-bruit diminue d'environ 16 % pour une dose cumulée reçue de 1 MGy, alors qu'aucun effet significatif n'est observé pour la fibre SM-F14. Lorsque l'on utilise l'instrument BOTDR, le rapport signal-sur-bruit varie seulement de 4 %, indépendamment de la fibre testée. Le couple BOTDA / SM-F14 semble adapté au suivi de l'environnement ayant 1 MGy de dose cumulée étudié dans ce travail.
- La fréquence Brillouin diminue au cours de la désorption de l'hydrogène d'une fibre vierge ou pré-irradiée à 10 MGy: En effet, les fibres vierges dopées Ge, F et N montrent respectivement des variations de fréquences Brillouin d'environ 14 MHz, 19 MHz, 18 MHz, lors de la désorption de l'hydrogène. Ce résultat est cohérent avec la littérature [57], qui montre une différence de fréquence Brillouin de 18 MHz au cours de la désorption d'une fibre G652. Cette évolution est attribuée à la variation de la vitesse acoustique Va de l'ordre de 5 m/s.
- La fréquence Brillouin centrale reste essentiellement inchangée quelle que soit la contrainte appliquée au cours de l'irradiation, pour les fibres dopée Ge, N et F. Ce résultat est en accord avec la littérature : Une étude [14] sur la fibre dopée Ge (en ligne et post-mortem) a montré que l'effet de l'irradiation sur la fibre est indépendant de la contrainte appliquée.

- Au cours d'une irradiation allant jusqu'à 56 kGy avec un débit de dose de 370 Gy/h, les coefficients de déformation (en MHz/g) varient peu : 0,7%, 1,2% et 0,9% pour les fibres dopées F, Ge et N respectivement. De tels changements sont dans les incertitudes expérimentales de nos mesures.
- Les coefficients Brillouin en déformation $C\varepsilon^B$ d'un même type de fibre diminue d'environ 0.006 MHz/g entre un échantillon vierge et un échantillon ayant reçu une dose de 56 kGy : cela peut avoir un effet modéré sur les mesures absolues de la déformation tout au long de la fibre.
- Les fréquences Brillouin mesurées en post-mortem varient avec la dose déposée : en effet, leurs changements pour les échantillons SM-F14, SM-Ge14 et SM-N sont respectivement de 3 MHz, 10 MHz et 20,5 MHz. Ces résultats sont légèrement supérieurs à ceux précédemment présentés dans la littérature [14]
- Une réelle amélioration de la tenue aux radiations sous chauffe des fibres optiques dopées F, N et Ge est observée : l'erreur de mesure est divisée par environ 4 entre la mesure à température ambiante et celle à 120°C.
- Le coefficient Brillouin en température C_T^B change avec le type de revêtement (avec ou sans Carbone) de la fibre : en effet, le changement de revêtement (ajout de carbone) induit une augmentation du coefficient d'environ 0.20 MHz/°C pour les fibres vierges et irradiées à 1 et 3 MGy.
- Le coefficient Brillouin de température C_T^B est indépendant de la contrainte appliquée, même après irradiation à la dose maximale de 56 kGy : Leurs ordres de grandeur sont de 1,170 MHz/°C (SM-F14), 0,913 MHz/°C (SM-Ge14) et 1,184 MHz/°C (SM-N). Ces résultats sont plus élevés que la valeur de la fibre SMF28 vierge de référence (1.07 MHz/°C) [23][43] et la mesure de la thèse de C. Cangialosi (1.09 MHz/°C pour la fibre vierge SM-Ge14) [14].
- L'impact de la désorption d'hydrogène (pour un chargement à température ambiante, 110 bars, pendant 2 semaines) sur des mesures Brillouin réalisées sur des fibres pré-irradiées à 10 MGy et vierges dopées F, Ge et N a été étudié : Les fréquences Brillouin centrales à saturation d'H_2 pour les fibres dopées F et N sont identiques dans les 2 cas présentés : aucun impact de la pré-irradiation n'est noté.
- Les performances de l'interrogateur Brillouin PPP-BOTDA sur des fibres dopées Ge, N et F pendant les expériences combinant irradiation γ et température (RT, 50°C, 100°C et 120°C) montrent que la température améliore la tenue des capteurs sous irradiation pour les fibres optiques et configurations de capteurs testées. Il faudrait améliorer le système de chauffe pour homogénéiser la répartition thermique sur l'ensemble de l'échantillon (sans ajout de contrainte mécanique).

Pour notre application Cigéo, l'interrogateur Brillouin est un élément intéressant pour la chaîne de mesure capteur à fibre optique. Pour conclure succinctement sur ces 3 instruments : le plus rapide est le BOTDR, le plus reproductible est le BOTDA et le plus sensible est BOTDR.

Chapitre 7: Conclusions générales de la thèse

Ce dernier chapitre résume les réponses apportées par la thèse et les perspectives restantes à instruire.

Dans cette thèse réalisée en collaboration entre l'Andra et le laboratoire Hubert Curien, nous avons évalué les performances de capteurs à fibre optique pour la surveillance du stockage géologique de déchets radioactifs à vie longue, le projet Cigéo. Cette application demande un suivi régulier, déporté et réparti de l'évolution de différentes grandeurs d'intérêt. Pour cela, nous avons évalué les performances des capteurs à fibre optique de température et de déformation fondées sur les diffusions Brillouin, Rayleigh, ou Raman. Nous avons quantifié les effets des rayonnements, de la température, de la déformation et de la présence d'hydrogène sur la qualité des mesures réparties de température ou de déformations. Notre étude comprend différentes combinaisons de ces paramètres. Elle a été réalisée avec différents interrogateurs, pour chacune des trois rétrodiffusions et des fibres optiques contenant différents dopants, en particulier Ge et F.

- **Réponse des systèmes de mesure de rétrodiffusion Raman**

Nos études se sont portées la mesure répartie de température fournie par des interrogateurs Raman, de marque Silixa et Viavi, raccordés à différentes fibres optiques multimodes, placées sous irradiation. On sait que la dépendance spectrale des pertes induites et le ΔRIA dégradent la justesse de la mesure de température et la portée maximale du système complet. Dans ce cadre, les potentialités de deux configurations single-end et double-end associées aux fibres irradiées et pré-irradiées ont été étudiées.

Nous pouvons conclure qu'une pré-irradiation des fibres optiques est une solution intéressante car elle attenue l'erreur de mesure induite par les radiations et sa dépendance avec la distance dans la fibre.

La configuration double-end du RDTS Silixa permet de fournir une mesure de température correcte quelle que soit la dose reçue et la position le long de la fibre sensible.

La solution RDTS single-end Viavi permet la mesure des deux composantes S et AS et de la diffusion Raman d'acquérir les traces OTDR, donc de remonter aux pertes linéiques, aux longueurs d'onde Stokes et Anti-Stokes. En outre, elle ne nécessite que l'accès à un seul bout de la fibre, ce qui la rend plus robuste aux casses et dégradations lors de la pose des fibres optiques en chantier de génie civil. Elle pourrait être adaptée et appliquée aux mesures de températures dans le cadre du projet Cigéo.

Malgré des difficultés expérimentales pour réaliser un essai couplant simultanément les deux paramètres température et radiation, nous avons montré très nettement que la température améliore significativement la tenue aux radiations des systèmes fondés sur la rétrodiffusion Raman.

Pour notre application Cigéo, l'interrogateur Raman reste un élément essentiel pour la chaîne de mesure de température, cela implique d'utiliser une architecture d'interrogateur RDTS et une fibre durcie, dédiées à l'application pour minimiser l'impact de la RIA et s'affranchir de celui de la $\Delta\alpha$. Avec ces précautions, on pourra réaliser des mesures réparties de température sur 35 m avec quelques degrés d'incertitude jusqu'à 1 MGy.

- **Réponse des systèmes de mesure de rétrodiffusion Rayleigh**

Nous avons étudié les performances de différentes technologies Rayleigh (TW-COTDR de Neubrex et OFDR de Luna technology) face aux effets cumulés ou simultanés des paramètres 'température', 'déformation', 'présence d'hydrogène' et 'radiation'.

Ces deux instruments produisent des réponses similaires en fréquence Rayleigh, lorsque la fibre est soumise à des sollicitations thermiques, mécaniques et radiatives. Ils résistent bien aux radiations.

L'impact des radiations (faibles dose et débit de dose) est minime sur les mesures de rétrodiffusion Rayleigh. La mesure de température ou de déformation par rétrodiffusion Rayleigh est validée expérimentalement. Concernant l'impact des fortes doses, le paramétrage des instruments doit être adapté à ce niveau radiation.

On constate que la fibre F confirme son durcissement et robustesse au regard de l'évolution de sa signature Rayleigh sous irradiation et qu'elle est une candidate intéressante pour l'application visée.

L'impact de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Rayleigh est très important, jusque 120 GHz, ce qui pourrait correspondre à 80°C ou 80 µm/m d'erreurs de mesure de température ou de déformation. Il est dû aux variations d'indice de réfraction induite par la migration de l'hydrogène dans la silice. Dans la pratique, il faudra distinguer le shift en fréquence dû à de l'hydrogène par rapport à l'impact des paramètres à mesurer mais aussi son action sur l'indice de réfraction qui altèrera la location spatiale des évènements le long de la fibre optique lors de mesures distribuées. Pour contourner cette limite intrinsèque d'un système de mesure répartie de déformation fondé sur la rétrodiffusion Rayleigh, il faudra utiliser des fibres optiques hermétiques à l'hydrogène, quelle que soit la fibre dopée Ge ou F utilisée.

Quelle que soit la fibre et le dopant (Ge ou F), un décalage Rayleigh de 120 GHz est noté lors de la migration de l'hydrogène à une concentration de 450mol/m^3 dans la

fibre. Ce grand décalage pourrait introduire une mauvaise interprétation, par conséquence, un revêtement hermétique à l'hydrogène tel que du carbone est nécessaire pour l'application de Cigéo.

Les expérimentations réalisées pour mettre en évidence des effets couplés de l'hydrogène et des radiations post-mortem ont montré qu'il n'y a aucun impact de la pré-irradiation sur la signature Rayleigh associée à la présence d'hydrogène. Concernant les effets couplés de la température et des radiations, les fréquences Rayleigh varient au maximum de 8 GHz à 1 MGy pour la fibre Ge (respectivement de 4 GHz pour la fibre dopée F). Ces variations sont causées par l'inhomogénéité de la répartition des températures sur les échantillons et l'incertitude des capteurs de référence et des thermocouples.

Pour notre application Cigéo, l'interrogateur Rayleigh est un élément très intéressant pour la chaîne de mesure répartie de déformation. Avec l'accès à un seul bout de la fibre optique, il permet d'effectuer une mesure de déformation (ou de température) sur 45 m de portée, avec quelque µm/m d'incertitude jusqu'à 1 MGy.

- **Réponse de l'interrogateur Brillouin**

Nous avons étudié les performances de capteurs à fibre optique de température et de déformation, en environnement sévère via la diffusion Brillouin. La comparaison des technologies Brillouin PPP-BOTDA de Neubrex, BOTDA de OZ et BOTDR de Febus Optics sous radiation a été réalisé. Les influences des quatre paramètres (température, radiation, déformation, hydrogène) et de leurs effets combinés ont été évaluées.

Pour les fibres vierges, dopées F et Ge, les vitesses acoustiques déduites des mesures Brillouin et celles calculées à partir de la littérature (et de la composition chimique de la fibre) sont quasi-identiques.

Nous confirmons également que la sensibilité mécanique de la rétrodiffusion Brillouin n'est pas impactée par l'irradiation à de tels niveaux de dose.

La température réduit l'influence des rayons γ sur la rétrodiffusion Brillouin. Ce résultat est très encourageant pour l'application Cigéo où les effets de la température et de l'irradiation se combineront.

Le revêtement carbone n'a pas d'influence à faible dose, néanmoins des études complémentaires sont indispensables pour connaitre la tenue et le comportement de ce revêtement pour de fortes doses d'irradiation.

Dans notre cas, l'application Cigéo requiert une résolution de mesure de déformation (ou température) d'environ 20µm/m (ou 1°C soit 1 MHz) cela nous conduit vers un choix de résolution spatiale haute afin d'améliorer la qualité de mesure et le

moyennage temporel. Il faudra réaliser des mesures les plus moyennées (jusqu'à 20 min typiquement) pour réduire l'incertitude de mesure.

➢ Conclusion sur l'application Cigéo

Afin d'obtenir des mesures réparties de température, il est conseillé d'utiliser les caractéristiques suivantes pour le capteur à fibre optique :

- Dopant : F
- Revêtements primaires : Revêtement carbone
- Pré-traitement : Pré-irradiation
- Rétrodiffusion : Raman

Afin d'obtenir des mesures réparties de déformation, il est conseillé d'utiliser les caractéristiques suivantes pour le capteur à fibre optique :

- Dopant : F
- Revêtements primaires : Revêtement carbone
- Pré-traitement : Pré-irradiation
- Rétrodiffusion : Brillouin

Notre travail a cerné le type de fibre optique à utiliser pour ces environnements sévères. Les interrogateurs conditionnent le type de fibre à utiliser ainsi que leurs longueurs et, par conséquent, permettent de bien cerner les dimensions des zones à surveiller. Les qualités des résultats de mesures sont gouvernées par les choix de plusieurs paramètres et notamment : la durée de l'impulsion, la puissance injectée dans la fibre, les pas fréquentiels, la durée de la mesure… qui se répercutent directement sur les résolutions finales (spatiales et fréquentielles) des grandeurs mesurées. Une attention particulière doit être attachée à ces critères.

➢ Perspectives

Les principales perspectives, qu'il reste à étudier afin de pouvoir tirer tout le potentiel des capteurs à fibre optique dans le cadre de notre application, sont les suivantes :

- Utiliser des fibres optiques hermétiques à l'hydrogène,
- Etudier la durabilité du carbone sous irradiation γ,
- Utiliser l'interrogateur Rayleigh comme alternative au Brillouin,
- Dimensionner les budgets optiques des interrogateurs au regard de l'application visée en incluant les atténuations induites aux longueurs d'ondes d'études,
- Etudier le budget optique au regard de l'application visée,

- Etudier le comportement de la fibre dans un câble car une fibre en revêtement primaire serait cassée dès l'installation sur un chantier de génie civil.

Pour répondre à ces perspectives, l'Andra est financé par les projets européens MODERN2020 et ITN-Finesse. Une nouvelle thèse utilisera les travaux ici présentés comme point de départ.

Annexe A : Méthode d'analyse des mesures de rétrodiffusion au cours d'une irradiation

Durant chaque essai en ligne, l'évolution de la température ambiante a été suivie avec un thermocouple TC (piloté par un enregistreur de donnée Picolog [94]), car souvent l'irradiation s'accompagne d'une élévation de cette température. Afin de ne mettre en évidence que les seuls effets de l'irradiation sur la mesure de température, toutes les mesures Brillouin et Rayleigh ont été corrigées de ces fluctuations de température via le calcul (Equation A1) suivant :

$$\upsilon_{B\ ou\ R} corrigée\ (t) = \upsilon_{B\ ou\ R} mesurée(t) - C_T^{B\ ou\ R} \times T_{TC}(t) \qquad \textit{(Équation A1)}$$

De plus, toutes les valeurs de débits de dose de l'irradiateur X du laboratoire Hubert Curien ont été converties de la valeur pour l'eau donnée par le dosimètre PTW UNIDOS E [95] à celle pour la silice, grâce au calcul (Equation A2) suivant :

$$\textit{Débits de dose } (SiO_2) = 1.67 \times \textit{Débit de dose (eau)} \qquad \textit{(Équation A2)}$$

Ces calculs liés aux irradiations sont intégrés aux protocoles de traitement de données (programme Matlab ou logiciel dédié) associés à chaque instrument.

Ce protocole de traitement de données nous a permis également de caractériser les erreurs de mesure, qui sont de 2 types : l'erreur systématique (valeur erronée de la mesure de référence, mauvaise calibration et erreur liée à la résolution spatiale ou à la résolution de détection de l'instrument par exemple) et l'erreur aléatoire (erreur liée au bruit de mesure, à la répétabilité et à la justesse par exemple). La répétabilité (fiabilité) est la capacité d'un capteur de donner une mesure répétable [96][97] .

La justesse est la différence entre le résultat mesuré et la valeur idéale. Ces notions sont illustrées dans la Figure A1(a). Si la mesure est répétable et juste, on dit que la mesure est exacte. La résolution spatiale d'un instrument est la distance minimale d'une fibre pour laquelle le mesurande peut changer [98]. Il ne faut pas la confondre avec la résolution de détection qui est le minimum de changement d'une mesure détecté par l'instrument. L'erreur systématique a été corrigée et l'erreur aléatoire a été considérée (± erreur aléatoire).

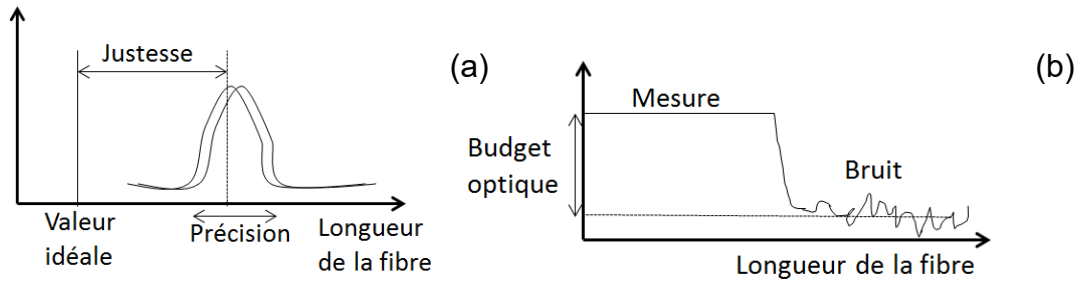


Figure A1 : Illustration des notions de justesse, précision (a) et de budget optique (b).

Une autre notion liée au bruit de mesure est le budget optique, illustré dans la Figure A1(b). Le budget optique est la différence entre le niveau de puissance transmise par la source et le niveau de puissance optique minimum détectable (en dB).

Annexe B : Comsol™ : calcul d'indice effectif de propagation

Nous avons utilisé le logiciel Comsol™ pour calculer l'indice effectif n_{eff} des fibres SM-F14, SM-Ge14 et SM-N. Dans le mode analytique de la physique électromagnétique du logiciel, trois principaux paramètres sont à définir : la géométrie, le matériau et l'indice de la fibre à modéliser.

Pour le choix de la **géométrie** de la fibre, nous définissons l'unité de longueur (µm), le rayon du cœur de la fibre (2.5 µm) et celui de la gaine (62.5 µm).

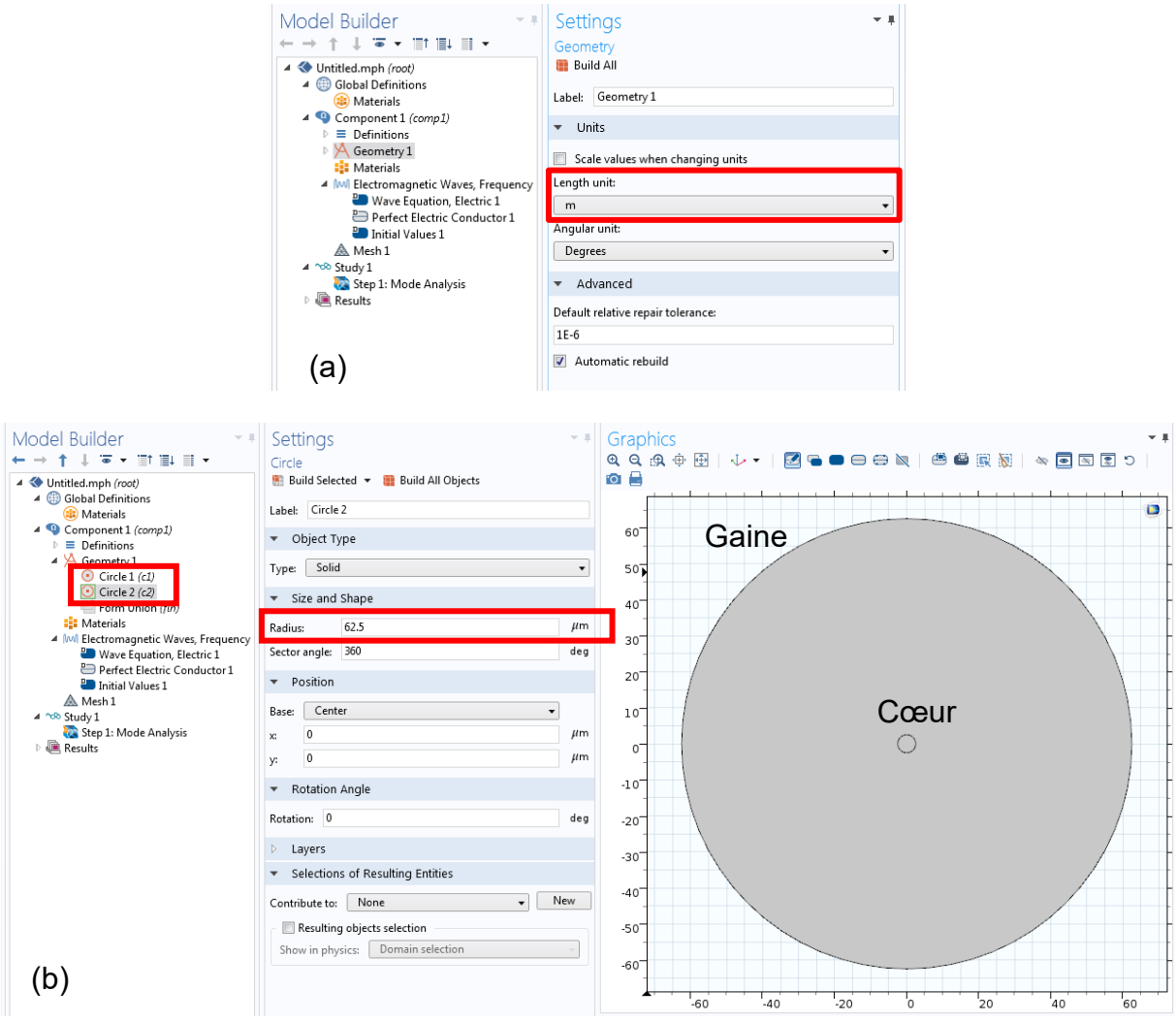


Figure B1 : (a) Choix de l'unité de longueur et (b) des dimensions du cœur et de la gaine de la fibre par le logiciel Comsol.

Pour le choix du **matériau** de la fibre, nous définissons le type de matériau (la silice pour notre cas), le profil d'indice de la fibre, l'équation définissant l'emplacement du

matériau (l'équation d'un cercle, $n(x^2+x^2)^{0.5}$)) et le type de maillage. Plus la structure de la maille est fine, plus calcul sera précis et plus le calcul prendra du temps. Nous choisissons généralement un maillage plus précis dans le cœur que dans la gaine (maillage normal).

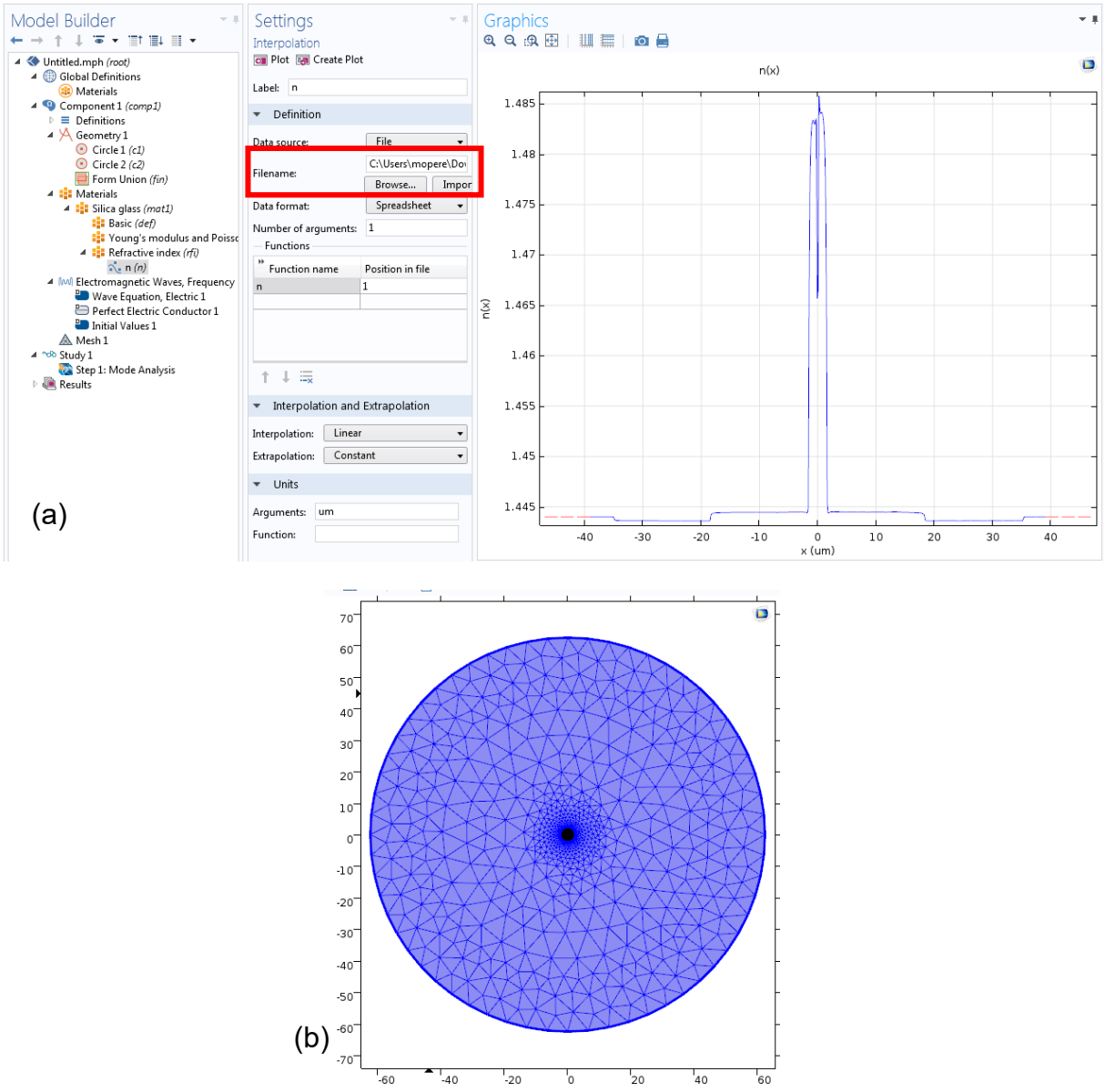


Figure B2 : (a) Choix du profil d'indice et (b) maillage de la fibre par le logiciel Comsol.

Pour le choix du **l'indice** de la fibre, nous définissons la longueur d'onde λ (constante de la vitesse de la lumière / 1.55 µm), le nombre de mode (généralement 6 pour une fibre monomode) et la borne supérieure de l'indice effectif.

Dans les résultats obtenus, nous cherchons les solutions les plus viables et ressemblant à un mode existant. L'indice effectif est alors trouvé.

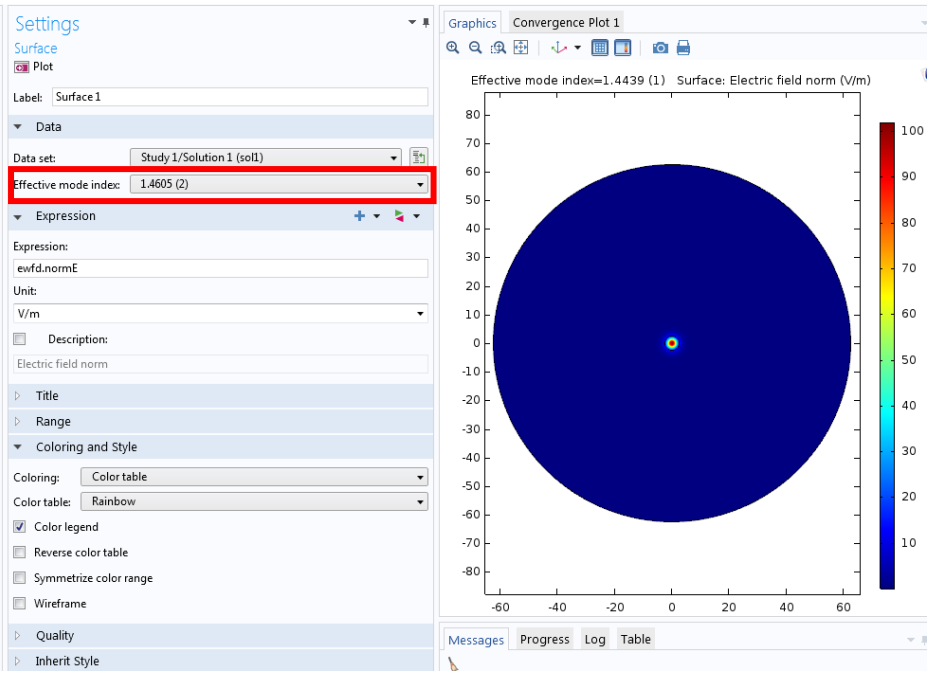


Figure B3: Choix d'un mode existante et de l'indice effectif.

Annexe C : calcul des diamètres de mode des fibres optiques utilisées

Les diamètres de mode MFD est une mesure de l'étendue transverse de l'intensité lumineuse du champ électromagnétique LP_0 se propageant dans une fibre monomode. Par définition, le MFD est lié à la distribution de l'intensité $F^2(\theta)$ du champ lointain par la relation :

$$MFD = 2\omega = \frac{\lambda}{\Pi}\left[\frac{2\int_0^{\Pi/2} F^2(\theta)\sin\theta\cos\theta\, d\theta}{\int_0^{\Pi/2} F^2(\theta)\sin^3\theta\cos\theta\, d\theta}\right]^{1/2} \quad \textit{(Équation C1)}$$

Où θ est l'angle du champ lointain.

Dans notre cas, le MFD a été déterminé par simulation, en utilisant le logiciel Comsol. Les résultats pour les différentes fibres SM-Ge14, SM-F14 et SM-N sont présentés dans la Figure C1.

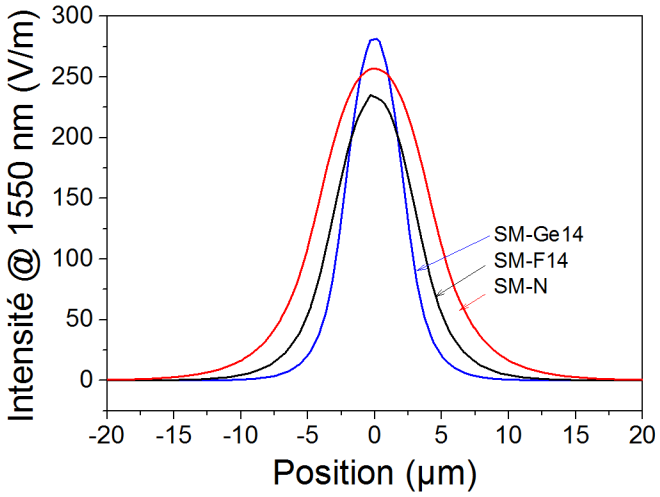


Figure C1: Diamètre de mode des fibres SM-Ge14, SM-F14 et SM-N à 1550nm.

Pour les fibres SM-Ge14, SM-F14 et SM-N, nous aboutissons alors à des valeurs de MFD respectif de 4.9, 6.9 et 9.1 µm. Ces valeurs sont plus faibles que celle de la fibre de référence SMF28 (10.4 ±0.5 µm).

Ces calculs permettent d'estimer les pertes L de couplage lorsque l'on connecte 2 fibres de conception différente sans décalage longitudinal, axial et angulaire [91]:

$$L = 20\,log\frac{1+(\frac{w_g}{w_d})^2}{2(\frac{w_g}{w_d})} \quad \textit{(Équation C2)}$$

Où w_g et w_d sont respectivement les largeurs à mi-hauteur du mode des fibres de gauche et de droite de la connexion.

Le Tableau C1 ci-dessous répertorie les pertes de couplage pour la connexion de 2 fibres monomodes étudiées. La connexion de la fibre SM-Ge14 avec la fibre SM-N produit plus de pertes (1.60 dB) que les connexions de la fibre SM-F14 avec les

fibres SM-Ge14 et SM-N (0.34 dB). Pour connecter en série les fibres optiques étudiées, il nécessaire de prendre en compte ces pertes de couplage par connexion, mais également l'atténuation linéaire induite par les radiations

Tableau C1: Pertes de couplage pour la connexion de 2 fibres monomodes étudiées.

Fibre de gauche /fibre de droite	**Pertes (dB)**
SM-Ge14 / SM-N	1.60 ± 0.3
SM-Ge14 / SM-F14	0.34 ± 0.5
SM-N / SM-F14	0.34 ± 0.6

Annexe D: Etude préliminaire sur les fibres sensibles aux radiations

Les expériences présentées dans ce manuscrit ont été mises à profit pour étudier des fibres optiques particulièrement sensibles aux radiations, a priori peu adaptées à la mesure de température ou de déformations sur des ouvrages nucléaires mais pertinentes pour des ouvrages de génie civil ou pour effectuer des mesures dosimétriques. Dans sa thèse, Y. Sikali avait prévu que le dopant Al augmente la sensibilité Brillouin mais ne l'avait pas démontré expérimentalement [92].

Deux fibres optiques monomodes ont été étudiées dans la thèse, dopées Al ou P, dont les caractéristiques sont reportées dans le tableau suivant. Elles seront dans la suite comparées à une fibre plus standard, dopée Ge.

Tableau D1 : Caractéristiques des fibres sensibles aux radiations

Caractéristiques des fibres monomodes				**Historiques de traitements des échantillons**		
Noms de la fibre	**Coeurs**	**Gaine**	**Revêtement**	**Contraintes**	**Chauffées**	**Pré-irradiées**
SM-Al	Al-SiO_2 (8wt.%)	Pure silice	Acrylate	Jusqu'à 359g	Jusqu'à 90°C	
SM-P	Ge-SiO_2	P-SiO_2	Polyimide	Jusqu'à 1200µε		
					Jusqu'à 90°C	

Fibre dopée Al, SM-Al vierge et contrainte

Des échantillons de longueur 60 m ont été caractérisés thermiquement dans la plage RT-80°C. Le protocole d'application des contraintes a été décrit précédemment avec des enroulements autour d'un support cylindrique de 11 cm de diamètre et sur trois niveaux de paliers (16 g, 169 g et 359 g). Les résultats regroupés dans la figure 69 permettent d'extraire les coefficients de température Rayleigh C_T^R pour chaque tronçon. Les valeurs correspondantes sont respectivement de: 1.652 GHz/°C, 1.701 GHz/°C et 1.716 GHz/°C, valeurs reportées dans le Tableau D2. La sensibilité en température de cette fibres optique est plus grande que celle de la fibre SMF28 non contrainte (1.5 GHz/°C) et celui de la fibre SM-Al non contrainte (1.322 GHz/°C) [72].

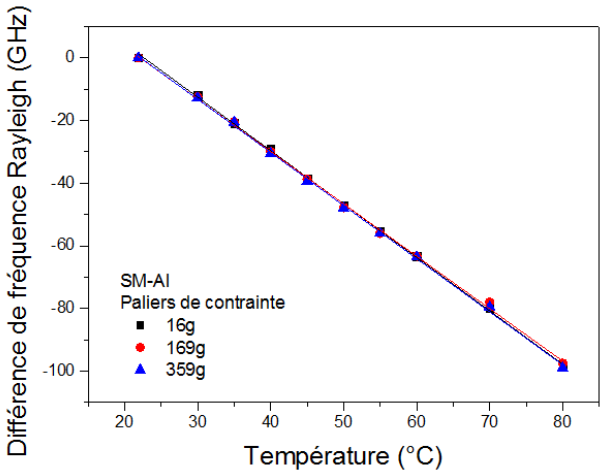


Figure D1: Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la température pour la fibre SM-Al à différents paliers de contrainte (16-169-359g).

Tableau D2: Coefficients en température Brillouin C_T^R extrait des mesures Rayleigh et leurs erreurs relatives pour la fibre SM-Al.

C_T^R (GHz/°C)			
N°palier	**1**	**2**	**3**
Contrainte (g)	16	169	359
SM-Al	1.65±0.01	1.70±0.02	1.71±0.02

Atténuations induites par les radiations

La caractérisation de la RIA des fibres monomodes étudiées est présentée dans la Figure D2 suivante. Nous comparons 3 différentes fibres : celle dopée Ge, celle dopée Al et celle dopée P. Ces mesures de RIA à 1550 nm ont été réalisées grâce à une mesure du spectre en ligne durant l'irradiation allant jusqu'à une dose de 1 MGy (2.6 kGy/h).

Comme attendu [72], la fibre dopée Al est clairement la fibre la plus sensible aux radiations : avec seulement quelques mètres de fibre, le signal a totalement été perdu à une dose de 0.27 kGy (avec un débit de dose de 2.6 kGy/h). A une dose de 3.94 kGy, nous avons également perdu la fibre SM-P, alors que la fibre SM-Ge pouvait encore mesurée jusqu'à la fin de l'irradiation (dose de 1MGy). Il est important de noter qu'un faible dopage P en cœur de la fibre permet d'augmenter significativement la sensibilité aux radiations d'un facteur 10.

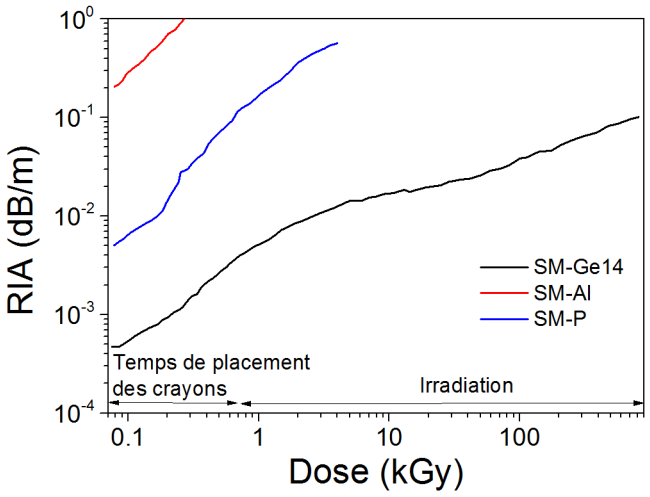


Figure D2: Evolution des pertes linéiques induites par les radiations en fonction du temps d'irradiation, à débit de dose représentatif de 2.6 kGy/h à 1550 nm pour les fibres SM-Ge14, SM-P et SM-Al.

Calibrations en température

Dans cette partie, les différents types d'interrogateurs (Brillouin et Rayleigh de l'instrument Neubrex) sont calibrés pour ces différentes fibres optiques en fonction de la température afin de déterminer leurs coefficients en température $C_T^{B \text{ ou } R}$.

Réponse de l'interrogateur Brillouin

Ces valeurs des coefficients C_T^B sont 0.51±0.36 MHz/°C (SM-P) et 0.61±0.30 MHz/°C (SM-Al), représenté dans la Figure D3. Ces coefficients en température sont plus petits que celui de la fibre SMF28 de référence (1.07 MHz/°C).

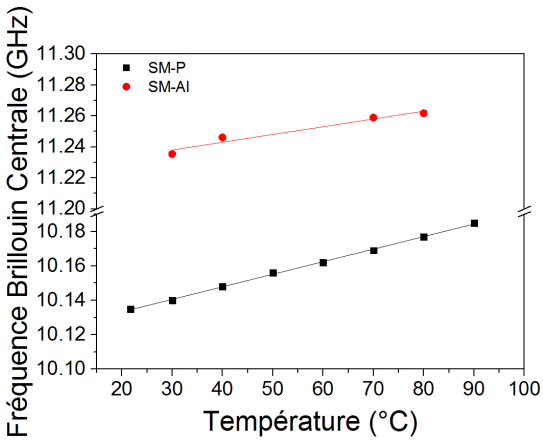


Figure D3: Evolution de la fréquence Brillouin en fonction de la température pour les fibres SM-P et SM-Al.

Réponse de l'interrogateur Rayleigh

Les coefficients C_T^R des fibres dopées Al et P sont respectivement de 1.70 ± 0.04 GHz/°C et de 1.22 ± 0.02 GHz/°C (Figure D4). Le coefficient de la fibre Al est plus grand que celui de la fibre SMF28 (1.5 GHz/°C) et que celui accessible dans la littérature (1.322 GHz/°C) pour une fibre de ce type [72], alors que celui de la fibre dopée P est plus petit que celui de la fibre SMF28.

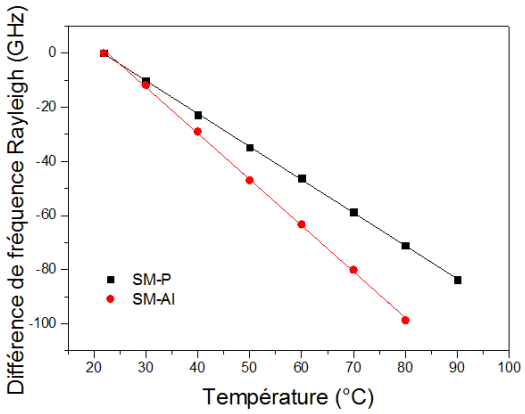


Figure D4: Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la température pour les fibres SM-P et SM-Al.

Calibrations en déformation

Dans cette partie, nous étudions le potentiel des différents types d'interrogateurs (Brillouin et Rayleigh de l'instrument Neubrex) à mesurer la déformation avec ces fibres optiques. Ces expériences de calibration des fibres étudiées SM-P et SM-PSC ont permis d'obtenir les coefficients en température $C\varepsilon^{B \text{ ou } R}$ de ces différentes fibres optiques.

Réponse de l'interrogateur Brillouin

La Figure D5 suivante représente la fréquence Brillouin en fonction de la contrainte pour les fibres SM-P (a), SM-PSC et SM-PSC-C (b). Les coefficients de sensibilité en déformation mesurés sont de 0.073 ±0.001 MHz/με, (SM-P) 0.046 ±0.002 MHz/με (SM-PSC) et de 0.043 ±0.003 MHz/με (SM-PSC-C). Ces derniers sont plus petits que celui de la fibre SMF28 (0.05 MHz/με). Le coefficient en déformation de la fibre dopée P est en cohérence avec la valeur de la fibre SMF28 de référence [23][43] .

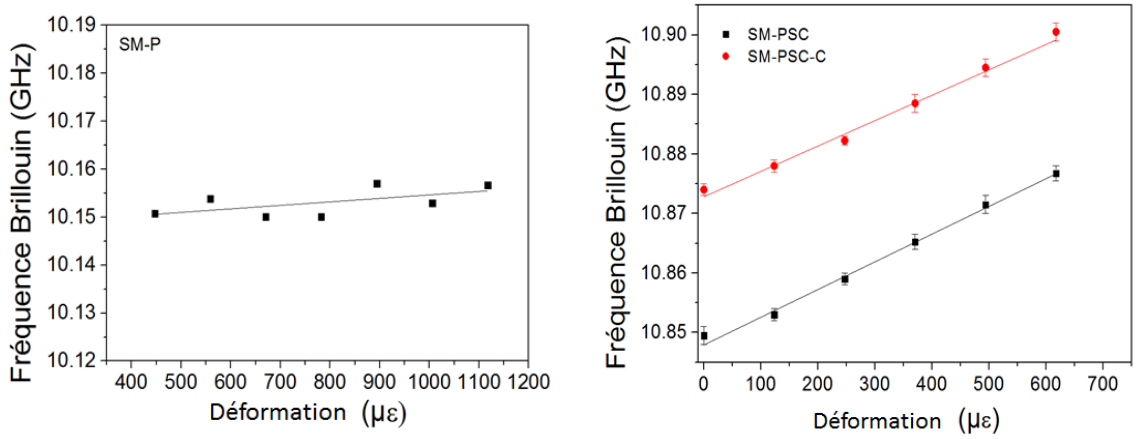


Figure D5 : Fréquence Brillouin en fonction de la déformation pour les fibres SM-P (a), SM-PSC et SM-PSC-C (b).

Réponse de l'interrogateur Rayleigh

La Figure D6 suivante représente la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la contrainte pour les fibres SM-P et SM-Al. Les coefficients de sensibilité en déformation $C\varepsilon^R$ des fibres SM-P et SM-Al sont de l'ordre de 0.16 GHz/με. Le coefficient en déformation est beaucoup plus faible que la valeur de la fibre SMF28 de référence (0.15 GHz/με) [23][43].

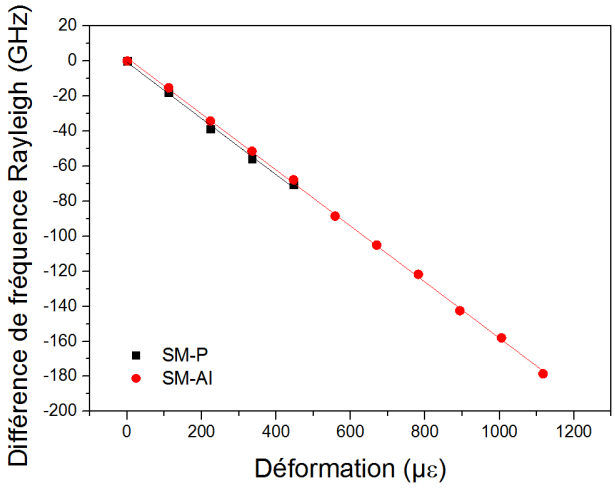


Figure D6 : Evolution de la différence de fréquence Rayleigh en fonction de la déformation appliquée pour les fibres SM-P et SM-Al.

Annexe E : Vers l'application finale : instrumentations de chantier

Au cours de mes trois années de thèse, en sus des travaux scientifiques présentés dans le corps du manuscrit, j'ai participé à plusieurs instrumentations en chantier. Je résumerai ici deux essais, les enseignements et les résultats que j'ai pu valoriser. Le premier essai sur ouvrage concerne l'instrumentation par fibres optiques d'une section de tunnel, sous 500 m de couverture, pour caractériser l'évolution mécanique du soutènement, constitué de béton projeté et de cales compressibles [115][116][119]. Le second est l'utilisation de systèmes de mesures réparties de température pour l'instrumentation d'un démonstrateur de conteneur de stockage en béton placé dans un essai normalisé de tenue au feu [122].

Instrumentation d'un tunnel en béton

J'ai participé à une instrumentation novatrice, dédiée à la surveillance le profil de déformation du soutènement en béton d'un tunnel. Il s'agissait de rendre compte de la répartition des contraintes mécaniques dans soutènement, constitué de béton projeté et de cales compressibles.

Conception

Le système de mesure testé est composé d'un câble de mesure et d'un instrument optoélectronique.

Des systèmes de mesures réparties de déformations fondés sur la diffusion Brillouin fonctionnaient au laboratoire souterrain de Bure depuis 2012 (CMHM) [8][9] . Pour plus de sensibilité dans les mesures, des campagnes de mesures utilisant la diffusion Rayleigh ont été organisées. J'ai participé à ces instrumentations de chantier, avec la technologie Rayleigh TW-COTDR de l'instrument Neubrex.

Par rapport à la diffusion de Brillouin, le Rayleigh TW-COTDR permet un branchement à une seule extrémité, avantage important pour les projets de génie civil où les casses sont redoutées [76] [110] De plus, la portée du TW-OTDR est considérablement plus longue : 27 km contrairement aux autres technologies Rayleigh disponibles sur le marché (OFDR notamment). Enfin, la diffusion de Rayleigh a également été sélectionnée pour sa large gamme dynamique de mesure, pour gérer les fortes pertes optiques attendues dans la structure du béton projeté) et sa résolution spatiale élevée, de quelques centimètres, ce qui permet de séparer les influences des cales compressibles et du béton projeté.

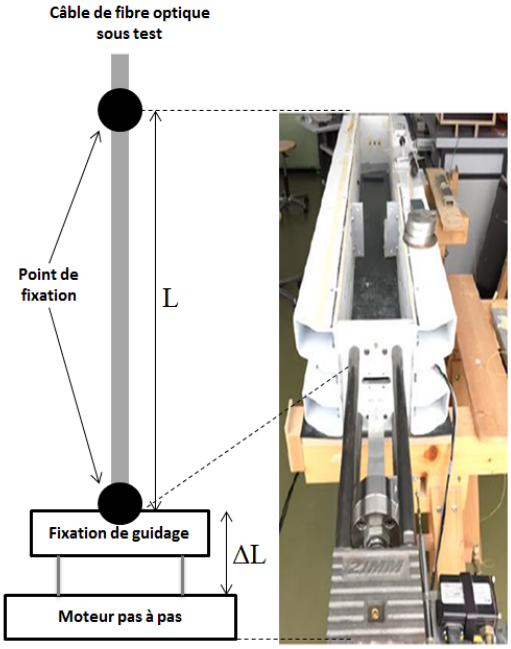
Calibration du câble

Les études antérieures ont démontré que le coefficient de sensibilité en déformation des fibres optiques mesurées en rétrodiffusion Rayleigh est affecté par son revêtement [76] : La thèse de S. Rizzolo a montré que les matériaux du revêtement primaire de la fibre optique évoluent avec les cycles thermiques. Il est donc préférable d'étalonner le câble sensible, pas seulement la fibre entourée par son revêtement. Pour les mesures mécaniques, un dispositif d'étalonnage du coefficient de sensibilité mécanique représenté en Figure E1, semblable à celui du Laboratoire Hubert Curien pour les fibres nues, a été utilisé pour faire varier les contraintes appliquées au câble. Le dispositif du Laboratoire Hubert Curien n'était pas adapté aux câbles à fibre optique : les attaches étaient inadaptées. Le dispositif utilisé a été utilisé en collaboration avec l'entreprise suisse dénommée Marmota Engineering AG.

Le principe est basé sur un câble fixé aux points x_j et x_{j+1} et tendu sur la section de longueur L. Un déplacement ΔL en utilisant un moteur pas à pas très précis est réalisé sur le câble. La déformation appliquée le long du câble à fibres est donnée par la relation:

- $\varepsilon = \Delta L/L$ *(Équation E1)*

La longueur totale de l'échantillon est d'environ 5 m alors que le pas est de 100 με. La température a été maintenue constante à 25 ° C.



- *Figure E1 : Photographies et schéma du système de calibration en déformations du câble sensible (Marmota Engineering AG, Suisse).*

Le câble testé est le câble V3 de l'entreprise Brugg. D'un diamètre total de 0.5cm environ, il est composé de :

- ✓ une couche de polyimide
- ✓ une couche métallique de blindage
- ✓ une couche de plastique de protection
- ✓ un tube métallique servant de joint hermétique de protection
- ✓ une couche permettant le transfert des contraintes mécaniques
- ✓ une fibre monomode adaptée, a priori une fibre G657 tolérante aux courbures

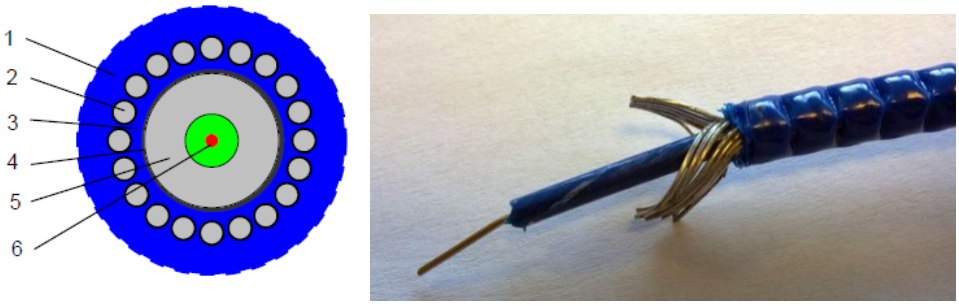


Figure E2 : Coupe (a) et photographie (b) du câble V3 de l'entreprise Brugg.

Les résultats de calibration sont reportés dans la Figure E3, où un fit linéaire conduit à trouver un coefficient de 0.141 MHz/με pour le câble, supérieur à celui de la fibre nue testée standard est de 0.035 MHz/με.

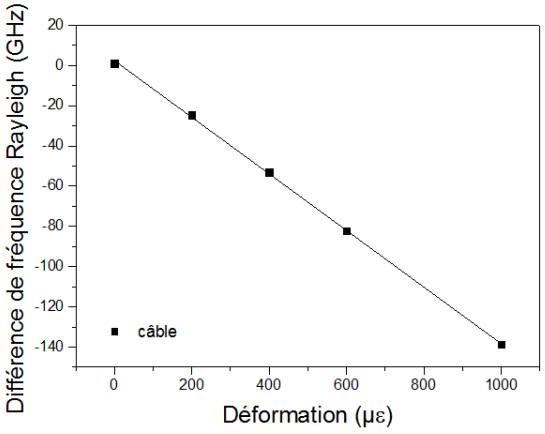


Figure E3: Différence de fréquence Rayleigh en fonction de la déformation sur le câble.

Essais sur ouvrages réels

Le laboratoire souterrain de l'Andra est creusé dans l'argilite du Callovo-Oxfordien roche âgée de 160 millions d'années. Il permet la mise au point des techniques

d'ingénierie et l'étude de faisabilité d'un stockage géologique. Cet outil scientifique exceptionnel est composé :

- De 17 hectares d'installations de surface, composés de locaux administratifs, d'ateliers techniques (dont les bassins d'orage et les aires de stockage des déblais) et de bâtiments d'accueil.
- De 2 puits d'accès de 4 et 5 m de diamètres.
- De plus de 1600 mètres de galeries souterraines, exploitées pour qualifier la couche argileuse permettant le confinement des colis de déchets radioactifs par rapport à la sûreté à long terme, et pour vérifier les perturbations engendrées par ce stockage. Plus précisément, les expérimentations portent sur la caractérisation de la roche et de l'eau contenue dans celle-ci, l'interaction des différents matériaux (verre, acier, béton, argile).

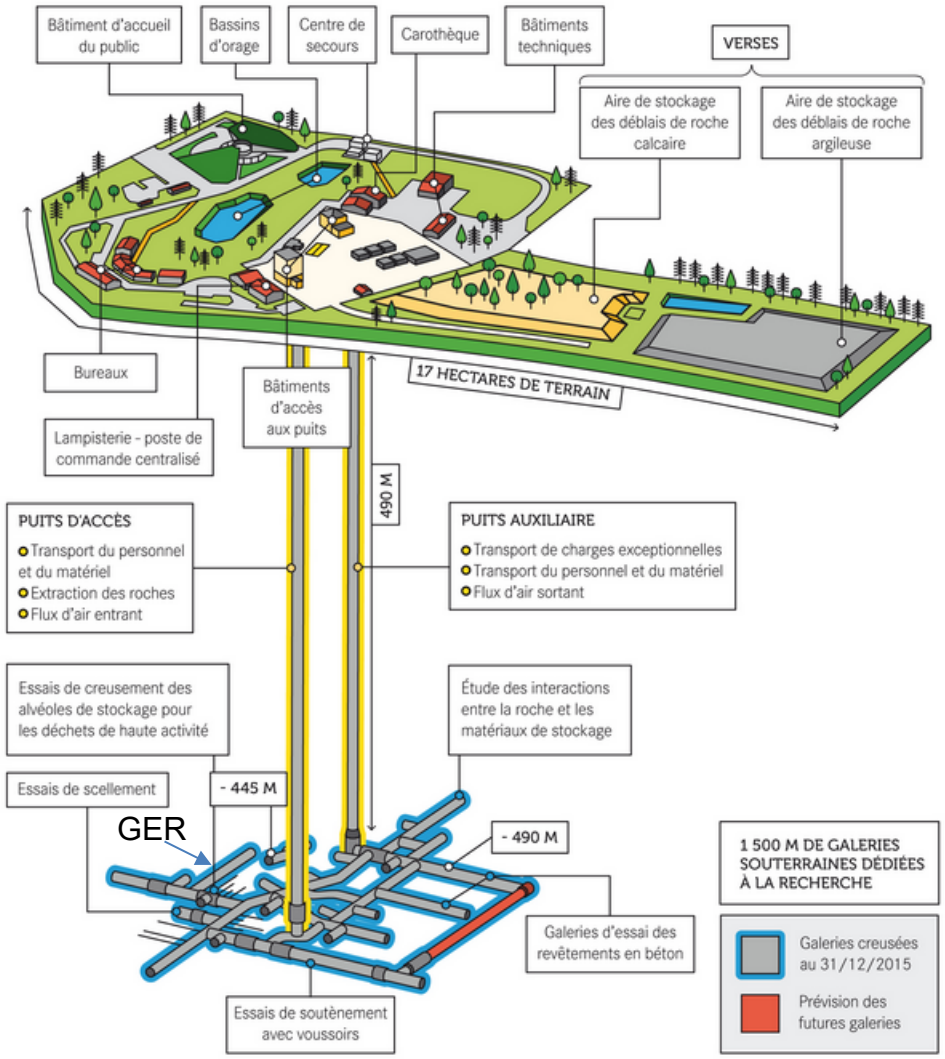


Figure E4 : Plan du laboratoire souterrain de l'Andra.

Nos essais se sont réalisés dans les Galeries d'Essai des Revêtements (GER) positionnée sur la figure E4.

Excavé par une machine à attaque ponctuelle (MAP) ce tunnel a une section circulaire. Après chaque étape d'excavation, un support composé de boulons radiaux, d'une couche de 21 cm d'épaisseur de béton, de cales compressives et de mailles soudées est mis en place [111][112] . Deux types de capteurs déformations ont été testés pour évaluer les comportements mécaniques de la structure ; en particulier, la surveillance de la performance de la couche de béton projeté, détecter des éventuels vides et de leurs conséquences, évaluer l'efficacité des cales en béton et des gradients de déformation. Ces deux types de capteurs sont les suivants :

• 5 extensomètres à corde vibrante sont insérés entre les cales compressibles : ces systèmes donnent des mesures de référence ponctuelles.

• 1 câble de mesure mécanique à fibre optique, placé sur une circonférence, à l'arrière des cales compressibles et associé à l'interrogateur utilisant la diffusion Rayleigh.

Mise en place de l'instrumentation et résultats

La Figure E5présente le placement des capteurs [111]. Les points de mesure ont été acquis à différents temps après l'acquisition de la mesure de référence Rayleigh. Le béton a été projeté environ 1 heure après l'acquisition de la référence optique.

L'emplacement du centre des cales compressibles peut être repéré par des traits orange sur cette figure. Au nombre de 12, elles sont espacées de 1,4 m, approximativement. Les mesures de la reflètent la réponse sur le béton projeté à la masse rocheuse entourant le tunnel en soulignant les zones où des contraintes plus fortes se développent avec le temps.

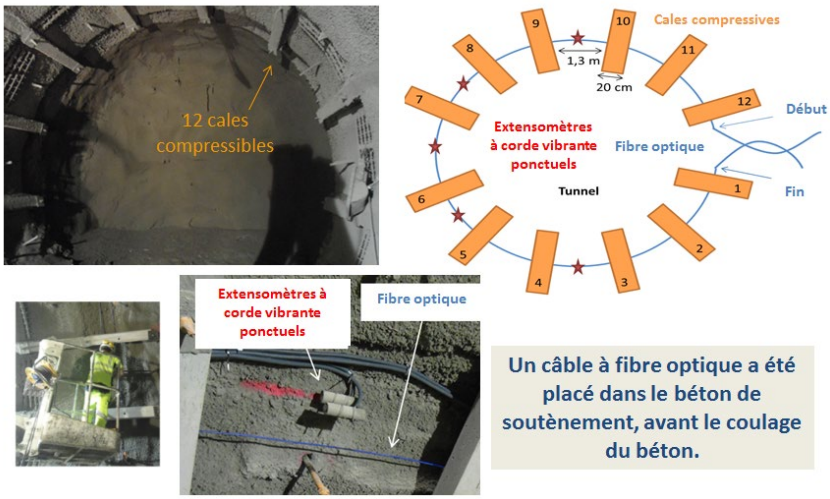


Figure E5: Photographies et schéma de mise en place des capteurs (extensomètres à corde vibrante et fibre optique).

La Figure E6 présente l'évolution de la déformation le long du câble optique en fonction de la longueur de la fibre (c'est-à-dire du périmètre du tunnel), pour différents instants après le début de l'acquisition de référence.

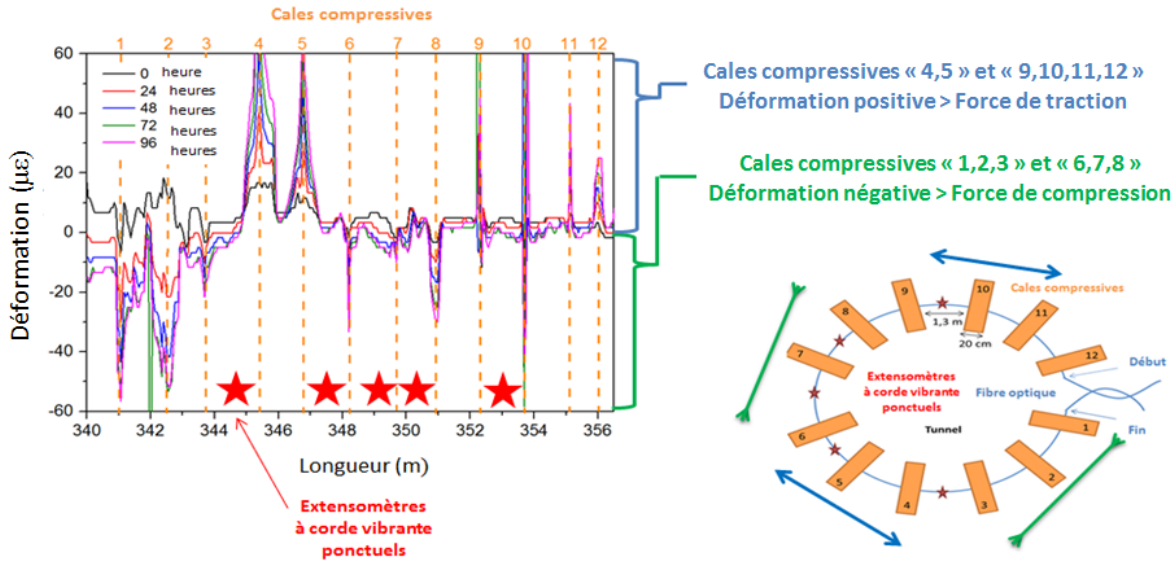


Figure E6: Déformation mesurée en fonction de la longueur de la fibre, c'est-à-dire par rapport à la périphérie du tunnel.

Nos mesures in situ révèlent deux zones associées à une déformation plus forte au centre des cales compressives :

• Les zones passant par les cales compressives numérotées (1-2-3) et (6-7-8), où la déformation observée est négative. Les forces de compression sont probablement appliquées sur le câble à fibre optique à ces endroits. Ces deux zones sont opposées dans la circonférence du tunnel et peuvent être représentatives de la direction de compression du tunnel.

• Les zones passant par les cales compressives numérotées (4-5) et (9-10-11-12), où la déformation observée est positive. Les forces d'allongement sont appliquées sur les câbles optiques. Ces deux zones sont opposées dans la circonférence du tunnel.

L'origine de la présence de cette contrainte sur le long de la circonférence du tunnel est attribuée à de nombreuses forces et sollicitations différentes, toujours en évolution.

Nous comparons les deux types de capteurs de déformation comme candidats possibles pour la surveillance des tunnels : extensomètres à corde vibrante et

capteurs à fibre optique. Les Figures E7(a) sur l'axe horizontale et (b) pour l'axe verticale comparent l'évolution au cours du temps de la déformation mesurée au niveau du projeté (au point central le plus éloigné des cales compressibles) par les deux techniques : les lignes solides sont pour l'extensomètre à corde vibrante, les lignes pointillées sont pour la fibre optique.

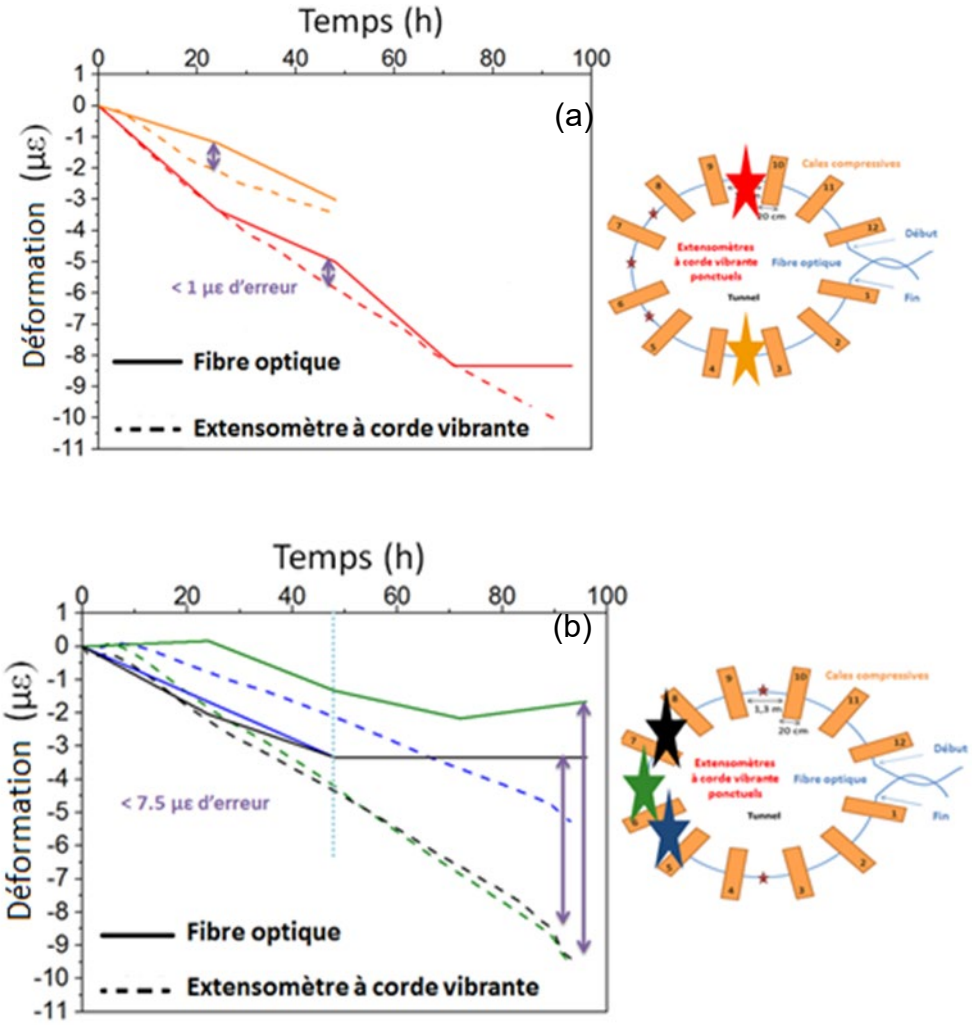


Figure E7 : Déformation mesurées au cours de temps entre les cales compressives 3 et 4 (partie la plus inférieur du tunnel), et 9 et 10 (partie la plus inférieur du tunnel) sur l'axe vertical (a); et entre les cales compressives 5 et 6, 6 et 7, 7 et 8 (partie la plus inférieur du tunnel) sur l'axe horizontal (b).

Durant la période d'acquisition, environ 96 heures les mesures sont similaires entre ces deux types de capteurs. La déformation varie entre -1,5 et -8 με, pour le capteur à fibre optique, entre -5 et -10 με, pour les extensomètres à corde vibrante. La sensibilité des deux types de capteurs est très élevée et leur accord de mesure est

très bon. Les légères différences peuvent être attribuées à plusieurs facteurs. Par exemple, ces deux capteurs ne sont pas exactement positionnés au même emplacement. Comme la géométrie du tunnel n'est pas parfaitement circulaire et le champ de contrainte imposé par le terrain est anisotrope, l'impact de la localisation est non négligeable. Cette comparaison montre le potentiel des capteurs de fibre optique qui, outre un excellent accord avec les capteurs de référence, fournit un profil de mesure complet sur une section de tunnel, y compris dans les zones des câbles compressibles. Cependant, la campagne de mesure a dû être interrompue après 90h, l'instrument était nécessaire ailleurs. En conséquent, certaines questions subsistent. Par exemple, un plateau atteint par des fibres optiques à partir de 60 heures était-il provisoire ? Des mesures régulières sont nécessaires pour mettre davantage en valeur le système de mesure conçu et testé.

Ces résultats ont été valorisés par une présentation orale à la conférence internationale APOS, primée [119].

Plusieurs mois après le coulage, une nouvelle campagne de mesure a été réalisée. Les déformations imposées par les cales compressibles ont dépassé plusieurs pourcents de traction et le câble a cassé.

Essais de tenue au feu d'un démonstrateur de colis MAVL

Cigéo prend en charge environ 110 000 m^3 de colis de déchets primaires de Moyenne Activité à Vie Longue (MA-VL) comprenant les déchets issus du traitement bitumineux des effluents, des déchets activés et technologiques conditionnés dans les conteneurs en béton, et les déchets issus du démantèlement des réacteurs nucléaires. Ces déchets sont conditionnés dans des fûts métalliques, puis assemblée à l'intérieur d'un conteneur en béton. Ces conteneurs sont de taille métrique et la formulation de leur béton a été conçue pour assurer la manipulation des colis après à un incendie potentiel (afin d'être récupérable). Les essais réalisés durant cette thèse ont pour but de tester leurs résistances au feu.

Les conteneurs en béton ont été conçus pour supporter un feu d'une heure (norme ISO 834 [113]). Plus précisément, la formulation et l'épaisseur (20 cm) des parois en béton des conteneurs destinés à contenir les déchets bitumineux permettent d'assurer une protection thermique : respect du critère de température de surface de l'emballage primaire en cas de feu. Comme illustré sur la Figure E8, le conteneur est un bloc parallélépipédique avec quatre logements pour les fûts métalliques contenant les déchets. Ses dimensions externes sont 2020 x 2020 x 1650 mm (longueur x largeur x hauteur). L'incendie a été imposé pendant une heure seulement, mais la phase de refroidissement a duré plusieurs jours. La température devrait atteindre 1000 °C sur la surface de béton externe. À l'intérieur du béton, elle ne devait pas dépasser 200 °C.

Figure E8: Photographie du conteneur en béton MA-VL (type CS4) (a), du fût métallique MA-VL (b) et l'emplacement du fût dans le conteneur (c).

Par l'emplacement de la fibre autour du colis, l'instrumentation devait fournir une vue 3D du champ de température autour du colis. La période d'acquisition devrait être inférieure à 5 minutes pour suivre correctement la montée en température, d'une durée d'une heure. Les gradients thermiques verticaux et horizontaux devaient être caractérisés, c'est pourquoi la résolution spatiale centimétrique a été ciblée.

Traditionnellement, les capteurs de température sont des thermocouples. Le câblage d'une centaine de points de mesures requiert plusieurs jours. Dans la bibliographie, les capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg ont été proposés pour réduire la complexité du câblage [114]. Dans notre cas, nous avons testé les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman pour avoir des mesures réparties, sans zone morte et fournir une image 3D du champ thermique au cours de l'essai.

En mesures réparties, la meilleure résolution spatiale est obtenue en diffusions Brillouin et Rayleigh. Nous avons utilisé les technologies Neubrex PPP-BOTDA et TW-COTDR avec la résolution spatiale de 5 cm, en fibre monomode. Pour obtenir une mesure de température sans risque de perturbation par les effets mécaniques croisés, nous avons également utilisé une mesure fondée sur la diffusion Raman dans des fibres multimodes ; nous avons utilisé la technologie RDTS Silixa avec une résolution spatiale de 0.25 m.

Les principes de mesure de Brillouin et Rayleigh sont sensibles à la déformation et à la température. C'est pourquoi le câble de détection sélectionné est un loose-tube : pour ne détecter que la température, la fibre optique est isolée des sollicitations mécaniques. Pour résister à des températures de 200°C, le revêtement fibre optique a été spécifié en polyimide. Le câble contenait une fibre optique monomode et une multimode. Le système de mesure ainsi conçu a été étalonné en étuve, préalablement à la mise en œuvre dans le démonstrateur. Les coefficients C_T^B et C_T^R ont été mesurés. Pour réduire les rayons de courbure et réduire les frottements, les fibres ont été placées sur ces tubes en cuivre incurvés fixés au fût (Figure E8). Une

instrumentation de référence a également été mise en œuvre : 242 thermocouples de type K, intégrées dans le béton à la surface du conteneur.

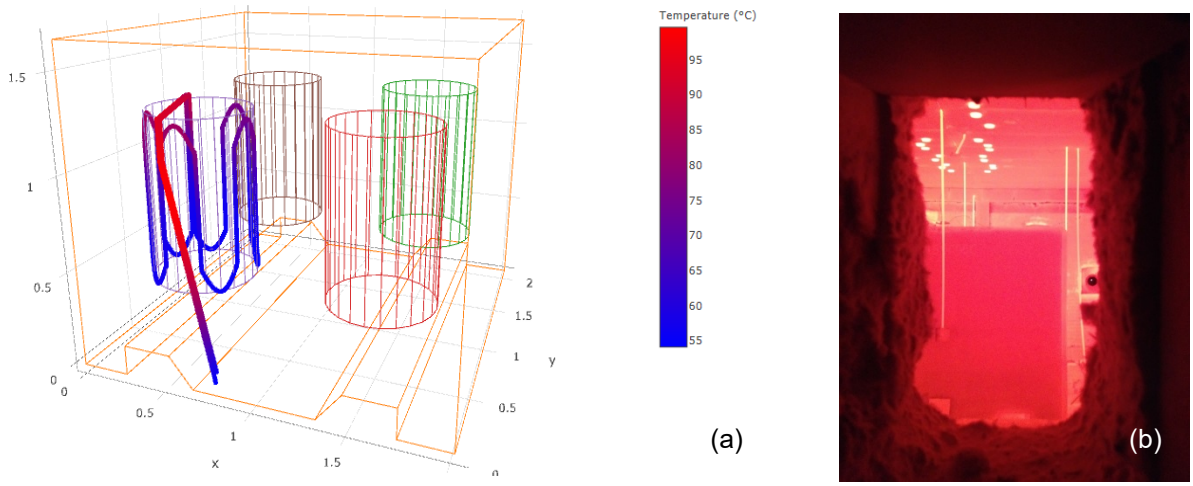


Figure E9 : Reconstruction 3D du profil de température (a), Photographie prise durant l'essai au feu (b).

La Figure E9(b) illustre le test d'incendie. Comme prévu, à l'intérieur de la chambre, la température a atteint 1000 °C mais à l'intérieur du démonstrateur en béton, elle est restée inférieure à 100°C. Nous avons pu fournir un profil 3D de température illustré à la Figure E9(a) pour l'instant où la température maximale a été atteinte. Les gradients verticaux de température ont atteint 7°C.

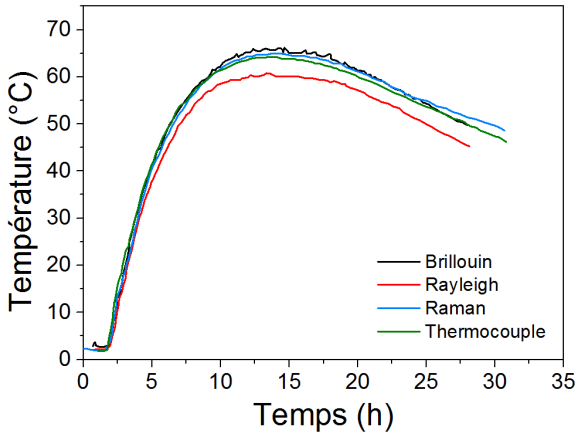


Figure E10: Température mesurée par les instruments Brillouin (noir), Rayleigh (Rouge) et Raman (bleu) au cours du temps. La mesure de référence est obtenue par un thermocouple (vert).

Les mesures de température obtenues avec les diffusions Rayleigh et Raman sont très proches des capteurs de référence : le décalage reste inférieur à 0,1 °C (Figure E10). Un décalage systématique de la température est observé sur les mesures de Rayleigh. L'étalonnage est incriminé et la mesure du coefficient de sensibilité thermique de câble devra être répétée.

Nous avons démontré l'intérêt des mesures réparties de température par fibre optique pour des essais de tenue au feu. Plusieurs configurations optiques ont été testées et comparées. Des profils de température en 3D à chaque minute ont été réalisés, avec une résolution spatiale de 5 cm et une incertitude de température inférieure à 0,1 °C. Le loose-tube et la méthode de mise en œuvre spécifique, associés aux diffusions de Brillouin et Rayleigh se sont avérés efficaces. Sur le point de vue de l'application, l'instrumentation a confirmé que la température maximale est localisée dans la partie supérieure du colis.

Ces travaux ont été valorisés par une présentation postée à la conférence internationale [124].

Conclusion

Pour conclure sur cette annexe, nous pouvons affirmer que les études en laboratoire sont indispensables pour optimiser le choix de la fibre et maîtriser les paramètres des instruments. Il est nécessaire de prévoir les différences d'environnement : le laboratoire est un environnement maîtrisé alors que le chantier possède des aléas (poussières, coactivités, casses…). Malgré cela, il est possible d'obtenir une bonne correspondance entre les mesures en laboratoire et en chantier, les mesures sont pertinentes.

Annexe F: Paramètres des instruments

Paramètres des instruments utilisant la diffusion Brillouin

Etude métrologique de la technologique PPP-BOTDA

Etude de la résolution spatiale

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
2.5 m	5 cm	200, 100, 20, 10, 5, 2 cm	9.3 GHz	12.3 GHz	2^13 s	25 dBm	0 dBm

Etude de l'intensité pompe/sonde

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
2.5 m	5 cm	10 cm	10.5 GHz	11.5 GHz	2^13 s	25-30 dBm	0-3 dBm

Comparaison des performances des instruments BOTDR et PPP-BOTDA

BOTDR (OZ)						
Longueur de ligne	Pas spatial	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Pas fréquentiel	Voltage
30 m	0.2 m	10.870 GHz	11.280 GHz	10 ns	0.64	2 V

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m	5 cm	20 cm	10.7 GHz	11 GHz	2^13	30 dBm	0 dBm

Le pas spatial et la résolution spatiale des mesures Brillouin ont été choisis pour être comparable.

Comparaison des performances des BOTDA et BOTDR sous radiation

BOTDA (OZ)						
Longueur de ligne	Pas spatial	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Pas fréquentiel	Voltage
80 m (SM-F14)	0.2 m	10.870 GHz	11.280 GHz	10 ns	0.64	2 V
70 m (SM-Ge14)	0.2 m	10.189 GHz	10.634 GHz	10 ns	0.64	2V

BOTDR (Febus)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Pas fréquentiel	Voltage
40 m (SM-F14)	0.2 m	1 m	10.775 GHz	11.773 GHz	1000000 s	1.95 (2 Gy/s)	0.05 V
40 m (SM-Ge14)	0.2 m	1 m	9.750 GHz	10.750 GHz	1000000 s	1.95 (2 Gy/s)	0.05 V

Effets de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Brillouin

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m	2 cm	2 cm	10 GHz	12 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm

Effets couplés de l'hydrogène et des radiations

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m (SM-F14)	10 cm	10 cm	10 GHz	12 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm
30 m (SM-Ge14)	10 cm	10 cm	10.3 GHz	11.499 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm
30 m (SM-N)	10 cm	10 cm	10.3 GHz	11.499 GHz	2^13	30 dBm	3 dBm

MOL (doses : 1, 3, 6 et 10 MGy, débits de dose respectif : 1.46, 4.25, 8.90 et 14.95 kGy/h)

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
Variable	10 cm	10 cm	10 GHz	11.950 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm

Effets couplés de la déformation et des radiations

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30+30+30 m (SM-F14+SM-Ge14+SM-N)	10 cm	10 cm	10.3 GHz	11.499 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm

MOL (doses : 1, 3, 6 et 10 MGy, débits de dose respectif : 1.46, 4.25, 8.90 et 14.95 kGy/h)

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
Variable	10 cm	10 cm	10 GHz	11.950 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm

Effets couplés de la température et des radiations

IRMA2 (dose : 1 MGy, débit de dose : 2.6 kGy/h)

PPP-BOTDA (Neubrex)								
Fibres testées	Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
SM-F16, SM-Ge14 (testées à AT)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	10 GHz	11.950 GHz	2^19	30 dBm	3 dBm
SM-F16, SM-Ge14 (testées à 50°C)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	10 GHz	12 GHz	2^19	30 dBm	3 dBm
SM-F16, SM-Ge14 (testées à 100°C)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	10.6 GHz	11.4 GHz	2^16	25 dBm	0 dBm
SM-F16, SM-Ge14 (testées à 120°C)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	10.6 GHz	12.196 GHz	2^19	30 dBm	3 dBm

Effets cumulés de la température, de la déformation et des radiations

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

PPP-BOTDA (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Durée de moyennage	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m	2 cm	2 cm	10.3 GHz	11.499 GHz	2^16	30 dBm	3 dBm

Paramètres des instruments utilisant la diffusion Rayleigh

Comparaison des performances des OFDR et TW-COTDR en température, en déformation et sous radiation

OFDR (Luna)						
Longueur de ligne	λ centrale	$\Delta\lambda$	Résolution spatiale (trace de réflectivité)	Longueur de corrélation	Pas spatial	Longueur glissante
70 m	1550 nm	21 nm	40 μm	2 cm	2 cm	2 m

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
50 m	2 cm	2 cm	194000 GHz	194500 GHz	1 MHz	30 dBm	0 dBm

Le pas spatial et la résolution spatiale des mesures Rayleigh à corréler (appelé aussi longueur de corrélation pour l'instrument utilisant la technologie OFDR) ont été choisis pour être comparable.

Effets des radiations sur les fibres optiques

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

TW-COTDR (Neubrex)								
Fibres testées	Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
SM-F14, SM-N et SM-Ge14	316 m (2+104+104+104+2 m)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm

MOPERE X (dose : 1 MGy, débit de dose : 3.1 à 4.1 Gy/h)

TW-COTDR (Neubrex)								
Fibres testées	Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
SM-Ge14	11 m	2 cm	2 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm

Effets de l'hydrogène sur la rétrodiffusion Rayleigh

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m	2 cm	2 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm

Effets couplés de l'hydrogène et des radiations

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m (SM-F14)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm
30 m (SM-Ge14)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm
30 m (SM-N)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
20 m	2 cm	2 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm

MOL (doses : 1, 3, 6 et 10 MGy, débits de dose respectif : 1.46, 4.25, 8.90 et 14.95 kGy/h)

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
variable	2 cm	2 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm

Effets couplés de la déformation et des radiations

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30+30+30 m (SM-F14+SM-Ge14+SM-N)	20 cm	20 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm

MOL (doses : 1, 3, 6 et 10 MGy, débits de dose respectif : 1.46, 4.25, 8.90 et 14.95 kGy/h)

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
variable	20 cm	20 cm	194000 GHz	194500 GHz	2.5 MHz	30 dBm	0 dBm

Effets couplés de la température et des radiations

IRMA2 (dose : 1 MGy, débit de dose : 2.6 kGy/h)

TW-COTDR (Neubrex)								
Fibres testées	Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
SM-F16, SM-Ge14 (testées à AT)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm
SM-F16, SM-Ge14 (testées à 50°C)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194300 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm
SM-F16, SM-Ge14 (testées à 100°C)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	25 dBm	0 dBm
SM-F16, SM-Ge14 (testées à 120°C)	104 m (20+32+32 +20 m)	10 cm	10 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm

Effets cumulés de la température, de la déformation et des radiations

IRMA1 (dose : 56 kGy, débit de dose : 370 Gy/h)

TW-COTDR (Neubrex)							
Longueur de ligne	Pas spatial	Résolution spatiale	Fréquence début	Fréquence fin	Pas fréquentiel	Puissance de pompe	Puissance de sonde
30 m	2 cm	2 cm	194000 GHz	194500 GHz	2 MHz	30 dBm	0 dBm

Paramètres des instruments utilisant la diffusion Raman

Performance du RDTS (Viavi),

Effets des radiations et

Effets couplés de la température et des radiations

RDTS (Viavi)				
Fibres testées	Longueur de ligne	Résolution spatiale	Intervalle de mesure	Temps d'acquisition
MM-F1 MM-F2	80 m	0.254 m	120 s	120 s

Annexe G : Liste des publications et des communications réalisées au cours de la thèse

Revues à comité de lecture

S. Girard, D. Di Francesca, A. Boukenter, T. Robin, E. Marin, A. Ladaci, I. Reghioua, A. Morana, S. Rizzolo, C. Cangialosi, **I. Planes**, J-Y. Michalon, C. Marcandella, P. Paillet, M. Gaillardin, M. Raine, N. Richard, B. Cadier, and Y. Ouerdane, “On-site Regeneration Technique for Hole-Assisted Optical Fibers Used In Nuclear Facilities”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 62, 2941 - 2947, 2015.

S. Delepine-Lesoille, S. Girard, M. Landolt, J. Bertrand, **I. Planes**, A. Boukenter, E. Marin, G. Humbert, S. Leparmentier, J.-L. Auguste, Y. Ouerdane, "France’s State of the Art Distributed Optical Fibre Sensors Qualified for the Monitoring of the French Underground Repository for High Level and Intermediate Level Long Lived Radioactive Wastes". Sensors 17, 1377, 2017.

D. Di Francesca, S. Girard, **I. Planes**, A. Cebollada, G. Li Vecchi, A. Alessi, I. Reghioua, C. Cangialosi, A. Ladaci, S. Rizzolo, V. Lecoeuche, A. Boukenter, A. Champavère, Y. Ouerdane, “Radiation Hardened Architecture of a Single-Ended Raman-based Distributed Temperature Sensor”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.64, n°1, pp. 54 – 60, 2017**.**

I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, C. Marcandella et Y. Ouerdane “Steady γ-Ray Effects on the Performance of PPP-BOTDA and TW-COTDR Fiber Sensing”, Sensors 17(2), 396, 2017.

A. Morana; **I. Planes**; S. Girard; C. Cangialosi; S. Delepine-Lesoille; E. Marin; A. Boukenter; Y. Ouerdane, “Steady-State Radiation-Induced Effects on the performances of BOTDA and BOTDR Optical Fiber Sensors”, IEEE Transactions on Nuclear Science 65, 111-118, 2018.

Conférences Internationales

S. Girard, A. Boukenter, T. Robin, E. Marin, A. Ladaci, I. Reghioua, A. Morana, D. Di Francesca, S. Rizzolo, C. Cangialosi, **I. Planes**, C. Marcandella, P. Paillet, M. Gaillardin, M. Raine, N. Richard, B. Cadier, and Y. Ouerdane, “On-site Regeneration Technique for Hole Assisted Optical Fibers Used In Nuclear Facilities”, 2015 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Conference international NSREC, 2015.

D. Di Francesca, S. Girard, Senior Member, IEEE, **I. Planes**, A. Cebollada, A. Alessi, I. Reghioua, C. Cangialosi, A. Ladaci, S. Rizzolo, Student member, IEEE, V. Lecoeuche, A. Boukenter, A. Champavère, Y. Ouerdane, “Radiation Hardened Architecture of a Single-Ended Raman-based Distributed Temperature Sensor”, NSREC, 2016.

I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, R. Farhoud, J. Zghondi, F. Fischlic, Y. Ouerdane - Distributed Strain Monitoring in Tunnel Shotcrete (with and without yieldable concrete wedges) by fiber-based TW-COTDR technique” OSA Technical Digest paper F1A.4, Conférence internationale APOS (6th Asia Pacific Optical Sensors Conference, Shanghai), Shanghai-Chine, Octobre 2016 – Prix de la meilleure présentation orale.

I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, S. Rizzolo, J. Perisse, J-R. Macé, and Y. Ouerdane, “Comparison between two sensing technologies based on Rayleigh scattering in optical fibers: Optical Frequency Domain Reflectometry and Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry”, Abstract conference Internationale SiO_2 (11th International symposium on SiO_2), Advanced dielectrics and related devices, Nice, Juin 2016.

D. Di Francesca, S. Girard, **I. Planes**, A. Cebollada, A. Alessi, I. Reghioua, C. Cangialosi, A. Ladaci, S. Rizzolo, V. Lecoeuche, A. Boukenter, A. Champavère, Y. Ouerdane “Radiation Hardened Architecture of a Single-Ended Raman-based Distributed Temperature Sensor” NSREC, Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Portland (Oregon, USA), Juillet 2016.

I. Planes, D. Di Francesca, S. Girard, A. Alessi, A. Boukenter, E. Marin, M. Osmond, S. Delepine Lesoille, and Youcef Ouerdane. "Coupled Effects of Radiation and Temperature on the Performances of Rayleigh and Raman Fiber-based Sensors", RADECS 2017 (Radiation and Its Effects on Components and Systems), Genève, Octobre 2017.

S. Delepine-Lesoille, **I. Planes**, M. Landolt, G. Hermand, et O. Perrochon. "Compared performances of Rayleigh Raman and Brillouin distributed

temperature measurements during concrete container fire test.,"Optical Fiber Sensors Conference (OFS), 2017 25th, Corée, 2017.

I. Planes, S Girard, A Boukenter, E Marin, S Delepine-Lesoille, A Gusarov, Y. Ouerdane “Study of γ-ray radiation effects on TW-COTDR optical fiber sensors”, OFS25 (Optical Fiber Sensors Conference), Corée, 2017.

A. Piccolo, S. Delepine-Lesoille, M. Landolt, M. Osmond, S. Poirier, **I. Planes**, S. Girard, Y. Ouerdane, A. Boukenter, D. Leduc, Y. Lecieux “Combined Radiation and Temperature Effects on Brillouin Scattering based sensing with Ge-Doped Optical Fibers”, OFS26 (Optical Fiber Sensor Conference), Lausanne, Suisse, Septembre 2018.

Conférences nationales

I. Planes S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, and Y. Ouerdane., « Etude de la fibre standard corning SMF28 par réflectométrie PPP-BOTDA et TW-COTDR », Abstract à la conférence JNOG (Journées nationales d'Optique Guidée), Rennes 2014.

I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille et Y. Ouerdane . – "Etude couplée théorie / expérience de la diffusion Brillouin et Rayleigh dans les fibres optiques", Conférence nationale FMR (6e journées sur les Fibres Optiques en Milieu Radiatif), Orsay, Décembre 2015.

I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, R. Farhoud, J. Zghondi, F. Fischli, Y. Ouerdane, « Mesures distribuées de déformations dans le soutènement d'un tunnel par réflectométrie TW-COTDR », Conférence nationale GO2S, 2016.

I. Planes S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, S. Rizzolo, J. Perisse, J-R. Macé, and Y. Ouerdane – "Etude de l'effet des radiations gamma sur la réponse du capteur à fibre optique utilisant la réflectométrie TW-COTDR", Conférence nationale FMR, 2016.

Références

[1] IRSN, "Les principes généraux de la protection contre les rayonnements ionisants et leurs modalités d'application," [Online]. Available: http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_fiche_principes_radioprotection.pdf

[2] Filières traitements des déchets radioactifs. [Online]. Available : http://www.irsn.fr/dechets/dechets-radioactifs/Documents/irsn_livret_dechets_radioactifs.pdf

[3] Classements des déchets. [Online]. Available : www.andra.fr/pages/fr/menu1/les-dechets-radioactifs/comment-sont-classes-les-dechets-radioactifs-r-9.html

[4] IRSN, "Radioactive waste management," [Online]. Available: http://www.irsn.fr/EN/publications/thematic/Documents/irsn_booklet_radioactive_waste.pdf.

[5] Andra-Cigéo Project, [Online]. Available: www.andra.fr/download/andra-international-en/document/editions/504va.pdf

[6] Cigéo. [Online]. Available : www.cigéo.com

[7] Loi n°2006-739 (2006). Loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion.

[8] IAEA, "Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities," Series No. SSG-31, 22 May 2014.

[9] Buschaert S., Lesoille-delepine S, Bertrand J., Mayer S., and Landais P. "Developing the tools for geologic repository monitoring - Andra's monitoring R&D Program - 12045," in WM2012 Conference, Phoenix, Arizona, USA, 2012.

[10] Phéron X., Girard S., Boukenter A., Brichard B., Delepine-Lesoille S., Johan Bertrand, and Ouerdane Y., High γ-ray dose radiation effects on the performance of Brillouin scattering based optical fiber sensors, Optics Express 2012, Vol. 20(24), pp.26978-26985, DOI 10.1364/OE.20.026978.

[11] Phéron X., Ouerdane Y. Girard S., Tortech B. Delepine-Lesoille S., Bertrand J., Sikali Mamdem Y., Boukenter A. UV irradiation influence on stimulated Brillouin scattering in photosensitive optical fibers, Electronics Letters 2011, Vol. 47(2), pp.132-133, DOI 10.1049/el.2010.3110

[12] Phéron X., Durabilité des capteurs à fibres optiques sous environnement radiatif. PhD Thesis, Université de Saint-Etienne, Saint-Etienne France, 2013.

[13] Cangialosi C.; Girard, S.;, “Steady state γ-radiation effects on Brillouin fiber sensors”. SPIE Proceedings Series 24th International Conference on Optical Fiber Sensors, Vol.96344, pp.9634 DOI: 10.1117/12.2194990, 2015.

[14] Cangialosi C., “Performances of Raman and Brillouin fiber-based sensing of temperature and strain in harsh environment”, PhD Thesis, Université de Saint-Etienne, 2016.

[15] Cangialosi C., Ouerdane Y., Girard S. Boukenter A. Lesoille S. Bertrand J. Marcandella C. Paillet P. Cannas M. , “Development of a temperature distributed monitoring system based on Raman scattering in harsh environment,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 6, pp. 3315–3322, 2014.

[16] Cangialosi C., ;;; “Effects of Radiation and Hydrogen -Loading on the Performances of Raman-Distributed Temperature Fiber Sensors,” J. Lightw. Technol., vol. 33, no. 12, pp. 2432–2438, 2015.

[17] Localisation. [Online]. Available : http://www.cigéo.com/la-localisation-des-installations

[18] Andra Site, [Online]. Available: www.andra.fr.

[19] Andra - Base de données REX

[20] Meunier J.-P., [Livre] « Physique et technologie des fibres optiques » EGEM, Hermes Lavoisier, 2003.

[21] Bao X. et al., « Recent progress in distributed fiber optic sensors », Sensors, vol.12,n°7,pp.8610-8639, 2012.

[22] OZ_Optics. [Online]. Available : http://www.ozoptics.com/

[23] Neubrex. [Online]. Available : http://www.neubrex.com/

[24] Febus Optics. [Online]. Available : http://febus-optics.com/

[25] Luna. [Online]. Available : http://www.lunainc.com/

[26] Sensornet. [Online]. Available : http://www.sensornet.co.uk/

[27] Silixa. [Online]. Available : http://www.silixa.com/

[28] Viavi Solutions. [Online]. Available : http://www.viavisolutions.com/

[29] Boyd R., « Spontaneous light scattering and acousto-optics », Nonlinear Optics, Academic press 4th Ed. New York, USA, 2008.

[30] J. Dakin, "Distributed optical-fibre sensors for the measurement of pressure, strain and temperature," in in Proc. SPIE 1797, Distributed and Multiplexed Fiber Optic sensors II, Boston, MA, USA, 1993.

[31] Hartog A. Leach A.P., Gold M.P. , “Distributed temperature sensors in solid-core fibers”, Electronics Letters, 21-23, 1061-1062, 1985.

[32] Toccafondo I., Nannipieri T., Signorini A., Guillermain E., Kuhnhenn, Brugger M., Di Pasquale F.,“Raman Distributed Temperature Sensing at CERN,” IEEE Phot. Tech. Lett., vol. 27, no. 20, pp. 2182–2185, 2015.

[33] Toccafondo J., Nannipieri T., Signorini A., Guillermain E., Kuhnhenn, Brugger M., Di Pasquale F., "Raman distributed temperature measurement at CERN high energy accelerator mixed field radiation test facility (CHARM)," Proc. SPIE, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, vol. 9634, no. 20, pp. 2182-2185, 2015.

[34] Van de Giesen N., Steele-Dunne S.C., Jansen J., Hoes O., Hausner M. B., Tyler S. and Selker J., "Double-end Calibration of fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data," Sensors, vol. 12, no. 5, pp. 5471-5485, 2012.

[35] Jensen F. Eiji T., Masaharu N., Tsunemi K., Satoshi Y., "Distributed Raman temperature measurement system for monitoring of nuclear power plant coolant loops," Proc. SPIE, vol. 2895, pp. 132-143, 1996.

[36] Soto M.A., Signorini A., Nannipieri T., Faralli S., Bolognini, Di Pasquale F.,"Distributed optical fiber temperature sensor using only anti-Stokes Raman scattering light in a loop configuration," in Proc. of SPIE - 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Vols. 7753, 77539U-1, 2011.

[37] Fernandez Fernandez A., Rodeghiero P., Brichard B., Berghmans F., Hartog A. H., Hughes P., Williams K., Leach A.P., "Radiation-tolerant Raman Distributed Temperature monitoring system for large nuclear infrastructures," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 6, pp. 50-58, Dec. 2005.

[38] Barnosky M. K., Jensen S.M., « Fiber waveguides : a novel technique for investigating attenuation characteristics », Applied Optics, 15-9, 2112-2115, 1976.

[39] Thévenaz L. Mafang S.F., Lin J., Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system. Optics Express, Vol.21(12), pp.2014:1-11, DOI: 10.1364/OE.21.014017, 2013.

[40] Parker, T.R. Farhadiroushan M., Handerek V.A., Rogers A.J., “Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibres”, Opt. Lett., 22-11, pp.787-789, 1997.

[41] Kurashima T. Horiguchi T., Izumita H., Furukawa S., Koyamada Y., “Brillouin optical-fiber time domain reflectometry”, IEICE Transactions on Communications, 76-4,382-390, 1993.

[42] Kurashima T. Horiguchi T. Tateda M., «Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers », Optics Letters, 15-18, 1038-1040, 1990.

[43] Kishida K., Yamauchi Y., Guzik A., “Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh System”. Photonic sensors, vol.4, no.1,pp. 1-11 (2014).

[44] Girard S. Kuhnhenn J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffelen M., Ouerdane Y., Boukenter A., Marcandella C., “Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges,” IEEE Trans. Nucl. Sci. , vol. 60, no. 3, pp. 2015–2036, 2013.

[45] Berghmans F., Brichard B., Fernandez Fernandez A., Gusarov A., Van Uffelen M., Girard S., “An introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors”, Optical Waveguide Sensors Imaging, Springer, pp.127-165 (2008).

[46] Griscom D. L., Gringerich M.E., Friebele E.J., "Radiation-induced defects in glasses: Origin of power-law dependence of concentration on dose," Phys. Rev. Lett., vol. 71, no. 7, p. 1019, 1993.

[47] Henschel H., “Radiation induced loss measurements of optical fibers with optical time domain reflectometers (OTDR) at high and low dose rates”, First European Conference on Radiation and its Effects on Devices and Systems RADECS, p380-382 (1991).

[48] Henschel, O. Kohn, and H. U. Schmidt, Radiation induced loss measurements of optical fibres with optical time domain reflectometers (OTDR) at high and low dose rates. First European Conference on Radiation and its Effects on Devices and Systems 1991, La Grande-Motte, France.

[49] Van Uffelen M., Berghmans F., Brichard B., Vos F., Decreton M., Nowodzinski A., Lecompe J.C., Le Neve F., Jucker P., “Long-term prediction of radiation induced losses in single losses in single mode optical fibers exposed to gamma rays using a pragmatic approach”, Radiation Effects Data Workshop, 2000 pp.80-84, 2000.

[50] Van Uffelen M., “Modélisation de systèmes d’acquisition et de transmission à fibres optiques destinés à fonctionner en environnement nucléaire,” Ph.D. dissertation, Université de Paris XI, Paris, France, 2001.

[51] Bisutti J., Etude de la transmission du signal sous irradiation transitoire dans les fibres optiques. PhD Thesis, Université de Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2010.

[52] Regnier E. Flammer I., Girard S., Gooijer F., Achten F. Kuyt G., “Low-dose radiation-induced attenuation at infrared wavelengths for p-doped, ge-doped and pure silica-core optical fibres”, IEEE Trans. Nucl. Sci;, vol. 54, no. 4, p. 2115–2119, 2007.

[53] Gusarov A.I. Hoeffgen S. K., IEEE Transactions on Nuclear Science, 60-3, pp.2037-2053, 2013.

[54] EXFO. [Online]. Available: www.exfo.com/fr/produits/tests-terrain/bu3-optique/tests-otdr-iolm

[55] OSA AQ6370C Yokogama. [Online]. Available: http://tmi.yokogawa.com/fr/

[56] Ocean Optics QE65000 [Online]. Available: https://oceanoptics.com/

[57] Leparmentier S., J. L. Auguste, G. Humbert, G. Pilorget, L. Lablonde, Sylvie Delepine-Lesoille , « Study of hydrogen influence on the acoustic velocity of single-mode fibers by Rayleigh and Brillouin backscattering measurements », Proc. SPIE 9634, OFS24, 2015.

[58] Swart, P.L. Chtcherbakkov A, “Study of Hydrogen Diffusion in Boron/Germanium Codoped Optical Fiber”,Journal Of Lightwave Technology, JTL.0733.8724,DOI 10.1109, 2002.

[59] Swart, P.L. Chtcherbakkov A , Joubert W., Shlyagin M.G., “Study of the pressure dependence of hydrogen diffusion in optical fiber by an interferometric technique”, Optics Comm ., 217, 189 -96, 2003.

[60] Fernandez Fernandez A. Ooms H., Coeck M., Coenen ., Berghmans F; Decréton M.,Brichard B., , “SCK-CEN gamma irradiation facilities for radiation tolerance assessment”, Proc. 2002 NSREC Data Workshop, pp. 171-176, 2002.

[61] Delepine-Lesoille S. Bertrand J., Lablonde L., Phéron X., "Distributed hydrogen sensing with Brillouin scattering in optical fibers", Photonics Technology Letters, 24(17), 1475-1477 (2012).

[62] Stone J., "Interactions of Hydrogen and Deuterium with Silica Optical Fiber: A Review," J. Lightw. Technol., vol. 5, no. 5, pp. 712-733, May 1987.

[63] Iino A. , Matsubara K., Ogai M., Horiuhchi Y., Namihira Y., Diffusion of hydrogen molecules in fluorine-doped single-mode fibres. Electronics Letters 1989, Vol.25(1).

[64] Kuswanto H., Formation et transformation des défauts ponctuels dans les fibres optiques germanosilicates : influence du traitement thermique et de l’insolation. PhD Thesis, Université de Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2001.

[65] Keiser G., Optical Fiber Communications, McGraw-Hill Internation Editions, 1991.

[66] Di Francesca D., "Role of dopants, interstitial O2 and temperature in the effects of irradiation on silica-based optical fibers," PhD thesis, Saint Etienne, 2015.

[67] Girard S., Keurinck J., Boukenter A., Meunier J.P., Ouerdane Y., Azar B., Charre P., Vié M. "Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen, germanium doped and pure silica core optical fibers", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 215, pp. 187-195, 2004.

[68] Girard S., Ouerdane Y., Baggio J., Boukenter A., Meunier J.P., Leray J.L. « Comparaison des effets des irradiations γ, X et UV dans les fibres optiques », J.Phys.IV France 127, 139-143, 2005.

[69] Berger L., Raboin M., Corbiere J., IAEA-The IRMA irradiation facility. On-line: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:42088821.

[70] Fernandez Fernandez A., Ooms H., Brichard B., Berghmans F., Hermann A., Thenpont H. “Test facilities at SCK-CEN for radiation tolerance assessment: from space applications to fusion environments”, 2001.

[71] Binder, [Online]. Available: https://www.binder-world.com/

[72] Faustov A. ., “Advanced fibre optics temperature and radiation sensing in harsh environments”, PhD Thesis, Université de Mons, 2016.

[73] Rizzolo S., Boukenter A., Marin E., Cannas M., Perisse J., Bauer S., Mace J.R., Ouerdane Y., Girard S. , “Vulnerability of OFDR-based distributed sensord to high γ-ray doses”, Optics Express, 2015.

[74] Rizzolo S., Marin E., Boukenter A., Ouerdane Y., Cannas M., Périsse J., Bauer S., Macé J.R., Marcandella C., Paillet P., Girard S. . “Radiation hardened optical frequency domain reflectometry distributed temperature fiber-based sensors”, IEEE Trans. Nucl.Sci., vol.62, no.6, pp.171-176, 2016.

[75] Rizzolo S., Marin E., Cannas M., Ouerdane Y. ., “Radiation effects on OFDR-based sensors”, Opt. Lett., vol.40, no.20, pp. 4571-4574, 2015.

[76] Rizzolo S. Boukenter A., Marin E., Cannas M., Perisse J., Bauer S., Ouerdane Y., Girard S., “Vulnerability of OFDR-based distributed sensors to high γ-ray doses”, Opt. Express, vol. 23, no. 15, pp.18997-19009, 2015.

[77] Rizzolo S., “Advantages and Limitations do Distributed Optical-Frequency-Domain-Reflectometry for Optical Fiber-based Sensors in Harsh Environments”, PhD Thesis, Université de Saint-Etienne, 2016.

[78] Lecomte P., Blaison S., Boldo D., Taillade F., Caussanel M., Beauvois G., Duval H., Grieu S., Laffont, Laine F., Carrel F. “High temperature measurements in irradiated environment using Raman fiber-optics distributed temperature sensing,”SPIE Vol.9899,98991C-doi:10.1117/12.2219174, 2016.

[79] Lecomte P., “Mesure haute temperature en environnement irradié par fibre optique utilisant l’effet Raman”, PhD Thesis, Université de Perpignan via Domitia, 2017.

[80] Froggatt M., Moore J. « High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter », Applied Optics, vol.37, n°10, pp.1735-1740,1998.

[81] Fernandez Fernandez A., Brichard B., Berghmans F. “In situ measurement of refractive index changes induced by gamma radiation in

germanosilicate fibers". IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, pp. 1428-1430, 2003.

[82] Jensen F., Takada E., Nakazawa M., Kakuta T., Yamamoto S., "Consequences of radiation effects on pure-silica-scattering-based temperature measurements," Trans. Nucl. Sci., vol. 45, no. 1, pp. 50-58, 1998.

[83] Delepine-Lesoille S., Girard S., Landolt M., Bertrand J., Planes I., Boukenter A., Marin E., Humbert G., Leparmentier S., Auguste J.L., Ouerdane Y., "State of the art distributed optical fibre sensors qualified for the monitoring of the French underground repository for high level and intermediate level long lived radiatioactive wastes", Sensors, 2017.

[84] Brichard B., Fernandez Ferdandez A., Ooms H., Berghmans F., Decréton M., Tomashuk A., Klyamkin S., Zaberhailov M., Nikolin I., Bogatyrjov V., Hodgson E., Kakuta T., Shikama T., Nishitani T., Costley A., Vayakis G., « Radiation-hardening techniques of dedicated optical fibres used in plasma diagnostic systems in ITER », J. Nucl. Mater., Vol.329-333, pp.1456-1460,2004.

[85] Nagasawa K., Hoshi Y., Ohki Y., Yahagi K., "Improvement of radiation resistance of pure silica core fibers by hydrogen treatment", J. J. Appl. Phys., vol.24, pp.1224-1228,1985.

[86] Girard S., Laurent A., Pinsard E., Robin T., Cadier B., Boutillier M., Marcandella C., Boukenter A., Ouerdane Y., "Radiation-hardened Erbium-doped optical fibers and amplifiers for future high-dose space missions", Proc. SPIE Vol.8971-89710E-1, 2014.

[87] Ixfiber, [Online]. Available: http://www.ixfiber.com/

[88] I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, C. Marcandella et Y. Ouerdane "Steady γ-Ray Effects on the Performance of PPP-BOTDA and TW-COTDR Fiber Sensing", Sensors 17(2), 396, 2017.

[89] Dianov E., Golant K.M., Khrapko R.R., Tomashuk A.L., "Low-loss nitrogen-doped silica fibers: the prospects for applications in radiation environment". OFC'96 Technical Digest 1996, DOI: 10.1109/OFC.1996.907642 .

[90] I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, and Y. Ouerdane., « Etude de la fibre standard corning SMF28 par réflectométrie PPP-BOTDA et TW-COTDR », Abstract à la conférence JNOG (Journées nationales d'Optique Guidée), Rennes 2014.

[91] Marcuse D., “Loss Analysis of single-mode fiber splices”, Bell system technical journal, vol.56,n°5,p.703-718,1977.

[92] Sikali Y., « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : Séparation de la dépendance à la température et à la déformation », PhD Thesis, Telecom ParisTech, 2012.

[93] Irradiateur X. [On-line]. Available: http://www.cegelec-ndt-pes.com/irradiateurs-rayons-x

[94] Picolog. [On-line]. Available: https://www.picotech.com/

[95] Dosimètre. [Online]. Available: www.ptw.de/unidos_e_dosemeter_ad0.html

[96] COST299 Guideline FOS. [Online]. Avaible: https://infoscience.epfl.ch/record/143489

[97] Norme IEC 61757-1.

[98] Foaleng Mafang, “Distributed Brillouin sensing with sub-meter spatial resolution: modeling and processing”, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2011.

[99] Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N., “Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector,” Electronics. Letters, vol. 21, no. 13, pp. 569–570, 1985.

[100] Culshawand B. et Dakin J., “Fiber -optic sensing: a historical perspective,” J. Lightw. Technol., vol. 26, no. 9, pp. 1064–1078, 2008.

[101] Ferraro J.R., “Introductory Raman Spectroscopy,” Elsevier, 2003.

[102] Duche E.Burov, Brevet

[103] Di Francesca D., Girard S., Planes I., Cebollada A., Li Vecchi G., Alessi A., Reghioua I., Cangialosi C., Ladaci A., Rizzolo S., Lecoeuche V., Boukenter A., Champavère A., Ouerdane Y., "Radiation Hardened Architecture of a single-ended Raman-based Distributed Temperature sensor," Abstract NSREC., 2016.

[104] Girard S. Boukenter A. Robin T. Marin E. Ladaci A. Reghioua I. Morana A. Rizzolo S. Cangialosi C. Planes I. Michalon J.-Y. Marcandella C. Paillet P. Gaillardin M. Raine M. Richard N. Cadier B. Ouerdane Y., "On-site Regeneration Technique for Hole-Assisted Optical Fiber Used In

Nuclear Facilites," IEEE Transactions on Nuclear Science, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, 62 (6), pp.2941 - 2947., 2017.

[105] Zhou W., He Z., Yablon D., Hotate K., "Dependence of Brillouin Frequency Shift in Optical Fibers on Draw-Induced Residual Elastic and Inelastic Strain," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 18, pp. 1389-1391, 2007.

[106] LeFoch S., « Etude de la diffusion Brillouin stimulée dans les fibres optiques monomodes standard. Application aux capteurs de température et de pression. » PhD Thesis, Université de Bretagne Occidentale, Bretagne Occidentale, 2001.

[107] Nikles M., « La diffusion Brillouin dans les fibres optiques : Etude et application aux capteurs distribués. » PhD Thesis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne Switzerland, 1997.

[108] Morana A., Planes I. Girard S. Cangialosi C. Delepine-Lesoille S. Marin E. A., Ouerdane Y., « Steady-State Radiation-Induced Effects on the performances of BOTDA and BOTDR Optical Fiber Sensors », Conférence NSREC, 2017.

[109] Delepine-Lesoille S. Leparmentier S., Auguste J.L., Humbert G., “Mesures réparties de température et de déformations sur fibre optique par combinaison des analyses des rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin”, Mesures et Techniques Optiques pour l’industrie – Orléans, 2013.

[110] Bonnet-Eymard T., Thiriat F., Piedevache M., Prouvot J., Richard-Panot L., Armand G., Laviguerie R., Martin F., “Flexible supporting for excavation in CMHM ‘Argilite’ ”, Congres AFTES, 2011.

[111] Guayacan-Carrillo L.-M., Sulen J., Seyedi D., Ghabezloo S., Noiret A., Armand G., “Anaysis of Long-term Anisotropic Convergence in Drifts Excavated in Callovo-Oxfordian Claystone”, Rock Mech Rock Eng, 2015.

[112] Standard ISO 834 “Fire resistance tests - Elements of building construction.”

[113] J. C. da Silva, C. Martelli, H. Kalinowski, E. Penner, J. Canning, N. Groothoff “Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings” Optics and Lasers in Engineering 45 (2007) 88–92

[114] I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille et Y. Ouerdane – “Etude couplée théorie / expérience de la diffusion Brillouin et Rayleigh dans les fibres optiques”, Conférence nationale FMR (6e journées sur les Fibres Optiques en Milieu Radiatif), Orsay, Décembre 2015.

[115] I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, R. Farhoud, J. Zghondi, F. Fischli, Y. Ouerdane, « Mesures distribuées de déformations dans le soutènement d’un tunnel par réflectométrie TW-COTDR », Conférence nationale GO2S, 2016.

[116] I. Planes S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, S. Rizzolo, J. Perisse, J-R. Macé, and Y. Ouerdane – “Etude de l’effet des radiations gamma sur la réponse du capteur à fibre optique utilisant la réflectométrie TW-COTDR”, Conférence nationale FMR, 2016.

[117] S. Girard, A. Boukenter, T. Robin, E. Marin, A. Ladaci, I. Reghioua, A. Morana, D. Di Francesca, S. Rizzolo, C. Cangialosi, I. Planes, C. Marcandella, P. Paillet, M. Gaillardin, M. Raine, N. Richard, B. Cadier, and Y. Ouerdane, “On-site Regeneration Technique for Hole Assisted Optical Fibers Used In Nuclear Facilities”, 2015 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Conference international NSREC, 2015.

[118] D. Di Francesca, S. Girard, Senior Member, IEEE, I. Planes, A. Cebollada, A. Alessi, I. Reghioua, C. Cangialosi, A. Ladaci, S. Rizzolo, Student member, IEEE, V. Lecoeuche, A. Boukenter, A. Champavère, Y. Ouerdane, “Radiation Hardened Architecture of a Single-Ended Raman-based Distributed Temperature Sensor”, NSREC, 2016.

[119] I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, R. Farhoud, J. Zghondi, F. Fischlic, Y. Ouerdane - Distributed Strain Monitoring in Tunnel Shotcrete (with and without yieldable concrete wedges) by fiber-based TW-COTDR technique” OSA Technical Digest paper F1A.4, Conférence internationale APOS (6th Asia Pacific Optical Sensors Conference, Shanghai), Shanghai-Chine, Octobre 2016 – Prix de la meilleure présentation orale.

[120] D. Di Francesca, S. Girard, I. Planes, A. Cebollada, A. Alessi, I. Reghioua, C. Cangialosi, A. Ladaci, S. Rizzolo, V. Lecoeuche, A. Boukenter, A. Champavère, Y. Ouerdane “Radiation Hardened Architecture of a Single-Ended Raman-based Distributed Temperature Sensor” NSREC, Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Portland (Oregon, USA), Juillet 2016.

[121] I. Planes, D. Di Francesca, S. Girard, A. Alessi, A. Boukenter, E. Marin, M. Osmond, S. Delepine Lesoille, and Youcef Ouerdane. "Coupled Effects of Radiation and Temperature on the Performances of Rayleigh and Raman Fiber-based Sensors", RADECS 2017 (Radiation and Its Effects on Components and Systems), Genève, Octobre 2017.

[122] S. Delepine-Lesoille, I. Planes, M. Landolt, G. Hermand, et O. Perrochon. "Compared performances of Rayleigh Raman and Brillouin distributed temperature measurements during concrete container fire test.,"Optical Fiber Sensors Conference (OFS), 2017 25th, Corée, 2017.

[123] I. Planes, S Girard, A Boukenter, E Marin, S Delepine-Lesoille, A Gusarov, Y. Ouerdane “Study of γ-ray radiation effects on TW-COTDR optical fiber sensors”, OFS25 (Optical Fiber Sensors Conference), Corée, 2017.

[124] A. Piccolo, S. Delepine-Lesoille, M. Landolt, M. Osmond, S. Poirier, I. Planes, S. Girard, Y. Ouerdane, A. Boukenter, D. Leduc, Y. Lecieux “Combined Radiation and Temperature Effects on Brillouin Scattering based sensing with Ge-Doped Optical Fibers”, OFS26 (Optical Fiber Sensor Conference), Lausanne, Suisse, Septembre 2018.

[125] S. Delepine-Lesoille, S. Girard, M. Landolt, J. Bertrand, I. Planes, A. Boukenter, E. Marin, G. Humbert, S. Leparmentier, J.-L. Auguste, Y. Ouerdane, "France’s State of the Art Distributed Optical Fibre Sensors Qualified for the Monitoring of the French Underground Repository for High Level and Intermediate Level Long Lived Radioactive Wastes". Sensors 17, 1377, 2017.

[126] D. Di Francesca, S. Girard, I. Planes, A. Cebollada, G. Li Vecchi, A. Alessi, I. Reghioua, C. Cangialosi, A. Ladaci, S. Rizzolo, V. Lecoeuche, A. Boukenter, A. Champavère, Y. Ouerdane, “Radiation Hardened Architecture of a Single-Ended Raman-based Distributed Temperature Sensor”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.64, n°1, pp. 54 – 60, 2017.

[127] A. Morana; I. Planes; S. Girard; C. Cangialosi; S. Delepine-Lesoille; E. Marin; A. Boukenter; Y. Ouerdane, “Steady-State Radiation-Induced Effects on the performances of BOTDA and BOTDR Optical Fiber Sensors”, IEEE Transactions on Nuclear Science 65, 111-118, 2018.

[128] I. Planes, S. Girard, A. Boukenter, E. Marin, S. Delepine-Lesoille, S. Rizzolo, J. Perisse, J-R. Macé, and Y. Ouerdane, “Comparison between two sensing technologies based on Rayleigh scattering in optical fibers: Optical Frequency Domain Reflectometry and Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry”, Abstract conference Internationale SiO_2 (11th International symposium on SiO_2), Advanced dielectrics and related devices, Nice, Juin 2016.

[129] S. Girard, A. Alessi, N. Richard, L. Martin-Samos, V. De Michele, L. Giacomazzi, S. Agnello, D. Di Francesca, A. Morana, B. Winler, I. Reghioua, P. Paillet, M. Cannas, T. Robin, A. Boukenter, Y. Ouerdane, “Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers”, Reviews in Physics, Volume 4, 100032, November 2019.

[130] S. Girard, N. Richard, Y. Ouerdane, G. Origlio, A. Boukenter, L. Martin-Samos, P. Paillet, J.-P. Meunier, J. Baggio, M. Cannas, R. Boscaino, “Radiation effects on silica-based performs and Optical Fibers-II: Coupling Ad initio simulations and experients, IEEE Transactions on nuclear science, vol. 55,no 6, Decembre 2008.