



Mémoire de Master 2 Ingénierie optique

Développement et fabrication des capteurs optiques à
réseau de Bragg

Présenté par :
Kenza ZAHAR

Encadré par :
Jérôme BOUTON



Remerciements :

Issue d'une famille modeste dont les parents n'ont pas eu la chance de faire des études mais cultivant le sens du devoir et la bienveillance, j'ai pu finir mes études et rédiger ce mémoire.

Aujourd'hui, je ne peux que leur présenter mes sincères reconnaissances. Ils n'avaient certes pas les moyens de m'aider dans mon parcours scolaire mais ils m'ont apporté bien plus que cela : du l'amour inconditionnel, du soutien au quotidien et de la fierté pour la personne que je suis.

Si j'en suis arrivée là c'est grâce à leurs conseils et leurs expériences personnelles, ils m'ont appris que bien que nous soyons tous égaux certains sont nés favorisés par rapport aux autres. Que rien ne vient sans efforts à plus forte raison pour les moins avantagés d'entre nous que ma réussite dépend de la sueur qui perle à mon front.

Pour leur témoigner ma gratitude je leur dédie cette belle victoire : l'obtention de mon master 2 ingénierie optique après 6 mois d'un stage pratique au sein d'une entreprise qui m'a permis d'intégrer le monde du travail. Je les remercie d'être toujours là pour moi malgré la distance.

Je remercie dans le même élan mes frères et sœurs dont Nanas pour leurs encouragements.

Je tiens à remercier encore mon compagnon qui a été le premier à m'inciter à opter pour ce stage, je le remercie chaleureusement pour son soutien moral, intellectuel et pour sa forte présence tout le long de ce stage, j'en suis reconnaissante.

Je ne peux oublier la forte présence et le soutien moral de ma sœur de la vie Thamila CHETOUANE, grâce à elle j'ai pu dépasser des moments très difficiles et avancer sur la voie du succès et de la réussite.

Je remercie également mon responsable de stage, Monsieur Jérôme BOUTON, pour sa présence, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion et à accroître ma passion pour ce champ d'investigation autour de l'optique.

Je remercie toute l'équipe avec laquelle j'ai travaillé, notamment Axel OMS, Miyassa SALHI et Jean THRAUTSOLT pour les différentes connaissances qu'ils m'ont apportées, pour leurs réponses à mes questions et pour leur réactivité à m'apporter de l'aide dans l'accomplissement de mes tâches.

Merci à mes tuteurs académiques d'avoir pris le temps de me rendre visite sur le site et de s'intéresser à mes travaux ainsi que pour tous leurs encouragements.

Finalement, je remercie Cementys de m'avoir offert cette opportunité en m'octroyant ce stage, me permettant de progresser et d'enrichir mon profil polyvalent et ce en me faisant confiance dans les tâches qui m'ont été accordées m'apprenant à me faire confiance à mon tour.

Voilà la fin d'une belle aventure et le début d'une nouvelle avec de nouveaux défis.

Table des matières :

1. Introduction	3
2. Ouverture sur l'entreprise	4
3. Études effectuées pendant le stage	8
4. Production des capteurs de pression à réseau de Bragg (CFOP)	13
5. Résultats	20
6. Conclusion	30
7. Les annexes	31

1.Introduction

Dans le cadre de mon stage de fin d'étude de mon master 2 ingénierie optique (MIO), j'ai effectué un stage en tant qu'ingénieure optique/optronique à l'entreprise CEMENTYS.

Durant ce stage, j'étais amené à remplir plusieurs objectifs :

- Remise en fonctionnement du banc d'étalonnage CFOP :
Il s'agit de maîtriser les différents outillages utilisés pour étalonner les capteurs de pression à fibres optiques (CFOP), et vérifier leurs fonctionnements.
- Remise en fonctionnement des moyens de production CFOP :
Il s'agit de maîtriser les différents outillages utilisés pour fabriquer les CFOP.
- Essais et mesures sur CFOP outillage :
Il s'agit de faire quelques essais et mesures sur un CFOP déjà étalonné et en fonctionnement, dans le but d'avoir une idée claire sur la façon dont on les étalonne et on les valide.
- Production de nouveaux CFOP :
Quant à la production, elle s'effectue en plusieurs étapes. La première consiste à faire un collage des réseaux de Bragg sur une membrane, ensuite il faut ajouter une autre membrane pour définir la forme en pastille de capteur, puis faire deux soudures et finir par vérifier le bon fonctionnement du capteur et enfin l'étalonner.
- Application spécifique pour l'étalonnage des nouveaux CFOP :
Cette partie consiste à faire subir aux CFOP un cycle de pression et de température et vérifier leurs réponses, puis trouver un meilleur compromis entre les différents paramètres : les longueurs d'ondes des réseaux de Bragg utilisées, la température et la pression.

La pluralité des objectifs à remplir lors de mon stage se traduit par une richesse tant expérimentale que théorique, ce qui le rend de fait très intéressant. Je vais expliciter et vous illustrer dans ce rapport toutes mes démarches expérimentales et théoriques pour remplir les objectifs cités ainsi que les difficultés rencontrées et mes réponses apportées.

Chapitre :

2. Ouverture sur l'entreprise

2.1. Présentation de l'entreprise	5
2.2. Les capteurs	6
2.3. Le datalogger	7

2.1. Présentation de l'entreprise

Cementys® a été fondée le 25 août 2008, c'est une société par actions simplifiée (SAS), l'unique actionnaire est M. Vincent Lamour il est aussi le président-directeur général de CEMENTYS.

La chute du terminal 2E de l'aéroport Roissy Charles-de-Gaulle en 2005, avait soulevé en M.Lamour des questions sur la qualité de l'interprétation et de l'analyse des données d'instrumentation de l'ouvrage.

Par conséquent, l'entreprise a été créée plus tard et sera la première à fournir des solutions de surveillance sur mesure, d'instrumentation et d'interprétation des données.

Cementys est une entreprise spécialiste du contrôle des travaux de génie civil depuis plus de 12 ans (tunnels, voies ferrées, barrages, ponts, ports, infrastructures énergétiques), CEMENTYS est leader dans la démarche d'ingénierie, elle accompagne ses clients tout au long du cycle de vie de leur projet, de la phase de conception à la phase de maintenance.

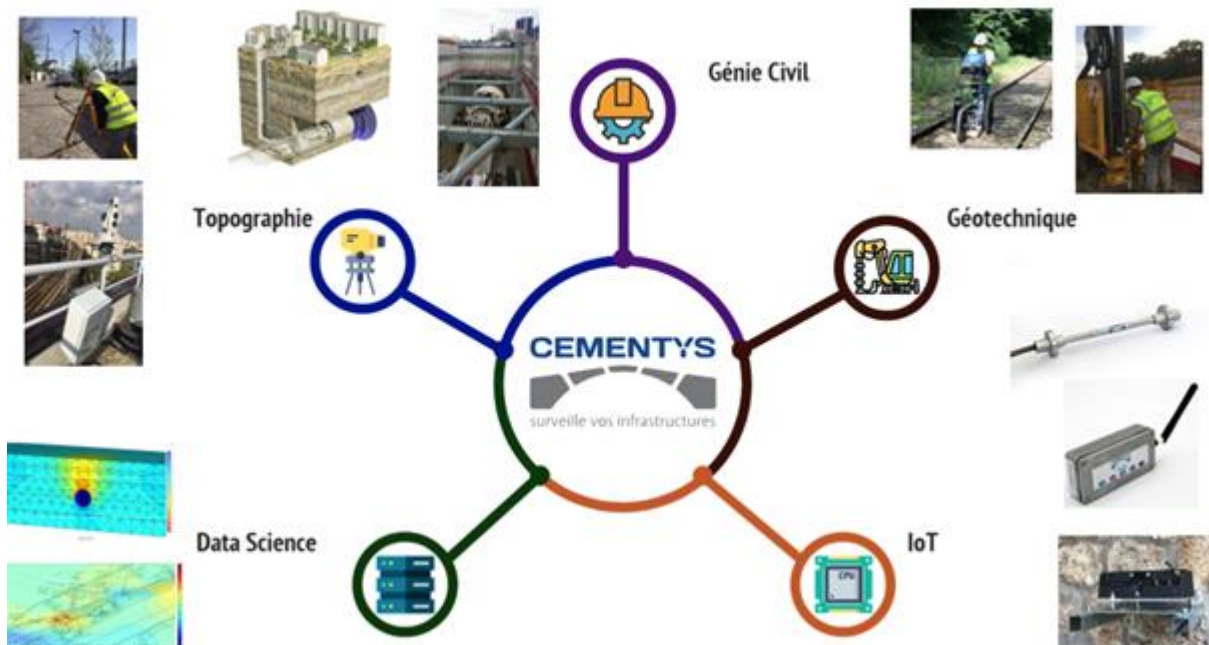


Le travail de Cementys est basé sur l'auscultation, la géotechnique et l'expertise. Elle se traduit par une forte présence dans 4 continents.

Cementys dans le Monde



Cementys a choisi d'intégrer toute la chaîne de production et de valeur afin de garder un contrôle de qualité sur l'ensemble de la production et de répondre au mieux sur les délais de livraison.



Dans une logique d'amélioration continue et de dépassement, Cementys continue à améliorer les techniques conventionnelles en positionnant la R&D comme une des fonctions centrales de son organisation. Ceci se matérialise par un investissement dans de grands projets européens tels que le SMS, l'affectation de 20% de son chiffre d'affaires à la R&D afin de développer de nouvelles solutions alliant précision, fiabilité et efficacité, dont l'objectif principal est de toujours mieux répondre aux besoins de ses clients et d'optimiser les budgets de leurs projets.

2.2. Les capteurs

Cementys présente une large gamme de capteurs avec plusieurs fonctions. J'ai travaillé sur les capteurs PressionLux et Fabrylux.

On trouvera ci-dessous dans le tableau 1 la liste des plus importants capteurs utilisés par Cementys :

Capteur	Utilisation
Anémomètre	Surveillance les fortes rafales de vent
Baromètre	Mesure de pression atmosphérique
Pt100	Mesure de température
Cellule de charge	Mesure de charge sur ancrage
Cellule de pression	Mesure des pression totales dans les sols
CorroVolta	Mesure de corrosion de béton armé
Extensomètre	Mesure des tassements et soulèvements
Fissuromètre	Mesure des fissures superficielles et leurs évolutions
Delta GNSS	Mesure en temps réel et en temps quasi réel les déplacements horizontaux et verticaux
Hydracap	Mesure de température de d'humidité
InsarLog	Mesure les déplacements horizontaux et verticaux de grandes structures et la surface
Inclinomètre IPiLog	Mesure les mouvements de vos structures
Microvib	Mesure de déformations et contraintes
Prézomètre	Surveillance les niveaux des nappes et les pressions interstitielles.
Tassomètre	Mesure des tassements différentiels dans les bâtiments.
Pyranomètre	Mesure de l'intensité lumineuse pour vos applications extérieures
Sonolog	Surveillance acoustique adapté pour tous les environnements
Tillog	Mesure d'inclinaison des structures
VibroLog	Suivi vibratoire de vos infrastructures et chantiers
Capteur basé a la fibre optique	
Accelerolux	Mesure durable des accélérations d'un élément de structure
Fabrylux	Mesure des ondes acoustiques par interférométrie
MicroLux	Mesure des déformations et des contraintes dans le béton par fibre optique
PressioLux	Suivi de pression par fibre optique
Strainlux	Mesure de déformation par fibre optique
Thermolux	Mesure de température par fibre optique

Tableau 1: capteurs du

2.3. Le datalogger

Le datalogger est un système d'acquisition 100% fabriqué par Cementys. Il permet de visualiser, enregistrer et transmettre des données prises par les capteurs à fibre optique à réseau de Bragg (FBG) (Figure1).

Il est utilisé pour différents types de capteurs à fibre optique (capteurs de température, de déformation, d'inclinomètre, de pression, etc.).

Il nous renseigne sur différents paramètres (température, humidité, déformation) (figure 2), il est idéal pour la surveillance des structures et des infrastructures dans leur environnement.

Dans le cadre de mon travail, je l'ai utilisé pour enregistrer le déplacement en longueur d'onde pour les tests sur le capteur PressionLux et pour la visualisation des franges d'interférence pour les tests sur le capteur FabryLux.



Figure 1 : Le data-logger

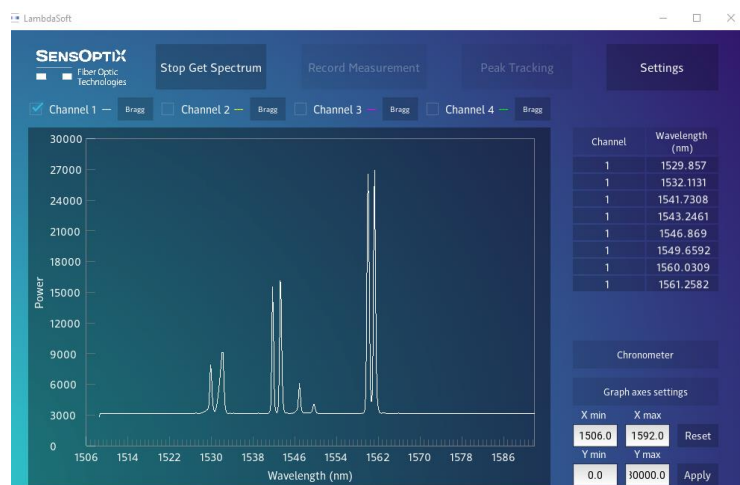


Figure 2 : données prises par un capteur CFOP

Chapitre :

3. Études effectuées pendant le stage

3.1. Les capteurs optiques	9
3.1.1. Les capteurs ponctuels	9
3.1.1.1. Les capteurs ponctuels à réseau de Bragg	9
3.1.1.2. Les capteurs ponctuels Fabry Péro	10
3.2. Les capteurs distribués	11
3.2.1. Les capteurs (DTS) et (DTSS)	11
3.2.2. Les capteurs acoustiques (DAS)	12

3.1. Les capteurs optiques

Le marché de Cementys contient deux grandes familles de capteurs optiques :

3.1.1. Les capteurs ponctuels

3.1.1.1. Les capteurs ponctuels à réseau de Bragg

J'ai travaillé essentiellement sur les capteurs ponctuels à réseau de Bragg qui sont des capteurs sensibles à la pression, à la température, aux déplacements et à la déformation.

La fibre optique utilisée pour ce type de capteur est une fibre optique à réseau de Bragg. Elle possède un indice de réfraction du cœur qui varie sur sa longueur (succession d'un indice élevé et un faible). Cette alternance en indice de réfraction est faite par un faisceau laser UV projeté sur la fibre à travers un masque de phase, qui fait augmenter l'indice de réfraction de la partie du cœur de fibre optique exposée (figure 3).

Au regard de cette variation d'indice de réfraction, la fibre optique se comporte comme un miroir qui réfléchit quelques longueurs d'onde et en laisse passer d'autres.

Les longueurs d'onde réfléchies sont bien définies et elles s'appellent " les longueurs d'ondes de Bragg", elles sont caractérisées par la période du réseau de Bragg (Λ) et de l'indice de réfraction du noyau (n_{eff}).

Ces paramètres sont rassemblés sous cette relation : $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$, (figure 4).⁽¹⁾

Si les fibres optiques à réseaux de Bragg sont utilisées comme capteurs, c'est par ce qu'elles nous renseignent sur des grandeurs physiques importantes. En effet, le réseau de Bragg a des caractéristiques intrinsèques intéressantes : il est sensible à la pression et à la température. Si par exemple, on étire la fibre optique à réseau de Bragg, le pas de Bragg change et donc la longueur d'onde de Bragg va changer du même coup. De la même manière, si on chauffe la fibre optique à réseau de Bragg, cela va générer deux phénomènes : l'effet thermo-optique qui va induire un changement d'indice de réfraction de la silice et l'effet de la dilatation thermique qui va générer une augmentation de la longueur du pas de Bragg.

Pour quantifier la contribution de l'effet de la dilatation thermique et l'effet thermo-optique, je suis allé me référer à une thèse écrite par M.Romain Cotillard⁽²⁾, qui nous présente une relation liant les deux phénomènes au déplacement en longueur d'onde de réseau de Bragg en fonction de la température:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \lambda_B \left(\frac{1}{n_c} \frac{dn_c}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) \text{ Avec } L \text{ la longueur du réseau.} \quad (1)$$

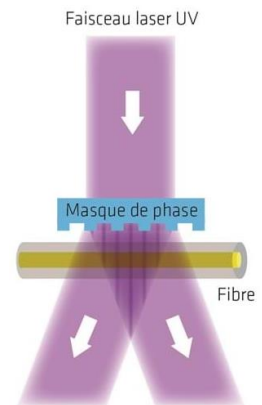


Figure 3 : Fabrication d'un réseau de Bragg

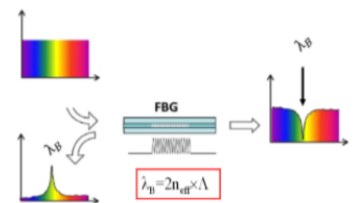


Figure 4 : Le réseau de Bragg

¹ : Site de l'entreprise TeraXion : technologies à réseau de Bragg : <https://www.teraxion.com/fr/entreprise/reseauxdeBragg>

² : Romain Cotillard. Stabilisation des propriétés optiques des réseaux de Bragg aux températures extrêmes par régénération et inscription par laser femtoseconde. Optique [physics.optics]. Université de Lille I, 2015. Français. tel-02273782.

Sachant que la valeur du coefficient de dilatation thermique $\frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$ est d'environ 5.10^{-7} K^{-1} , et le coefficient thermo-optique $\frac{1}{n_c} \frac{dn_c}{dT}$ est d'environ 1.10^{-5} K^{-1} .

La relation (1) se simplifie à : $\frac{\Delta \lambda_c}{\Delta T} \approx 7,3.10^{-6} \cdot \lambda_B$

On constate que la contribution de l'effet de dilatation thermique est plus importante que la contribution de l'effet thermo-optique, d'où le déplacement au final vers les longueurs d'onde les plus élevées.

3.1.1.2. Les capteurs ponctuels Fabry Péro

Le deuxième type de capteur sur lequel j'ai travaillé est le capteur ponctuel Fabry Péro. Je l'ai utilisé dans le domaine acoustique, mais il peut être aussi utilisé comme un accéléromètre ou un capteur de pression tout comme le capteur ponctuel de pression à réseau de Bragg.

Il s'agit d'une cavité Fabry Péro qui est composée d'un diaphragme d'un côté et d'une coupe droite d'une fibre optique de l'autre.

Quand la lumière est envoyée dans la fibre, elle fait des allers retours dans la cavité, le signal de retour est récupéré et traité à l'aide d'un logiciel.

L'expérience que j'ai réalisée chez CEMENTYS consiste à envoyer un son avec mon téléphone à l'entrée de ce capteur, au niveau du diaphragme. Ainsi le son applique une pression sur celui-ci qui va modifier la longueur de la cavité et qui va en conséquence modifier la différence de chemin optique en fonction des tonalités (variation de fréquences) du son.

En traitant le signal détecté on arrive à rejouer le son (figure 6). Le code qui traite les données renvoyées par la fibre optique et reçues par le data-logger est codé en python que j'ai dû revoir, il a pour objectif d'obtenir une fréquence à partir d'une FFT, et de relire cette fréquence et rejouer le son à l'identique (figure7).

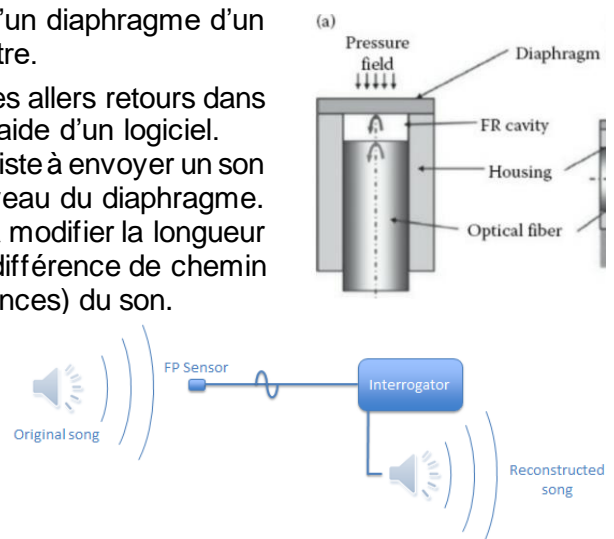


Figure 6 : Fonctionnement de Fabry Péro

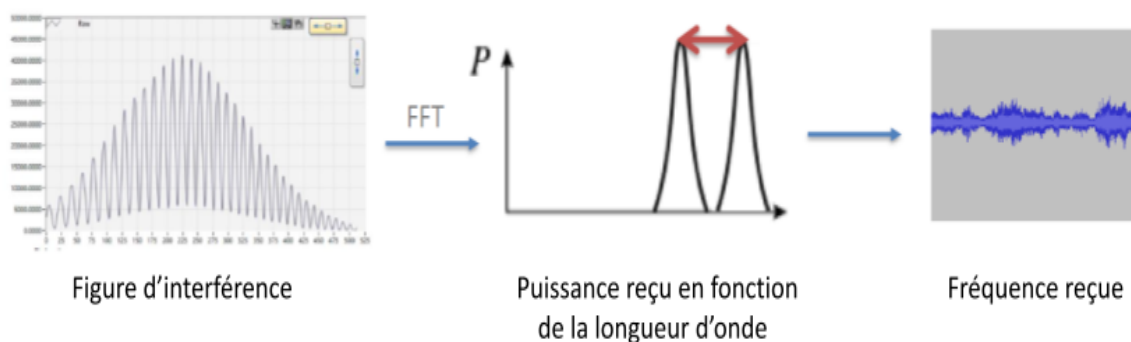


Figure 7 : L'objectif du code de traitement du son de capteur Fabry Péro

En plus de mon travail sur l'amélioration du code de traitement du son par ce capteur, je suis intervenu également dans la recherche et développement de ce capteur. J'ai fait des tests sur d'autres cavités qui peuvent nous aider à améliorer le rendement et l'architecture de ce capteur. Je changeais plusieurs paramètres dans le système, notamment la qualité du diaphragme et la longueur de la cavité qui fait changer en conséquence le nombre de franges d'interférences obtenu.

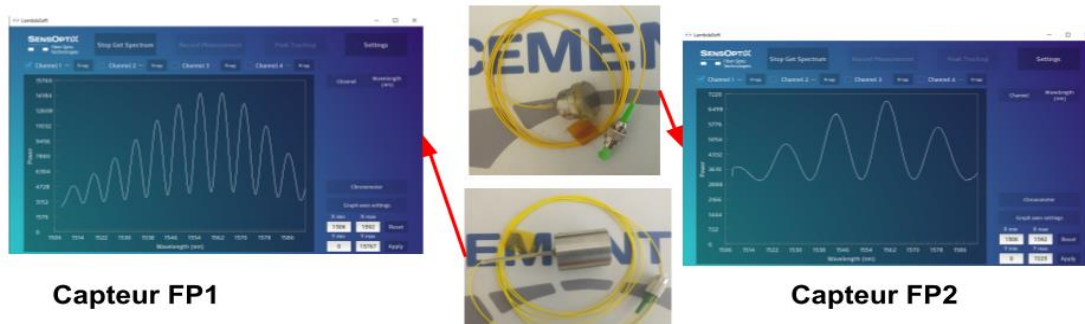


Figure 8 : Test de fonctionnement des capteurs Fabry Péro

3.2. Les capteurs distribués

Il existe trois types de capteurs distribués chez Cementys basés sur la diffusion élastique comme les capteurs à technologie Raman (Distributed Temperature Sensing (DTS)) et Brillouin (Distributed Strain and Temperature Sensing (DTSS)) ou inélastique comme les capteurs à technologie Rayleigh (Distributed Acoustic Sensing (DAS)).

L'atout principal de la mesure distribuée est d'effectuer des mesures en plusieurs points le long d'un câble à fibre optique. Une impulsion laser infrarouge est envoyée depuis une extrémité de la fibre optique grâce à l'interrogateur optique. Une petite fraction de cette impulsion est rétrodiffusée successivement tout au long du parcours de l'impulsion (Figure 9). A un instant donné, l'information rétrodiffusée depuis un point donné de la fibre est collectée à l'extrémité de la fibre et est analysée par l'interrogateur optique (i.e. Data-Logger Figure 10).

3.2.1. Les capteurs (DTS) et (DTSS)

Les capteurs de température répartis (DTS) sont des fibres optiques qui fournissent des mesures de température tout au long du parcours de l'impulsion laser et à tout moment. Elle est basée sur le phénomène de diffusion Raman qui se produit à l'intérieur de la fibre. La mesure du signal rétrodiffusé Brillouin quant à lui (DTSS), nous renseigne simultanément sur les variations en température et en déformation (Figure9).⁽³⁾

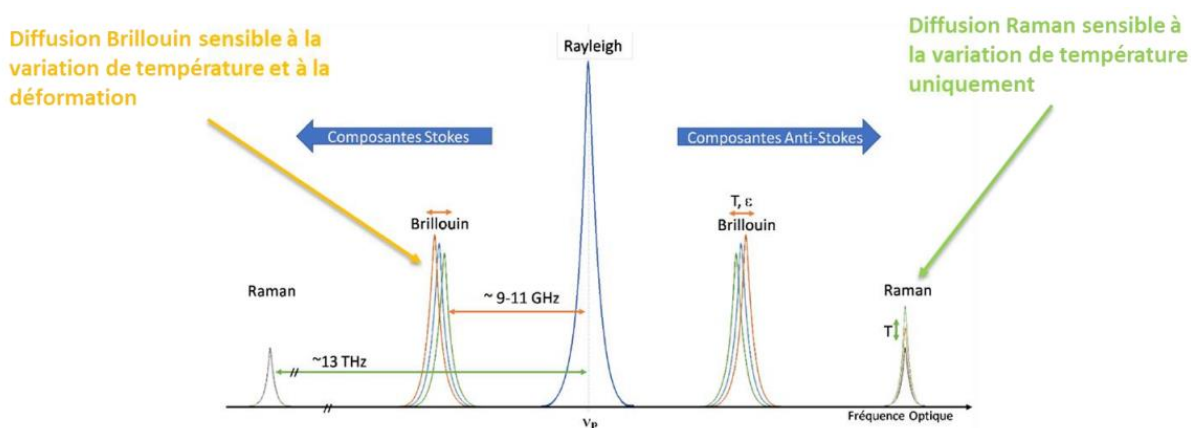


Figure 9 : Spectre de rétrodiffusion dans une fibre optique en silice

³ : Rapport interne Cementys

Comme représenté dans la Figure 10, le principe de la mesure consiste en l'envoi d'une impulsion lumineuse d'une durée de 10 nanosecondes ou moins dans la fibre via un coupleur.

L'analyse du temps de parcours (généralement appelé "temps de vol") entre le "lancement" de l'impulsion lumineuse et le retour de la lumière rétrodiffusée détermine la position de la température et/ou de la déformation enregistrée le long de la fibre grâce à la vitesse de propagation de la lumière.

La Figure 5 montre la configuration de base d'un réflectomètre optique temporel (OTDR) d'où les configurations du DTS/DTSS sont inspirées.

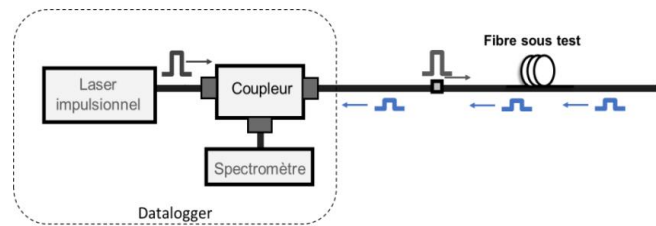


Figure 10 : Configuration standard d'un système de capteur à fibre optique (OTDR)

3.2.2. Les capteurs acoustiques (DAS)

Les capteurs acoustiques (DAS) basés sur la diffusion Rayleigh permettent de détecter des signaux acoustiques associés à des perturbations sur la fibre. Il est donc possible de réaliser une détection sur de grandes distances.

Plus précisément, l'interrogateur envoie des impulsions laser cohérentes le long d'une fibre optique monomode utilisée comme câble de détection. Les sites de diffusion répartis sur toute la longueur de la fibre font que celle-ci agit comme un interféromètre distribué. Grâce à ce phénomène de diffusion, une partie de l'impulsion laser est rétrodiffusée en direction de l'interrogateur optique où elle est lue par le spectromètre. La perturbation acoustique appliquée sur la fibre génère son élongation ou sa compression microscopique (effort), ce qui provoque un changement de relation de phase. C'est ce changement qui, une fois enregistré par le spectromètre, permet de déterminer la signature acoustique de l'événement enregistré.

L'étude et le traitement du signal enregistré permettent ensuite de discerner ces perturbations ou événements en fonction de différents paramètres qui sont : la distance, la vitesse, la bande acoustique, l'aspect temporel (perturbation continue ou périodique dans le temps) et l'intensité.

Ces paramètres de discernement permettent ainsi de programmer des alarmes, quand cela est possible, et ainsi de détecter et isoler des perturbations précises. ⁽⁴⁾

⁴ : Rapport interne Cementys

Chapitre :

4. Production des capteurs de pression à réseau de Bragg (CFOP)

4.1. Capteurs optiques de pression “PressioLux®”	14
4.2. Fabrication des capteurs optiques à réseau de Bragg	14
4.2.1. Positionnement de la fibre à réseau de Bragg sur la membrane supérieure	14
4.2.2. Coller la fibre à réseau de Bragg sur la membrane supérieure	15
4.2.3. Vérification des longueurs d’ondes	15
4.2.4. Première soudure (S1) de PressioLux®	16
4.2.5. Deuxième soudure (S2) de PressioLux®	17
4.2.6. Vérification d’étanchéité de CFOP	18
4.2.7. Etalonnage des capteurs optiques à réseau de Bragg	19

4.1. Capteurs optiques de pression “PressioLux®”

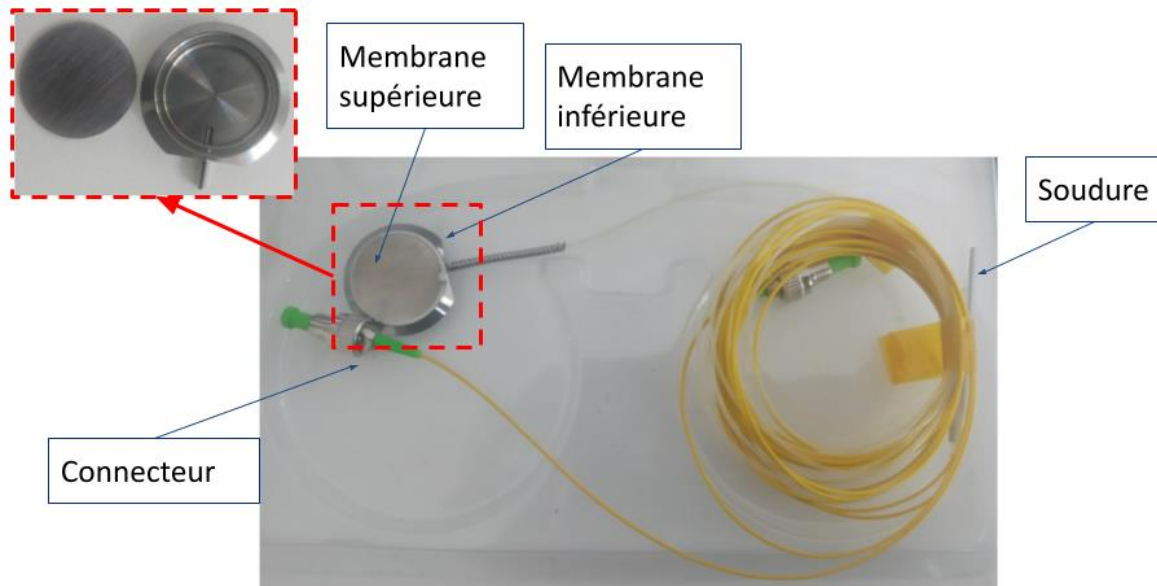


Figure 11 : Capteur de pression à fibre optique à réseau de Bragg (CFOP)

PressioLux® est un capteur de pression à fibre optique compact utilisé dans les secteurs de l'aéronautique et de l'aérospatial (Figure 11).

Il a une forme de pastille de 22 mm de diamètre, facile à emporter et à installer. Il est conçu pour supporter une dizaine de bars. On peut chaîner plusieurs capteurs pour en faire une chaîne de mesure de pression à plusieurs endroits. Il peut être connecté à un BraggLogger, seul ou en chaîne à condition que les longueurs d'onde ne se chevauchent pas.

La fibre optique utilisée pour la fabrication des CFOP est une fibre optique à deux réseaux de Bragg, espacé de 2 nm et qui rentrent dans la gamme de la largeur spectral utilisée par l'interrogateur optique (BraggLogger) : 1506-1592 nm (Figure 12)

Les deux réseaux de Bragg sont collés d'une telle façon à ce qu'un réseau de Bragg de longueur d'onde λ_p soit positionné vers le centre de la membrane supérieure, pour qu'il subisse la pression appliquée sur cette membrane qui est plus intense au milieu. Et l'autre avec la longueur d'onde λ_T collé plutôt vers le bord de cette membrane, il subit moins la pression appliquée, il est utilisé pour apporter une correction en pression. Les deux réseaux de Bragg ont la même sensibilité à la température.

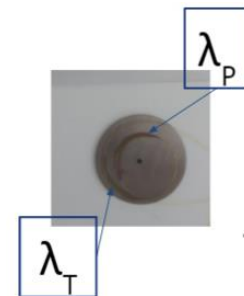


Figure 12 : collage des deux réseaux de Bragg

4.2. Fabrication des capteurs optiques à réseau de Bragg

4.2.1. Positionnement de la fibre à réseau de Bragg sur la membrane supérieure

Dans cette partie de fabrication des CFOP, j'ai développé une nouvelle méthode de collage des réseaux de Bragg.

Pour fixer les réseaux de Bragg sur la membrane supérieure, il faut appliquer une colle dessus et chauffer l'ensemble à une certaine température. Il faut donc mettre la membrane supérieure sur une plaque chauffante.

L'ancien outillage de collage est composé de deux microtubes positionnés sur la platine chauffante.

Afin de positionner les réseaux de Bragg, on doit tout d'abord démêler toute la fibre qui fait 4m de long et la faire rentrer soigneusement dans un microtube puis dans un deuxième. On fixe le premier Bragg à l'aide de kapton, on continue le tour et on positionne le deuxième.

Cette procédure est tellement lente et risquée car elle génère plusieurs cassures de fibre.

Le nouveau montage que j'ai proposé est un dispositif constitué de 4 pics qu'on vient positionner sur la membrane supérieure (Figure 13). La distance entre chaque pic consécutif à respecter correspond au rayon de courbure minimal (R) de la fibre pour qu'elle ne se casse pas (Figure 14).

Afin de coller la fibre sur la membrane supérieure, on la passe autour des pics et on la fixe avec un kapton en premier lieu.

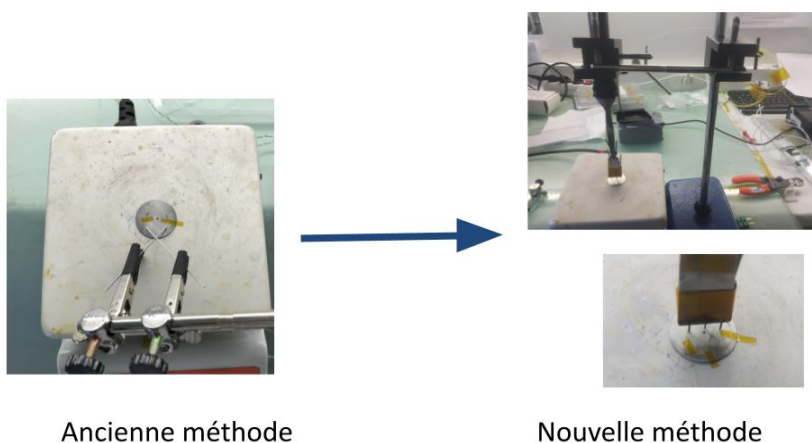


Figure 13 : Méthodes de collages des réseaux de Bragg.

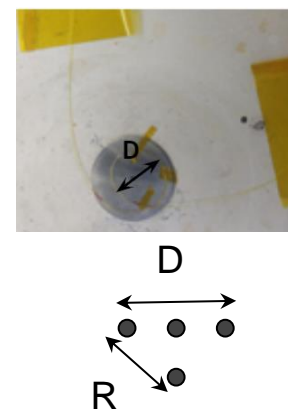


Figure 14 : Rayon de courbure à respecter pour la fibre.

4.2.2. Coller la fibre à réseau de Bragg sur la membrane supérieure

Afin de coller les deux réseaux de Bragg sur la membrane supérieure on utilise la colle P-adhésive.

On contrôle la température des platines par Arduino, (Figure 15), donc on impose un cycle de température conforme à la datasheet de la P-adhésive (300 min à 120° puis 300 min à 150° et finalement 300 min à 170°).

4.2.3. Vérification des longueurs d'ondes

Après avoir collé les deux réseaux de Bragg sur la membrane supérieure, je vérifie l'influence de la colle sur ces derniers en mesurant leurs longueurs d'onde.

Pour cela il faut souder un connecteur à un des deux côtés de la fibre et le connecter à un Bragg-logger.

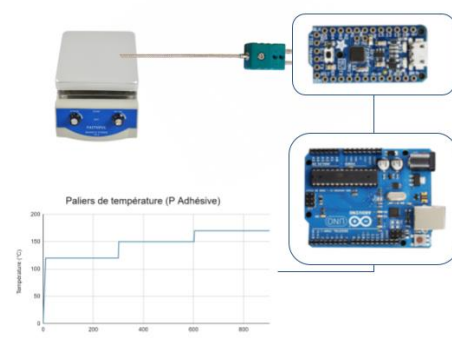


Figure 15 : Système de régulation de température.

Pour faire une soudure optique il faut procéder comme suit :

- Je dénude le bout de fibre à réseau de Bragg.
- Je dénude le bout de fibre de connecteur.
- Je rentre le côté dénudé de l'une des deux fibres dans un protège épissure afin de protéger la soudure.
- Je clive les deux côtés dénudés des deux fibres afin d'avoir une coupe bien droite, (Figure 16).
- Je place les deux bouts de fibre clivés dans la soudeuse, (Figure 17).
- Je suis les instructions sur la soudeuse.
- Une fois la soudure terminée, je la protège en mettant l'épissure dessus, puis le place dans un système de chauffage intégré la soudeuse, le protège épissure va fondre et coller autour de la soudure.



Figure 16 : Cliveuse de fibres optiques.



Figure 17 : Soudeuse optique

Une fois que la soudure est terminée, on connecte la fibre sur le Bragg-Logger et on écrit la longueur d'onde lue par celui-ci sur la feuille de suivi de fabrication.

On casse la soudure et on continue la procédure de fabrication de capteur.

4.2.4. Première soudure (S1) de PressioLux®

Pour préparer le capteur pour la première soudure, je rassemble les deux membranes ensemble afin de protéger les deux FBG collés sur la membrane supérieure.

Pour cela, je fais rentrer les deux bouts libres de la fibre à réseau de Bragg dans la membrane inférieure et je tire délicatement jusqu'à la fermeture de la membrane supérieure sur l'inférieure et je les fixe à l'aide d'un Kapton, (Figure 18).

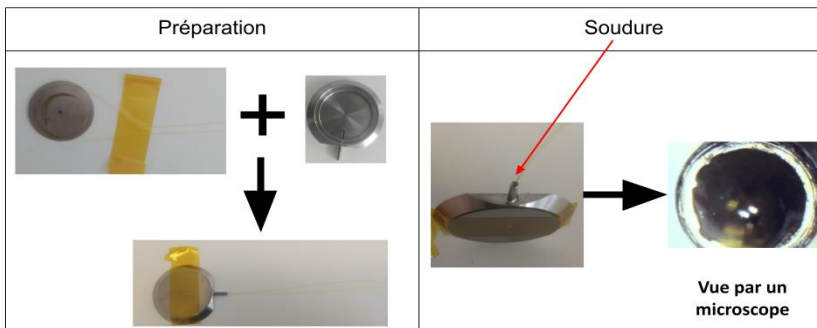
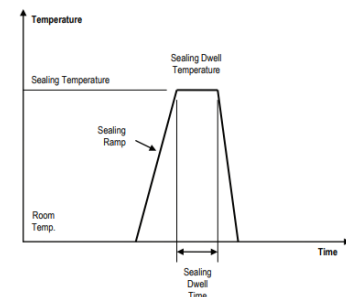


Figure 18 : Préparation et réalisation de la première soudure.



Sealing Parameter	Option A	Option B	Option C	Unit
Temperature ramp rate	50 (minimum)			°C/minute
Peak temperature	320	350	375	°C
Dwell time at peak temp.	30	20	15	Seconds

Figure 19 : Palier de la température à respecter lors de la S1.

La soudure S1 s'effectue avec un bout de verre (préforme) qu'on va venir fondre sur le microtube de la membrane inférieure afin d'assurer l'étanchéité du capteur à ce niveau.

La préforme exige un palier de température bien contrôlée pour que la préforme fonde et adhère bien, (Figure 19).

L'ancienne méthode pratiquée par l'entreprise était le chauffage par induction. Il s'agit d'une bobine autour d'un clou en fer qui est en contact avec le microtube, on fait rentrer les deux bouts de fibre dans la préforme et on la positionne à l'intérieur de microtube, on met le système en

marche et la préforme fond par induction et coule à l'intérieur mais le palier de température est difficilement contrôlable par ce système d'induction.

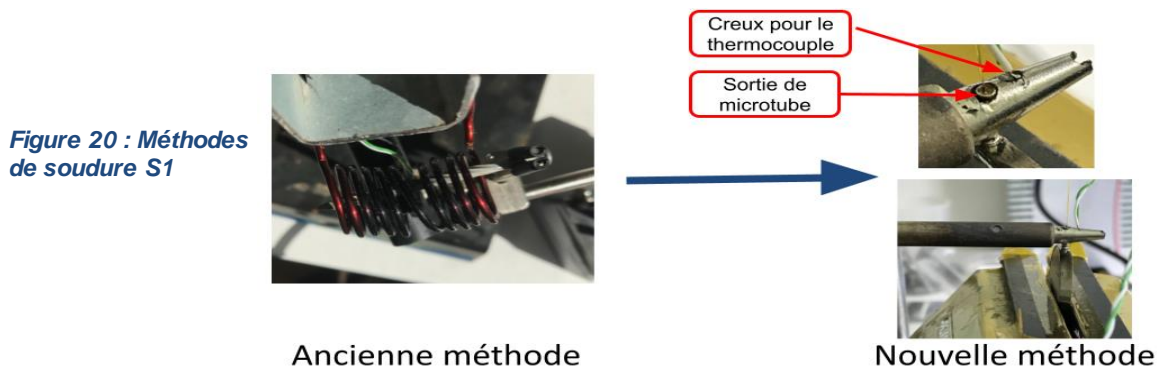
La nouvelle méthode à laquelle j'ai pensé et proposé à l'équipe est d'utiliser un fer à souder qui monte rapidement en température afin de respecter le palier exigé par la préforme, et surtout stable en température et permet de rester le temps souhaité au sommet du palier (Photo en annexe).

Pour un chauffage local et uniforme autour de la préforme, j'ai troué la panne de fer à souder avec une perceuse avec un diamètre légèrement supérieur au diamètre du microtube (Figure 20).

Avec ce montage la préforme fond bien et adhère parfaitement et le microtube est étanche.

Afin de relever la température au niveau du trou de la panne et s'assurer de la température du microtube après l'avoir placé, j'ai fait un creux au niveau de la panne pour placer le thermocouple dedans (tout le temps au même endroit) puis j'ai comparé les deux températures (trou et creux).

La différence en température est de 50°C, donc il faut chauffer à 400°C au niveau de creux pour avoir 350°C au niveau de trou.



4.2.5. Deuxième soudure (S2) de PressioLux®

Pour préparer le capteur pour la deuxième soudure, je protège la fibre libre en l'entourant par une gaine thermo-rétractable en PTFE qui sera fixée sur le microtube à l'aide d'une protection en fer.

La soudure S2 se compose de deux soudures, une à faisceau d'électron et une autre au laser, elle consiste à souder les deux membranes, elle est faite dans une autre entreprise "SAFEL".

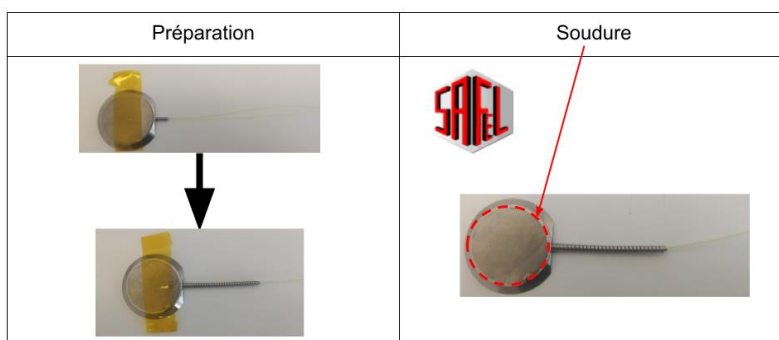


Tableau 2 : Préparation et réalisation de la première soudure.

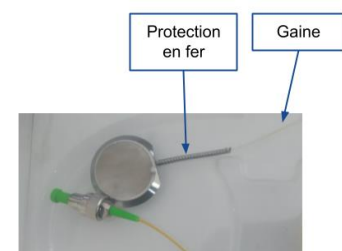


Figure 21 : Architecture finale de capteur CFOP.

Une fois que les capteurs sont prêts et récupérés de chez SAFEL, on vérifie que la fibre n'est pas cassée. Pour cela on fait une autre mesure des deux longueurs d'onde de Bragg, et on vérifie que le laser passe bien dans la fibre.

4.2.6. Vérification d'étanchéité de CFOP

Cette partie est la partie la plus décisive dans la production des CFOP. Elle a deux objectifs : vérification d'étanchéité des capteurs et le vieillissement de ceux-ci.

Pour cela, on leur fait subir deux cycles comme suit :

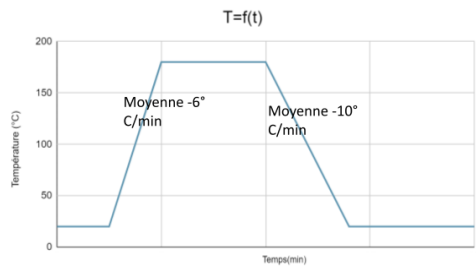
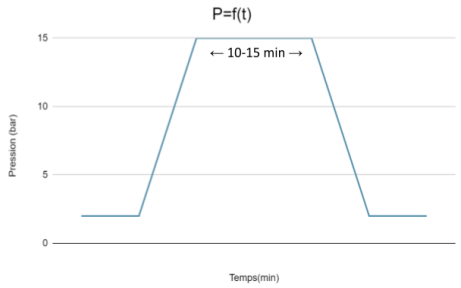
Description	Détail
Cycles de mise en température	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Réalisation du cycle thermique. 2. Répétition= 3. 3. Durée de palier = 15-20 min. 4. $T_{max}=180^{\circ}\text{C}$. 	 <p>Le graphique $T=f(t)$ illustre le cycle thermique. L'axe des ordonnées représente la température en degrés Celsius (0 à 200), et l'axe des abscisses représente le temps en minutes. La courbe commence à 0°C, monte linéairement à une vitesse moyenne de 6°C/min, atteint un palier à 180°C, puis descend linéairement à une vitesse moyenne de 10°C/min avant de revenir à 0°C.</p>
Cycles de mise en pression	
<ol style="list-style-type: none"> 5. Réalisation du cycle en pression. 6. Répétition= 3. 7. $P_{max}=15$ bars. 	 <p>Le graphique $P=f(t)$ illustre le cycle de pression. L'axe des ordonnées représente la pression en bars (0 à 15), et l'axe des abscisses représente le temps en minutes. La courbe montre une montée linéaire à 15 bars, un palier maintenu pendant 10 à 15 minutes, puis une descente linéaire à 0 bar.</p>

Tableau 3 : Cycles de pression et de température pour les CFOP.

Cette procédure nécessite une préparation de plusieurs outillages :

1. L'enceinte de mise en pression en température.
2. Le suivi de la température avec l'outillage Arduino.
3. Le suivi de la pression avec l'outillage Additel 680.
4. L'IO outillage pour l'acquisition des longueurs d'onde.

Si la réponse en longueur d'onde de ces capteurs suit bien l'évolution de la température et de la pression, le capteur est bien fonctionnel et il est prêt pour être étalonné.

4.2.7. Etalonnage des capteurs optiques à réseau de Bragg

Le banc d'étalonnage est représenté dans la figure (22) :

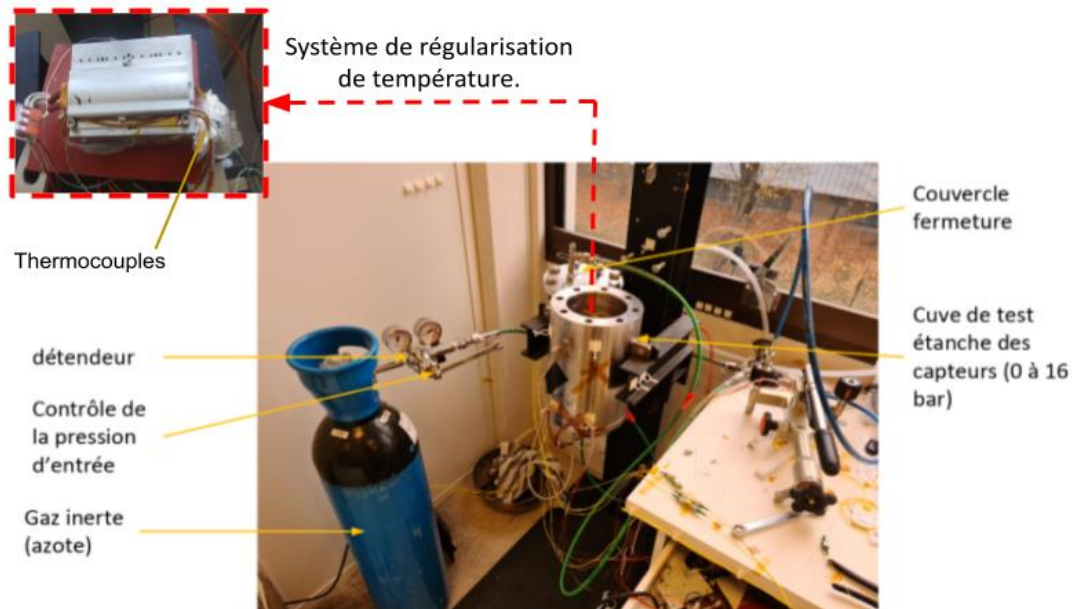


Figure 22 : Banc d'étalonnage des CFOP

Le banc d'étalonnage correspond à une enceinte en forme cylindrique qui contient :

- Un bloc de 12 fentes à l'intérieur, chaque fente peut contenir un seul capteur à étalonner.
- Un système de chauffage qui est collé au système de fentes.
- Une bouteille à gaz d'hélium pour mettre les capteurs sous pression.
- Des thermocouples positionnés dans différents endroits.
- Des connecteurs optiques liés au Bragg-Logger.

L'étalonnage des CFOP consiste à trouver une relation qui lie P/T à λ_T / λ_P sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} P \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_T \\ \lambda_P \end{pmatrix}$$

Pour cela j'ai développé une application qui permet de traiter les données en premier lieu et de me fournir différentes informations sur le déplacement en longueur d'onde, avant d'étalonner.

À l'aide de ces données on pourra appliquer des fits polynomiaux et calculer l'erreur quadratique moyenne (rmse) correspondante.

Chapitre :

5. Résultats

5.1. Remise en fonctionnement et amélioration du banc d'étalonnage CFOP	21
5.1.1.Amélioration de banc d'étalonnage	21
5.1.2.Vérification de bon fonctionnement des thermocouples	22
5.2. Essais et mesures sur CFOP outillage	22
5.3. Mesures sur CFOP : Vérification de leurs étanchéités	24
5.4. L'application d'étalonnage	28
5.5. La gestion du projet	29
5.5.1.Le diagramme de Gantt	29
5.5.2.La matrice des risques	30

5.1. Remise en fonctionnement et amélioration du banc d'étalonnage CFOP

5.1.1. Amélioration de banc d'étalonnage

5.1.1.1. Relever la température à plusieurs endroits

Utilisation de la CR1000 :

La première tentative d'enregistrement de la température s'est faite en utilisant la CR1000, (Figure 23), mais je me suis rendue compte que la température fluctuait énormément.

Après plusieurs essais et recherches, j'ai constaté que le problème est dû à la masse, deux éléments dans l'outillage d'étalonnage ne sont pas reliés à la même masse.

Malheureusement, on n'a pas réussi à identifier ces éléments, mais j'ai pensé à mettre une gaine PTFE pour isoler tous les thermocouples afin d'éviter le contact direct avec l'outillage, ce qui a résolu le problème.



Figure 23 : CR1000

Utilisation des cartes Arduino :

La seconde solution était de mesurer la variation de la température en utilisant des cartes électroniques : une carte d'acquisition "Arduino" et des capteurs de température "Adafruit", (Figure 23).

J'ai préféré garder cette méthode étant donné que je travaille avec Python, c'était plus pratique pour moi de rassembler tous les codes de traitement de données et d'enregistrement de température dans un seul fichier, au lieu d'utiliser l'application de contrôle de la CR1000.

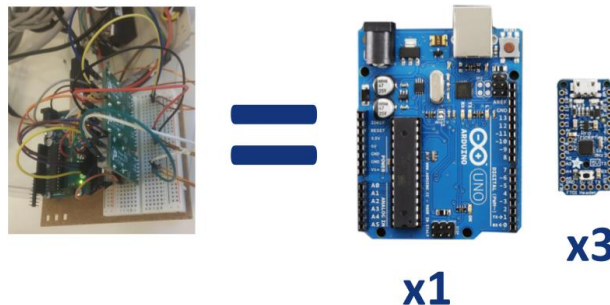


Figure 24 : Système d'enregistrement de température.

5.1.1.2. Stabilisation de la température

Après avoir révélé puis résolu le problème de la fluctuation de la température, les résultats montraient une amélioration remarquable de sa stabilisation (Figure 25) :

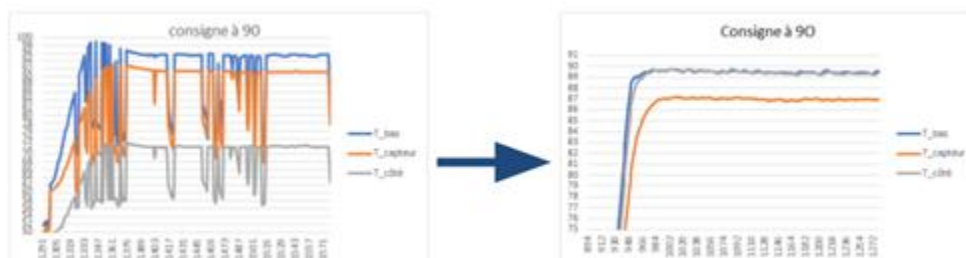


Figure 25 : Évolution de la température en fonction de temps.

5.1.2. Vérification de bon fonctionnement des thermocouples

Afin de vérifier le fonctionnement des thermocouples je les ai positionnés au même endroit (Figure 26) et j'ai comparé la valeur de température relevée par chaque thermocouple à la valeur de référence imposée par l'outillage N1200 (Figure 28)

Les résultats obtenus sont comme suit :

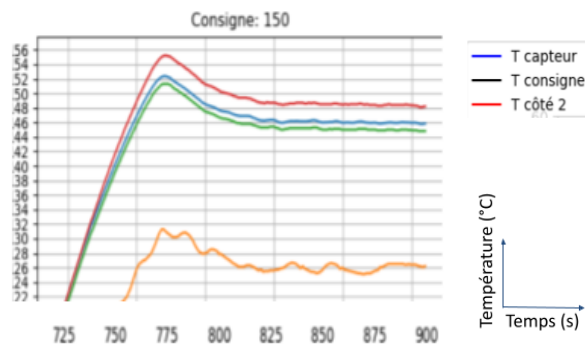


Figure 27 : Évolution de la température en fonction de temps.

Tous les thermocouples sont à cette endroit

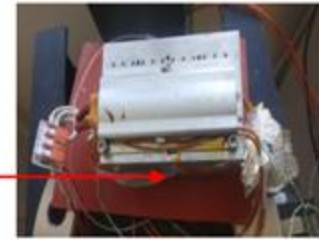


Figure 26 : Emplacement des thermocouples dans le système de chauffage.



Figure 28 : Régulateur de température : Config-N1200.

J'ai constaté que les thermocouples relèvent presque la même température sauf un (thermocouple 2) qui a un énorme décalage par rapport aux autres que j'ai donc remplacé.

Par la suite, j'ai utilisé ces thermocouples pour relever la température à différents endroits du système de chauffage. Les résultats étaient comme suit (Figure 30) :

La température n'est pas homogène partout sur le système de chauffage, cette différence n'a pas d'impact sur la production des CFOP, car il nous suffit d'avoir la température au niveau du capteur.

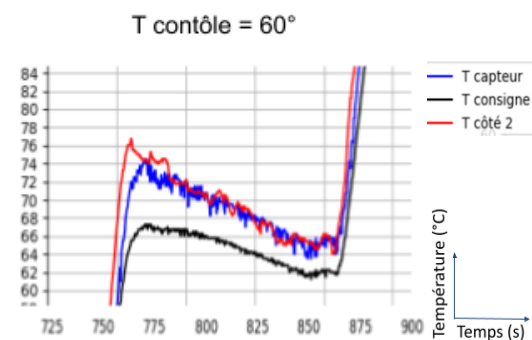


Figure 29 : Évolution de la température en fonction de temps.

5.2. Essais et mesures sur CFOP outillage

Le CFOP outillage est un capteur fonctionnel, étalonné et validé par Cementys, le but de ces essais est d'une part de me familiariser avec la méthode de la mise en pression et en température d'une façon différente de celle déjà appliquée et expliquée dans la partie 3.2.6, d'autre part, de valider le bon fonctionnement de ce capteur avec une autre méthode plus simple.

Pour cette partie, j'ai fait subir au capteur CFOP outillage, une montée rapide en pression puis en température.

5.2.1. Montée rapide en pression à température constante

J'ai effectué une montée rapide en pression jusqu'à 15 bars à une température constante. La manipulation se répète pour différentes températures allant de 30°C jusqu'à 180°C par pas de 30°C.

Pour une température de 90°C, les résultats sont :

$$T=90^{\circ}, P_{\max}=15 \text{ bar}$$

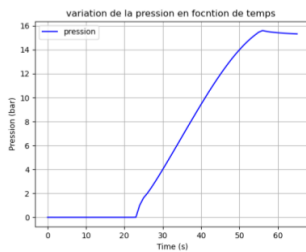


Figure 30 : Évolution de la température en fonction de temps.

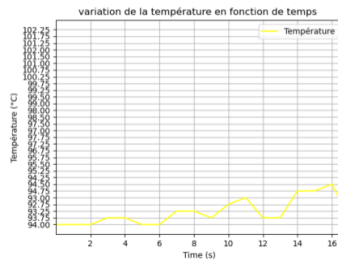
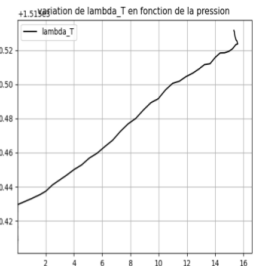


Figure 31 : Évolution de la pression en fonction de temps.



Figure 32 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps.



J'ai constaté que le déplacement en longueur augmente avec la pression, ce qui confirme le bon fonctionnement du capteur.

Théoriquement, plus on applique une contrainte sur le réseau de Bragg, plus la longueur d'onde de ce réseau se déplace vers les longueurs d'ondes plus élevées (Figure 32).

5.2.2. Montée rapide en température à pression constante

La seconde manipulation que j'ai faite est une montée en température jusqu'à 180°C à pression constante. La pression est prise au hasard mais comprise entre 0-15 bar.

Pour une pression de 3 bars, les résultats sont :

$$P=3 \text{ bar}, T_{N1200-\max}=150^{\circ} \quad T_{\text{capteur}}$$

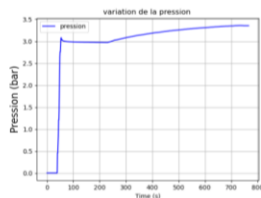


Figure 33 : Évolution de la température en fonction de temps.

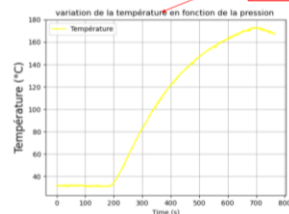


Figure 34 : Évolution de la pression en fonction de temps.

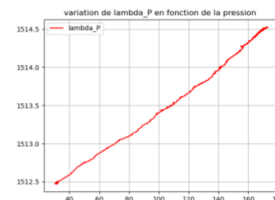


Figure 35 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps.



On obtient la même observation : une augmentation en déplacement en longueur d'onde en augmentant la température (Figure 35).

D'après ces résultats, je constate aussi que l'effet de dilatation thermique est plus important que l'effet thermo-optique démontré théoriquement dans la partie 2.1.1.1.

5.3. Mesures sur CFOP : Vérification de leurs étanchéités

5.3.1. Cycles de mise en température

Je fais subir aux capteurs trois cycles de température afin de vérifier leurs réponses en longueurs d'onde.

Les résultats sont bien les résultats attendus, le déplacement en longueur d'onde augmente en augmentant la température (Figure 38).

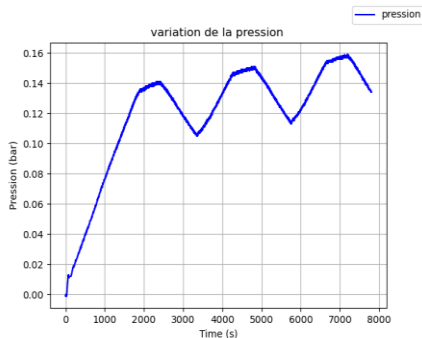


Figure 36 : Variation de la pression en fonction de temps.

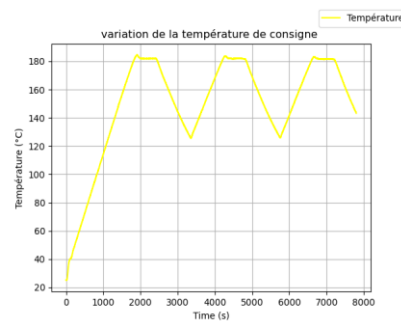


Figure 37 : Variation de la température en fonction de temps.

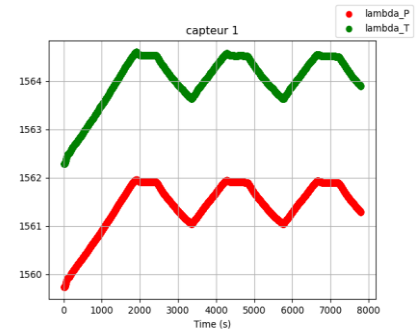


Figure 38 : Variation de la pression en fonction de temps.

5.3.2. Cycles de mise en pression

Après les cycles de température, je fais subir aux capteurs trois cycles de pression et je suis l'évolution en longueur d'onde.

Un capteur étanche donne les résultats ci-dessous (Figure 40) :

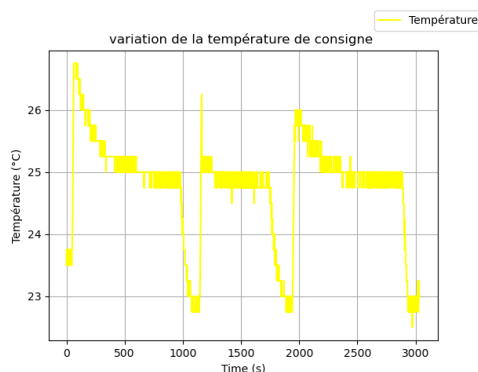


Figure 39 : Variation de la température en fonction de temps.

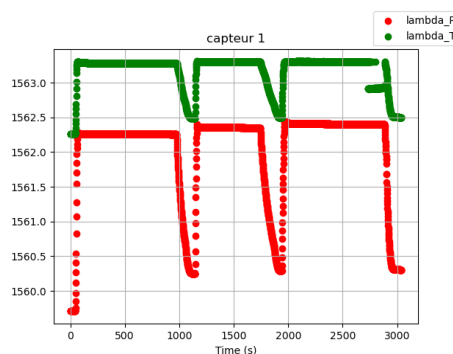


Figure 40 : : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps.

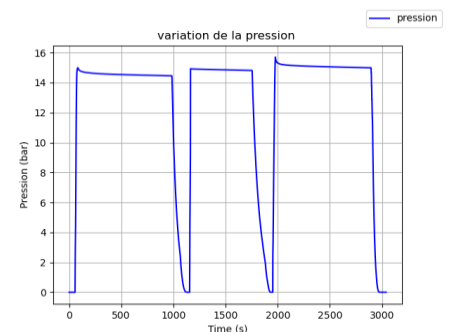
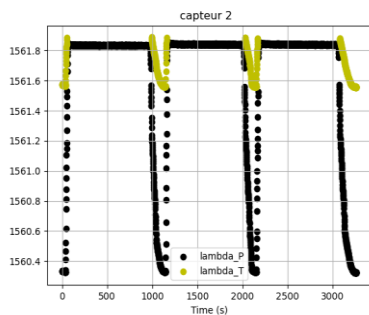


Figure 41 : Variation de la pression en fonction de temps.

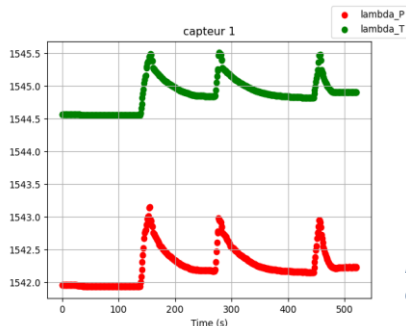
Durant cette étape j'ai rencontré plusieurs cas notamment :

- Capteur étanche : λ_P & λ_T qui suivent l'évolution de la pression et de la température (cas précédent)



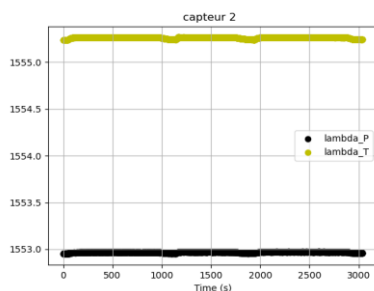
- Capteur non étanche : λ_T qui suit l'évolution de la pression mais λ_P qui est peu sensible à la pression (petites d'onde en fonction de temps).

Figure 42 : : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps.



- Capteur non étanche : λ_P & λ_T qui ne suit pas l'évolution de la pression (ne restent pas constant à haute pression).

Figure 43 : : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps.



- Capteur non étanche : λ_P & λ_T qui restent immobile en augmentant la pression.

Figure 44 : : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps.

5.3.3. Recherche des sources de non étanchéité des CFOP

D'après le bilan de la production (Figure 45), la majorité des capteurs ne sont pas étanches, et quelques fibres sont cassées à l'intérieur des capteurs (capteurs monovoie).

Afin de redonner l'étanchéité au capteurs non étanches, je dois étudier toutes les éventuelles fuites d'air qui peuvent exister dans le capteur :

- **Au niveau de microtube :**

Pour cette partie, j'ai tenté de tester plusieurs possibilités pour étanchéifier le capteur au niveau de microtube.



Figure 45 : Bilan de la production

→ J'ai réchauffé la première préforme, les résultats sont représentés dans la figure 46.

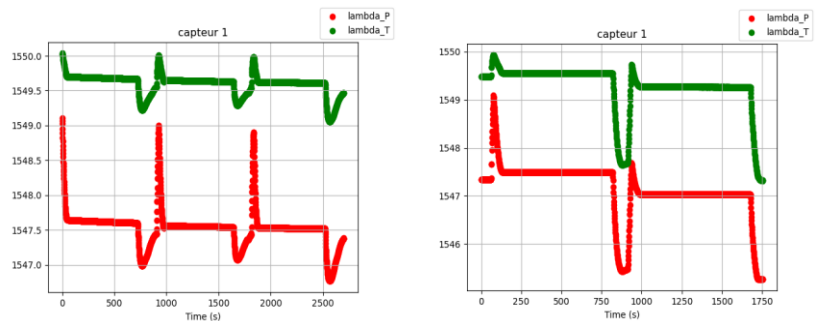


Figure 46 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps avant l'opération (à gauche) et après (à droite).

→ J'ai réchauffé la première préforme puis j'en ai rajouté une deuxième (Figure 47).

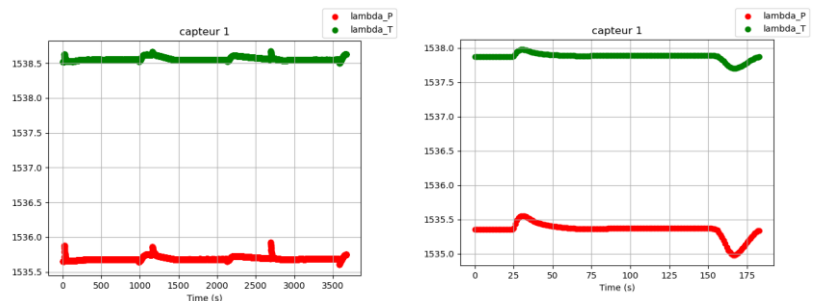


Figure 47 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps avant l'opération (à gauche) et après (à droite).

→ J'ai réchauffé la deuxième préforme et j'en ai rajouté une troisième (Figure 48).

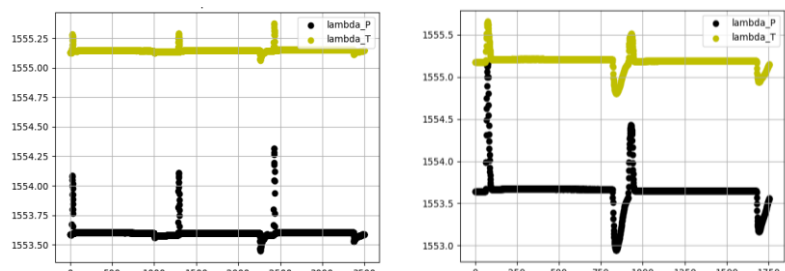


Figure 48 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps avant l'opération (à gauche) et après (à droite).

Après tous les essais effectués, je constate que la source de non étanchéité des capteurs n'est pas liée à la préforme mise au niveau de microtubo.

• Au niveau de la soudure S2 :

Une deuxième tentative est de vérifier que la fuite d'air ne provient pas de la 2ème soudure faite chez SAFEL (au faisceau laser puis au faisceau d'électron).



Figure 49 : Le capteur CFOP avec la colle Adhésif Araldite

Afin de vérifier cela, on a mis une colle Adhésif Araldite (Figure 50) qui est une colle particulièrement forte et qui sèche rapidement.

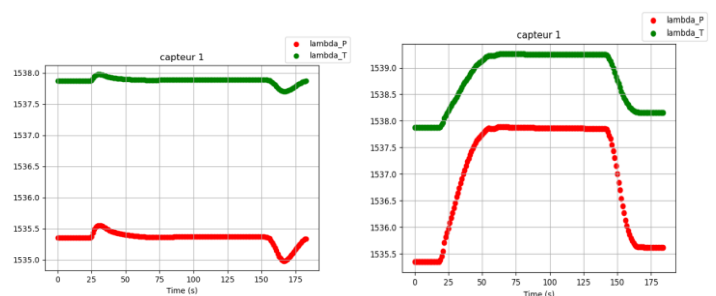


Figure 50 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps avant l'opération (à gauche) et après (à droite).

Après le test d'étanchéité, je constate que le capteur devient étanche (Figure 51).

○ Soudure à faisceau d'électron :

Dans le but de cerner plus précisément la source de non étanchéité, j'ai mis la colle Adhésif Araldite que sur la soudure à faisceau d'électron :



Figure 51 : Le capteur CFOP avec la colle Adhésif Araldite

Après les résultats (Figure 52), on constate que la fuite est localisée au niveau de la soudure à faisceau d'électron.

Une fois que la source de la non étanchéité des capteurs est bien définie, on doit trouver une solution afin de corriger le problème.

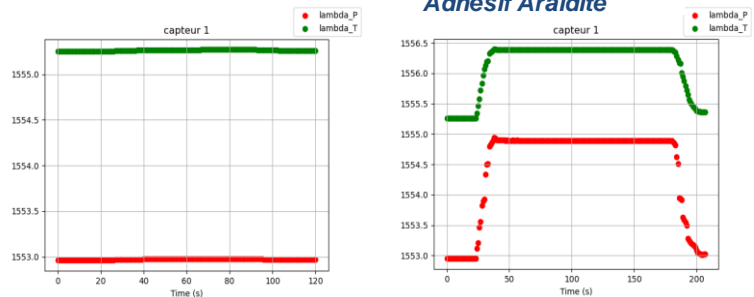


Figure 52 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps avant l'opération (à gauche) et après (à droite).

Il faut savoir que la colle Adhésif Araldite ne résiste pas à des températures supérieures à 100°C et que nous avons besoin de monter jusqu'à 180°C pour faire l'étalonnage, on a donc pensé à mettre de la colle P-adhésif (Figure 53) utilisée pour coller les Bragg.



Figure 53 : Le capteur CFOP avec la colle P-adhésif

Les résultats sont comme suit (Figure 54) :

Les résultats montrent que la colle P-adhésif tient bien sur le capteur et qu'il est étanche. Donc on pourra récupérer tous les capteurs non étanches de cette façon.

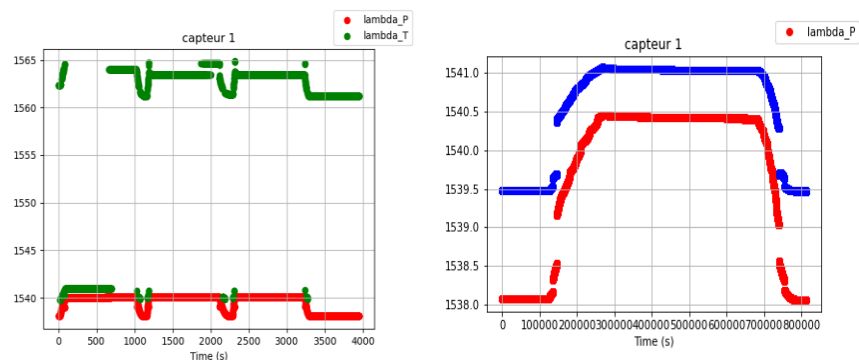


Figure 54 : Le déplacement en longueur d'onde en fonction de temps avant l'opération (à gauche) et après (à droite).

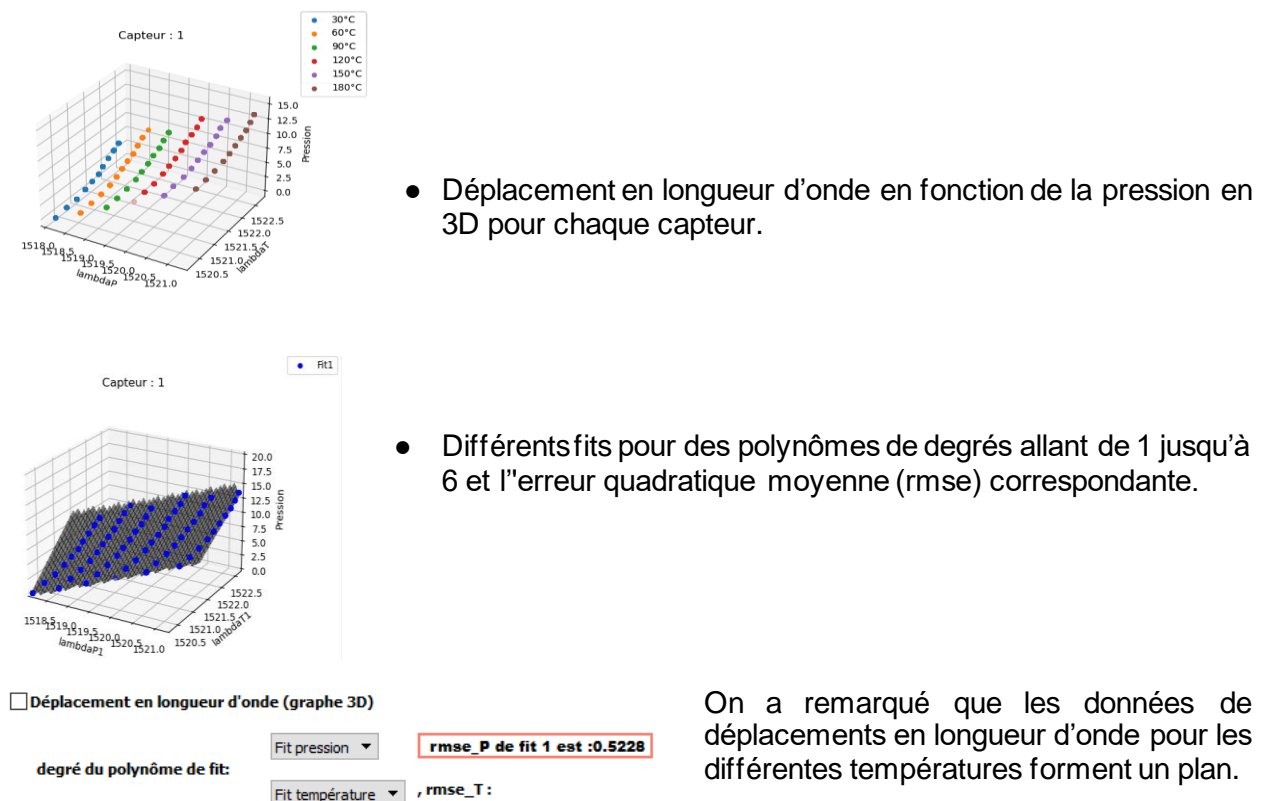
5.4. L'application d'étalonnage

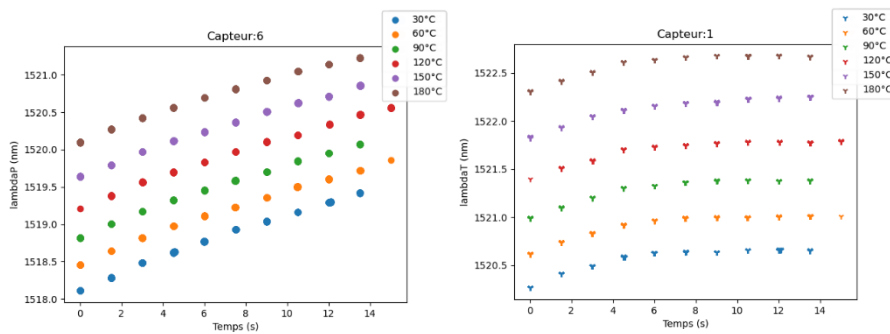
Afin que je puisse traiter les résultats d'étalonnage des CFOP, j'ai développé une application codée en python avec une interface graphique QT5 (Figure 54).



Figure 55 : L'application d'étalonnage.

Cette application permet de nous donner des informations par rapport au :





5.5. La gestion du projet

5.5.1. Le diagramme de Gantt

Durant les deux derniers mois de mon stage, j'ai été nommé responsable de la production des CFOP.

Afin d'organiser cette production et de planifier toutes ses étapes, j'ai créé un diagramme de Gantt où j'ai noté les différentes tâches que je dois effectuer, le nombre de personnes dont j'ai besoin pour m'aider et le temps que va me prendre chaque tâche.

En plus de la clarté de l'organisation que donne ce diagramme de Gantt, il sert à réconforter le client, il l'informe sur le bon avancement de projet et les détails de la production, et surtout il lui fournit la date prévue pour la fin de ce projet.

Production CFOP

29 juin 2021

Tâches

2

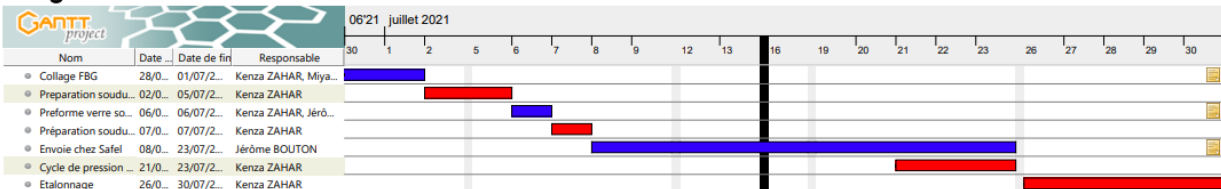
Nom	Date de début	Date de fin	Responsable
Collage FBG <i>Selon les disponibilités de Miyassa</i>	28/06/2021	01/07/2021	Kenza ZAHAR, Miyassa SALHI
Préparation soudure S1	02/07/2021	05/07/2021	Kenza ZAHAR
Preforme verre soudure <i>Selon les disponibilités de Jérôme</i>	06/07/2021	06/07/2021	Kenza ZAHAR, Jérôme BOUTON
Préparation soudure S2 (protection)	07/07/2021	07/07/2021	Kenza ZAHAR
Envoie chez Safel <i>Selon la durée de traitement de Safel</i>	08/07/2021	23/07/2021	Jérôme BOUTON
Cycle de pression et de température	21/07/2021	23/07/2021	Kenza ZAHAR
Etalonnage	26/07/2021	30/07/2021	Kenza ZAHAR

Production CFOP

29 juin 2021

Diagramme de Gantt

4



En parallèle avec ça, je donne des séances de formation à la personne qui doit m'aider, notamment sur les nouvelles méthodes de fabrication, l'utilisation de quelques outillages, et aussi les consignes de sécurité à mettre en place.

5.5.2. La matrice des risques

Pour un meilleur contrôle de projet, j'ai associé au diagramme de Gantt une matrice de risque.

Il s'agit d'un tableau regroupant tous les problèmes rencontrés au cours de ce projet, le degré de gravité des problèmes et un ensemble de solutions envisagées, et enfin, l'état d'avancement de résolution des problèmes.

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

Projet CFOP

Closée

Ouverte

Difficulté

Bloquante

na

Kenza ZAHAR

Date de mise à jour :12/8/2021

Num	Date reference	Intitulé	Responsable	Description	Causes	Conséquences	Criticité	Gravité	Traitement / Actions en réduction de risque	Closure
1		Anomalie	KZA	La température au niveau de capteur n'est pas accessible	Manque d'outillage	La température du capteur n'est pas définit	2	2	Vérification des thermocouples qui sont à l'intérieure de l'enceinte d'étalonnage Utilisation CR1000 Utilisation d'une carte Arduino	
2		Anomalie	KZA	Fluctuation de la température à l'intérieur de banc d'étalonnage	faux contact/problème de masse	Température non précise	2	2	Chercher le faux contact Mettre une masse commune pour tout les composant électronique Isoler les thermocouples	Closée
3		Amélioration	KZA	Méthode de collage des réseau de Bragg compliquée		Cassure des fibre FBG	1	1	Inventer une nouvelle méthode de collage des réseau de Bragg Négocier avec le fournisseur pour augmenter la qualité des FBG	Closée
4		Amélioration	KZA	Première soudure difficile à faire	Mauvaise maîtrise de temps de stabilité de la température	Capteur non étanche au niveau de microtubule	1	1	Inventer une nouvelle méthode de faire S1	Closée
5		Anomalie	KZA	Problème d'étanchéité des capteurs fabriqués	S1 ou S2	Capteur non étanche	1	1	Vérifier la fuite au niveau de microtubule/S2	Ouvert
6		Commande	KZA	Commande retardée des FBG		Production en attente	2	2	Accélérer la commande Trouver un fournisseur qui livre très rapidement Négocier le prix pour avoir le meilleur rapport prix/durée de livraison	Closée
7		Commande	KZA	Commande retardée des membrane		Production en attente	2	2	Accélérer la commande	Ouvert

6. Conclusion

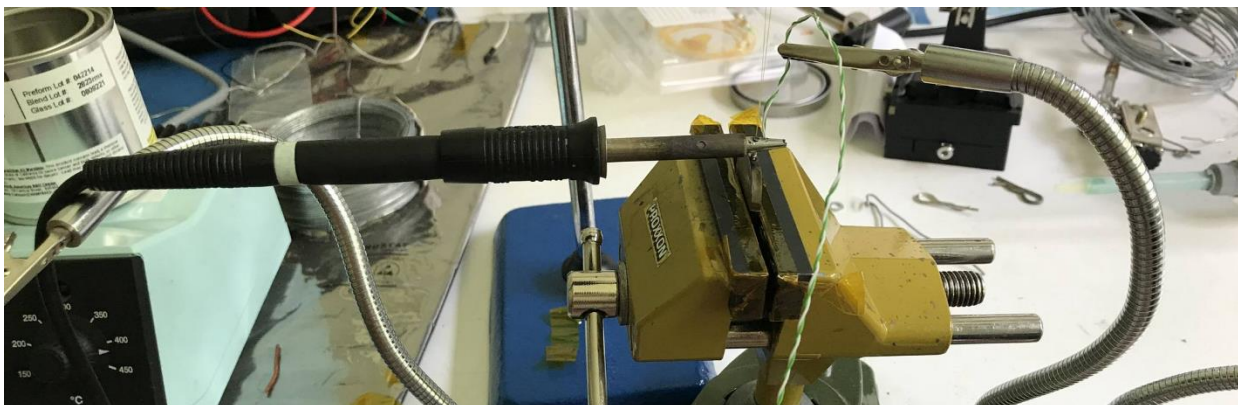
Mon stage chez Cementys était une expérience très enrichissante pour moi : dans un cadre de collaboration au sein d'une équipe pluridisciplinaire, j'ai pu apprendre à utiliser plusieurs nouveaux outillages (Additel 360 pour la mesure de pression, Config-N1200 pour le régularisateur de température, et la CR-1000 et le PicoLog pour la lecture et l'enregistrement de la température), j'ai également amélioré ma maîtrise d'autres outils comme l'Arduino et la programmation en Python.

Je suis intervenue dans plusieurs domaines : électronique, mécanique, informatique et optique.

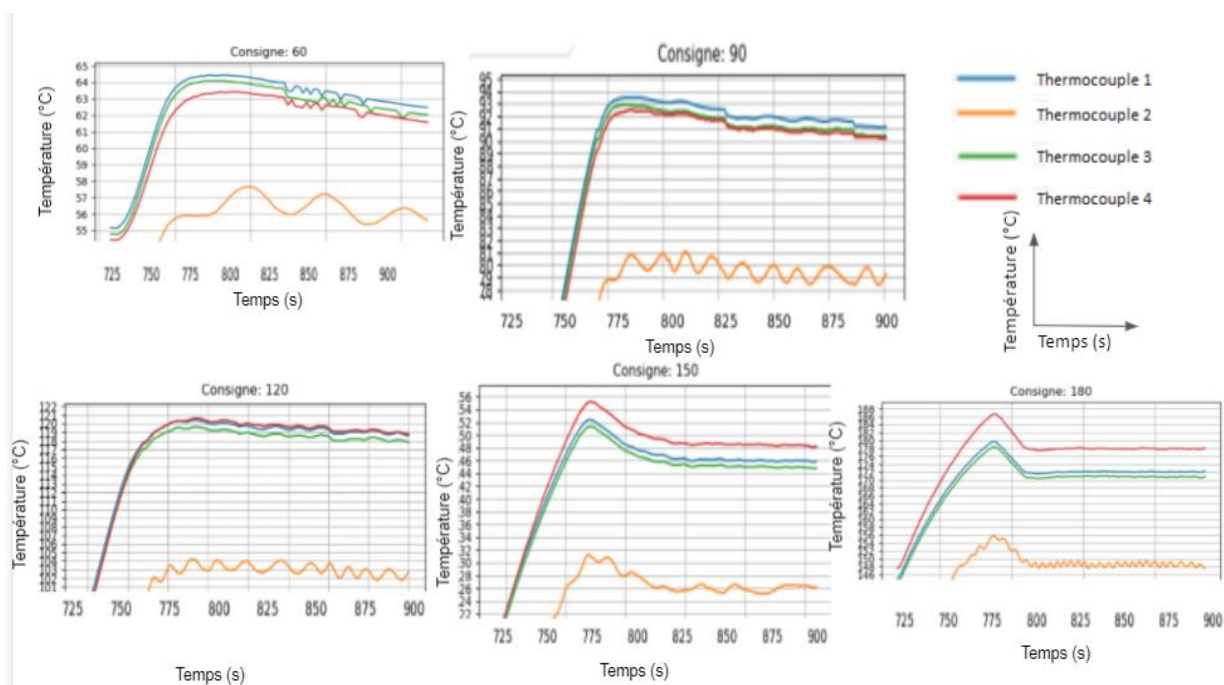
J'ai réussi à atteindre tous les objectifs de ce stage qui m'ont été fixés et en plus à en remplir d'autres notamment l'application codée en python, le travail sur les capteurs à Fabry Péro et la gestion de la production des CFOP.

La variation des tâches chez Cementys a valorisé mon profil polyvalent, dans le travail individuel comme en équipe j'ai appris à cerner les différentes difficultés rencontrées en allant chercher les solutions même en dehors de ma formation et de mes compétences premières, ce qui a permis d'accélérer et d'améliorer qualitativement certains procédés de l'entreprise. A ce titre, j'ai été nommé responsable de production 4 mois après le début de mon stage, ce qui m'encourage vivement à poursuivre au sein de cette entreprise ou alors dans une entreprise similaire si des opportunités existent.

7. Les annexes

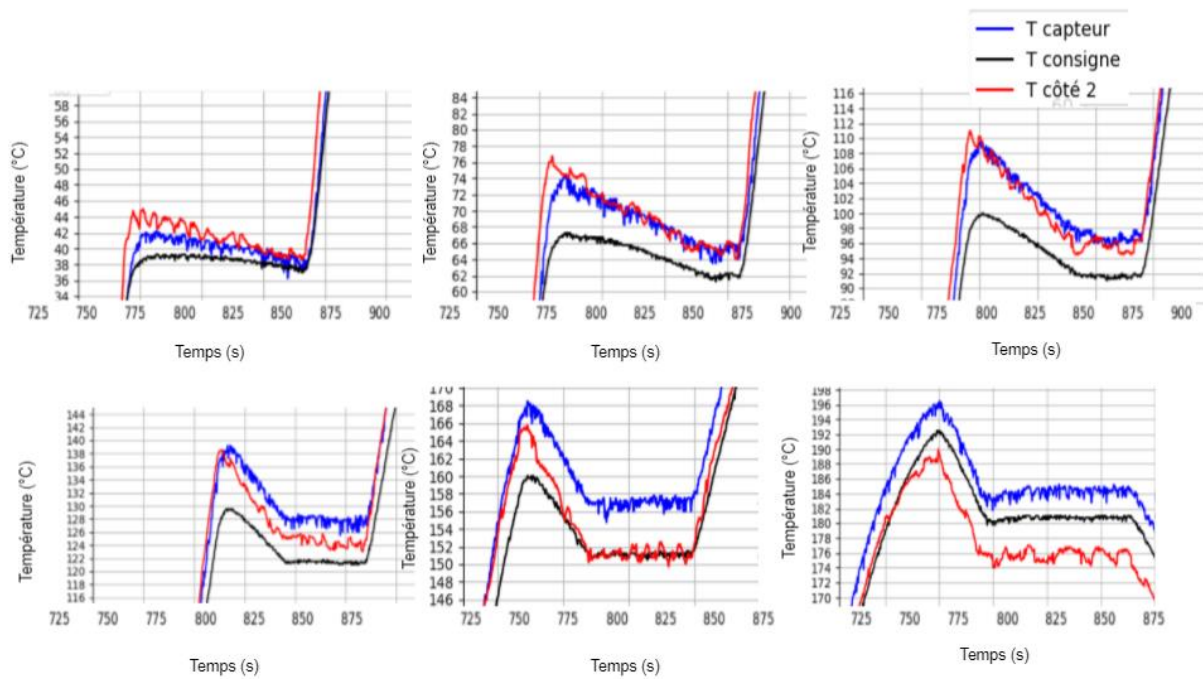


5.1.2. Vérification de bon fonctionnement des thermocouples : Thermocouples au même endroit :



Évolution de la température en fonction de temps.

Thermocouples aux différents endroits :



Évolution de la température en fonction de temps.

5.3.3. Recherche des sources de non étanchéité des CFOP :



Adhésif Araldite 50 ml



P-Adhésif

Projet CFOP

Cliée

na

Ouverte

Difficulté

Bloquante

High

Kenza ZAHAR

Date de mise à jour :

12/8/2021

Num	Date référence	Intitulé	Responsable	Description	Causes	Conséquences	Criticité	Gravité	Traitement / Actions en réduction de risque	Closure
1		Anomalie	KZA	La température au niveau de capteur n'est pas accessible	Manque d'outillage	La température du capteur n'est pas défini	2	2	Vérification des thermocouples qui sont à l'intérieur de l'enceinte d'étalonnage Utilisation CR1000 Utilisation d'une carte Arduino	
2		Anomalie	KZA	Fluctuation de la température à l'intérieur de banc d'étalonnage	faux contact / problème de masse	Température non précise	2	2	Chercher le faux contact Mettre une masse commune pour tout les composants électronique Isoler les thermocouples	Cliée
3		Amélioration	KZA	Méthode de collage des réseau de Bragg compliquée		Cassure des fibre FBG	1	1	Inventer une nouvelle méthode de collage des réseau de Bragg Négocier avec le fournisseur pour augmenter la qualité des FBG	Cliée
4		Amélioration	KZA	Première soudure difficile à faire	Mauvaise maîtrise de temps de stabilité de la température	Capteur non étanche au niveau de microtubule	1	1	Inventer une nouvelle méthode de faire S1	Cliée
5		Anomalie	KZA	Problème d'étanchéité des capteurs fabriqués	S1 ou S2	Capteur non étanche	1	1	Vérifier la tôle au niveau de microtubule/S2	Ouvr
6		Commande	KZA	Commande retardée des FBG		Production en attente	2	2	Accélérer la commande Trouver un fournisseur qui livre très rapidement Négocier le prix pour avoir le meilleur rapport prix/durée de livraison	Cliée
7		Commande	KZA	Commande retardée des membrane		Production en attente	2	2	Accélérer la commande	Ouvr