

MESURE DE LA TEMPERATURE PAR FIBRE OPTIQUE DANS LE DOMAINE DE LA GEOTHERMIE : RESOLUTION NUMERIQUE DE LA DIFFUSION DE RAMAN

Julien Rajomalahy, Vololomihaja Andriamifidisoa et Lala Andrianaivo

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Petroleum Engineering Department, Laboratoire Exergie et Géoingénierie, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar, julienrajomalahy@gmail.com

Résumé

La métrologie joue un rôle important dans le domaine de la géothermie. L'article ici présent a pour objectif de démontrer comment on mesure la température par fibre optique dans cette application ainsi que de déterminer quel type de fibre optique résisterait à l'environnement, difficile qu'est la profondeur du sous-sol. Ici le paramètre étudié est principalement la température. Dans notre cas, la mesure RDTs ou Raman Distributed Temperature Sensor nous a servi de méthode afin de déterminer la température captée par la fibre optique en profondeur. Nous avons étudié le cas de deux types de fibres qui se différencient physiquement par leurs revêtements, l'une équipée d'un revêtement en or, et l'autre, d'un revêtement polyimide, toutes les deux conditionnées dans la même gamme de température. Après simulation sous MATLAB, nous avons ainsi conclu que la fibre optique à revêtement or est celle qui résiste le plus à des températures allant jusqu'à 350°C voire même plus et donc la plus adéquate pour la mesure de température dans le domaine de la géothermie.

Mots clés : Acquisition de données/ Diffusion de Raman/ Densité optique/ Température /Mesure répartie

1. INTRODUCTION

1.1. Mesure de température par fibre optique

Développés depuis le début des années 70, les Capteurs à Fibre Optique (CFO) ont été rapidement imaginés pour de nombreuses applications, comme le gyroscope ou le microphone hydroacoustique. Il s'agissait principalement de capteurs utilisant le principe physique d'interférométrie laser. Depuis, les recherches sur les CFO ont permis le développement de différentes sous-catégories de capteurs, fonctionnant avec des principes physiques différents, pour répondre à des applications toujours plus variées (accélération, acoustique, contrainte, déplacement, niveau liquide ou encore température). Seuls les CFO de température seront abordés [1]. Actuellement, il existe deux grandes familles de capteur de température à fibres optiques :

- Les capteurs à fibre optique pour la mesure ponctuelle

Il existe deux catégories de CFO pour la mesure de température ponctuelle : les réseaux de Bragg et les capteurs interférométriques. Les capteurs ponctuels sont intéressants pour mesurer précisément un ou plusieurs points de mesure d'intérêt de position connue [2].

- Les capteurs à fibre optique pour la mesure répartie

La mesure de température répartie par CFO, abrégée DTS, utilise le principe de l'OTDR. Lorsque qu'une impulsion laser de longueur d'onde λ_0 se propage dans une fibre optique à cœur silice, une infime partie de la lumière guidée est diffusée lors de l'interaction avec les molécules de silice qui composent le cœur de la fibre. Une infime partie de lumière diffusée est rétrodiffusée le long de la fibre optique grâce aux propriétés de guidage de la fibre (Figure 1) [3].

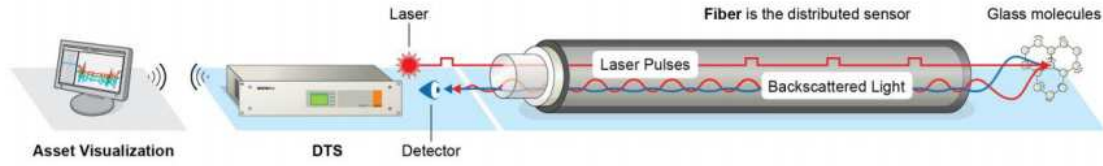


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la mesure répartie de la température

1.2. Fonctionnement

Une fois la ligne de fibre optique installée, celle-ci peut être sondée au moyen d'une courte impulsion de lumière laser. Cette impulsion, d'une durée de 10 nanosecondes ou moins, parcourt la fibre. En même temps, la lumière entre en collision avec la structure du réseau et les atomes de la fibre, les faisant émettre de petites rafales de lumière à des fréquences légèrement décalées qui remontent au début de la ligne à fibre optique. Le retour de la lumière rétrodiffusée est ensuite analysé par la boîte d'instrumentation pour déterminer la température au point d'origine de la rétrodiffusion. Etant donné que la vitesse de la lumière est constante, même dans une fibre, le temps de parcours dans les deux sens entre le lancement de l'impulsion lumineuse et le retour de la lumière rétrodiffusée détermine la position de la température enregistrée le long de la fibre. La surveillance continue de cette lumière rétrodiffusée permet de construire un profil de température continu le long de la fibre.

Il existe trois sortes de spectres rétrodiffusés : la rétrodiffusion Raman, Rayleigh et Brillouin. Cependant le signal Raman est le signal utilisé pour évaluer la température. Il est suffisamment fort et présente une dépendance à la température contrairement à la rétrodiffusion Rayleigh et Brillouin.

2. MODELISATION ET SIMULATION

2.1. Diffusion Raman

La diffusion Raman spontanée est liée à l'interaction de la lumière incidente guidée avec les molécules de silice dopée qui composent la fibre. En fonction de la température de l'environnement dans laquelle la fibre est positionnée, l'agitation moléculaire de la silice varie selon la répartition des niveaux d'énergie définis par la loi de Maxwell-Boltzmann. Une infime partie de la lumière rayonnée (approximativement 1 photon sur 1 million) est diffusée suite à l'interaction avec une molécule de silice dopée. Cette lumière possède alors une énergie plus grande ou plus petite. La longueur d'onde est respectivement plus petite ($\lambda_{\alpha S}$ anti-stokes) ou plus grande (λ_S Stokes) que la lumière incidente selon la relation $E = \frac{hc}{\lambda}$ avec h la constante de Planck. L'intensité des raies Stokes et anti-Stokes rétrodiffusées est principalement liée à la distribution de molécules à l'état fondamental ou excité, et donc à la température. Le ratio des intensités Stokes λ_S et anti-Stokes $\lambda_{\alpha S}$ permet de calculer la température absolue T (°K) le long de la fibre optique selon la relation :

$$\frac{I_{\alpha S}}{I_S} = \left(\frac{K_S}{K_{\alpha S}} \right)^4 \exp \left(- \frac{hc\tilde{\nu}}{K_B T} \right) \quad (1)$$

Où $\tilde{\nu}$ est le nombre d'onde de décalage Raman dans le matériau (440 cm^{-1} dans la silice, Stolen et Walrafen) et K_B la constante de Boltzmann.

L'équation montre que $I_{\alpha S}$ est uniquement sensible à la température. De plus, le ratio $I_{\alpha S}$ permet d'éliminer l'influence de nombreux paramètres impactant la fonction de transfert de l'instrument de mesure (variabilité de la puissance laser source, de la sensibilité de la photodiode, des amplificateurs). En revanche, il est nécessaire de prendre en compte l'impact de la différence d'atténuation des longueurs d'ondes λ_S et $\lambda_{\alpha S}$ (espacées de 100 nm) dans l'équation (1) (pour corriger la dérive qu'entraîne la longueur cumulée de fibre). Plusieurs méthodes de calibration sont possibles : intégration de l'atténuation constante, recalage des signaux avec des sondes ponctuelles positionnées sur la fibre et moyenne des signaux selon deux mesures contra-propagatrices par chaque extrémité de la fibre. L'obtention de résolutions spatiales (≈ 0.25 à 17 m) et de température (< 1 °C) sont possibles pour une distance d'interrogation potentiellement élevée (1 à 37 km).

Il existe deux types de diffusion Raman, la diffusion Raman spontanée dans un milieu homogène et la diffusion Raman Spontanée dans une fibre mais nous verrons uniquement la diffusion Raman spontanée dans une fibre optique.

2.2. Diffusion Raman dans une fibre optique

Dans le cas d'une fibre optique, la lumière incidente prend généralement la forme d'une impulsion laser monochromatique. L'angle critique β_C est l'angle maximum pour lequel la diffusion Raman est rétrodiffusée le long de la fibre optique multi mode à saut d'indice [4].

$$\beta_C = \arccos\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \approx \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} = \frac{ON}{n_1} \quad (2)$$

De même φ_C pour une fibre de révolution circulaire :

$$\varphi_C = \sqrt{2 \frac{\beta_C^2 - \beta^2}{2 - \beta^2}} \quad (3)$$

Ceci permet d'obtenir $P_{S,mol}$ la puissance Stokes rayonnée selon les contraintes de guidage optique d'une fibre saut d'indice multi mode :

$$P_{S,mol} \cong I_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} \left(\frac{\pi}{2}, \omega_{s0} \right) \quad (4)$$

Dans un volume de cœur de fibre à saut d'indice Adz , il y a $NAdz$ molécules de silice dopée. Les puissances Stokes et anti-Stokes rétrodiffusées $\Delta P_{S,step}$ et $\Delta P_{\alpha S,step}$ valent donc :

$$\begin{aligned} \Delta P_{S,step} &= p_S \Gamma_{S,step} P_0 \Delta z \\ \Delta P_{\alpha S,step} &= p_{\alpha S} \Gamma_{\alpha S,step} P_0 \Delta z \end{aligned} \quad (5)$$

Où les coefficients de capture Stokes $\Gamma_{S,step}$ et anti-Stokes $\Gamma_{\alpha S,step}$ valent respectivement :

$$P_0 = I_0 A \quad (6)$$

Pour les fibres à gradient d'indice, les coefficients de capture Stokes $\Gamma_{S,step}$ et antiStokes $\Gamma_{aS,step}$ doivent être convoqués par la distribution radiale de dopants [4]. Chaque élément chimique possède une section efficace différentielle Raman propre.

Par simplification, les indices *stepet gradne* sont plus distingués dans la suite des équations car un ratio $\frac{\Gamma_{S,step}}{\Gamma_{aS,step}}$ sera appliqué.

\wp_S et \wp_{aS} sont les probabilités de distribution Stokes et anti-Stokes des phonons de Bose-Einstein définies par :

$$\wp_S = \frac{1}{1 - \exp(-\Delta E/k_B T)}$$

$$\wp_{aS} = \frac{\exp(-\Delta E/k_B T)}{1 - \exp(-\Delta E/k_B T)} \quad (7)$$

Où ΔE est la différence entre l'énergie de la lumière incidente E_0 et la lumière Raman diffusée E_e . Les équations peuvent être intégrées en puissances rétrodiffusées le long de la fibre P_S et P_{aS} en fonction d'un pas Δz [6] tout en prenant en compte la loi de Beer-Lambert définie par l'équation :

$$P_S(z) = \wp_S p_S \Gamma_S \hat{p}_0 \exp(-\alpha_0 z)$$

$$P_{aS}(z) = \wp_{aS} p_{aS} \Gamma_{aS} \hat{p}_0 \exp(-\alpha_0 z) \quad (8)$$

où \hat{p}_0 et α_0 sont respectivement la puissance laser source et son atténuation. Après l'interaction Raman, la puissance mesurée par la photodiode à $z = 0$ vaut :

$$P_S(z) = \wp_S p_S \Gamma_S \hat{p}_0 \exp(-\alpha_0 z) (-\alpha_S z)$$

$$P_{aS}(z) = \wp_{aS} p_{aS} \Gamma_{aS} \hat{p}_0 \exp(-\alpha_0 z) (-\alpha_{aS} z) \quad (9)$$

Où α_S et α_{aS} sont respectivement les atténuations des longueurs d'onde Stokes et anti-Stokes.

Le ratio $\frac{P_{aS}(z)}{P_S(z)}$ vaut alors :

$$\frac{P_{aS}(z)}{P_S(z)} = \frac{\wp_{aS} \Gamma_{aS} \exp(\alpha_{aS} z)}{\wp_S \Gamma_S \exp(\alpha_S z)} \quad (10)$$

Ou $\frac{\Gamma_{aS}}{\Gamma_S} \approx \left(\frac{\lambda_{aS}}{\lambda_S}\right)^4$.

2.3. Simulation du système : Résolution numérique

Avant toute intervention, il est nécessaire de faire une modélisation mathématique afin de simuler les résultats pouvant être obtenus. Ainsi, l'équation (10) peut être simplifiée sous la forme :

$$\frac{P_{aS}(z)}{P_S(z)} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{K_B T}\right) \left(\frac{\lambda_{aS}}{\lambda_S}\right)^4 \exp(-\Delta\alpha z) \quad (11)$$

Où $\Delta\alpha z = \alpha_{aS} - \alpha_S$ est le coefficient d'atténuation différentielle entre les signaux anti-Stokes et Stokes. Il est alors possible de réarranger l'équation (11) pour calculer la température T, tout en ajoutant le ratio $\frac{R_{aS}}{R_S}$ qui définit la sensibilité relative de la photodiode du DTS aux signaux Stokes et anti-Stokes:

$$T\left(z, \frac{P_S}{P_{aS}}\right) = \frac{\frac{\Delta E}{K_B}}{\ln\frac{P_S}{P_{aS}} + \ln\frac{R_{aS}}{R_S} + \ln\left[\left(\frac{\lambda_{aS}}{\lambda_S}\right)^4\right] - \Delta\alpha z} \quad (12)$$

où P_S et P_{aS} correspondent aux puissances mesurées par la photodiode du DTS ΔE , R_S et R_{aS} sont fonction de l'instrument de mesure (la longueur d'onde de travail et la sensibilité de l'instrumentation). Ces valeurs peuvent être modifiées par la température, l'humidité et les variations des amplificateurs ou de l'alimentation de l'appareil. En fonction des caractéristiques physico-chimiques du CFO, $\Delta\alpha z$ est aussi affectée par ces facteurs, en plus de l'irradiation. Enfin, l'équation (12) est simplifiée sous la forme suivante pour simplifier le calibrage des données brutes mesurées :

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln\frac{P_S}{P_{aS}} + C - \Delta\alpha z} \quad (13)$$

Où $\gamma = \frac{\Delta E}{K_B}$ et $C = \ln\frac{R_{aS}}{R_S} + \ln\left[\left(\frac{\lambda_{aS}}{\lambda_S}\right)^4\right]$ un terme sans dimension.

La démarche de résolution est synthétisée par l'organigramme de résolution suivant (figure 2):

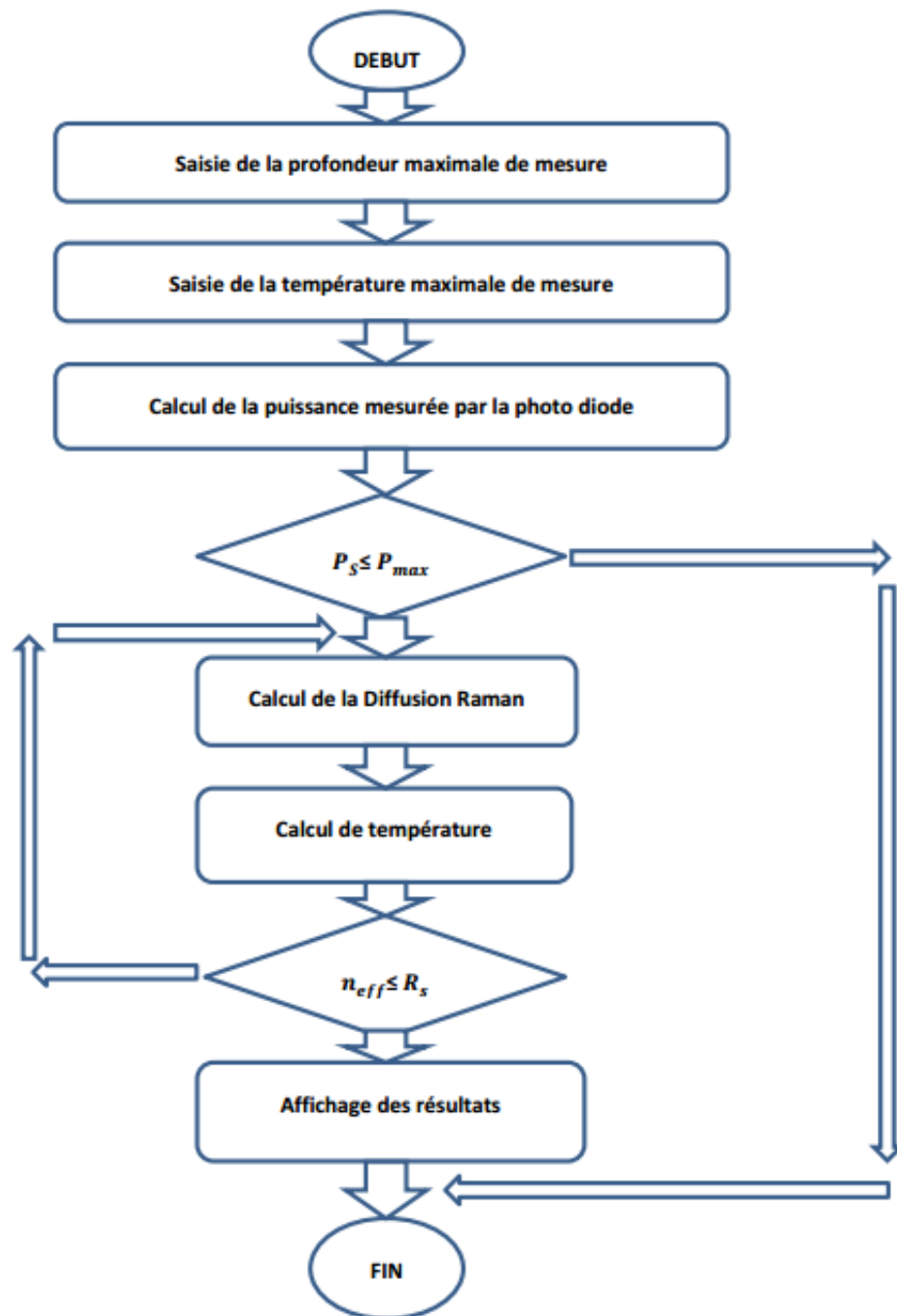


Figure 2 : Organigramme de résolution

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1. Tenue d'une fibre à revêtement polyimide à haute température

Ceci est une étude sur la réponse du RDTS pour des températures supérieures à 300°C avec des fibres à revêtement polyimide. La figure 3 représente le calcul de température géothermale le long de la fibre en haut, depuis les signaux Stokes et anti-Stokes en bas.

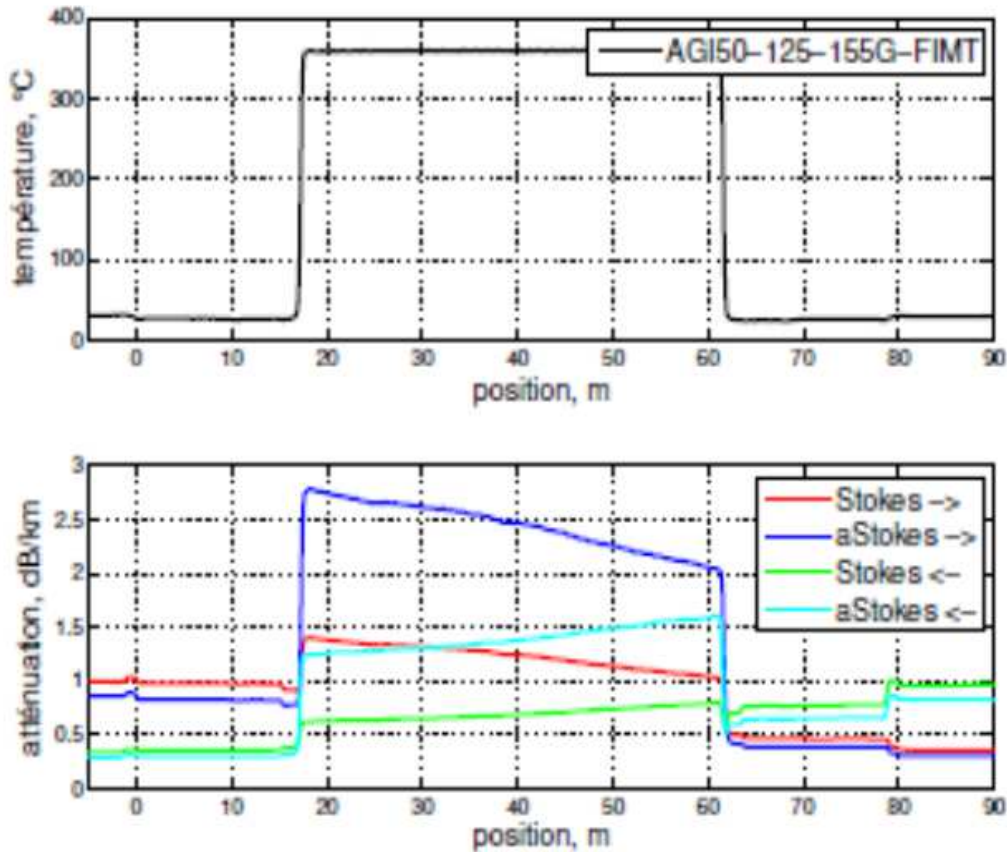


Figure 3 : Calcul de température (haut), depuis les signaux stokes et anti-stokes (bas)

Sur la figure 3, pour la fibre à revêtement polyimide, les signaux Stokes et anti-Stokes ont été normalisés par la valeur Stokes en sortie de RDTS dans chaque sens de lecture afin de compenser les variations de puissances collectées au cours du temps par le RDTS. Bien que d'éventuels facteurs de pondération sur les signaux Stokes et anti-Stokes mesurés par la photodiode ne soient pas pris en compte, il est tout de même possible d'observer grâce aux variations relatives que :

- Sur les portions de fibre où la température est ambiante, le signal anti-Stokes est inférieur au signal Stokes, alors que cette tendance s'inverse sur la partie chauffée à 350 °C ;
- Le signal Stokes n'est pas insensible à la forte augmentation de température.

3.2. Tenue de la fibre optique à revêtement or à haute température

Dans ce deuxième essai, sur les figures 4 et 5 présentent la tenue de la fibre optique à revêtement or à la haute température (jusqu'à 350°C) pour un fluide géothermal.

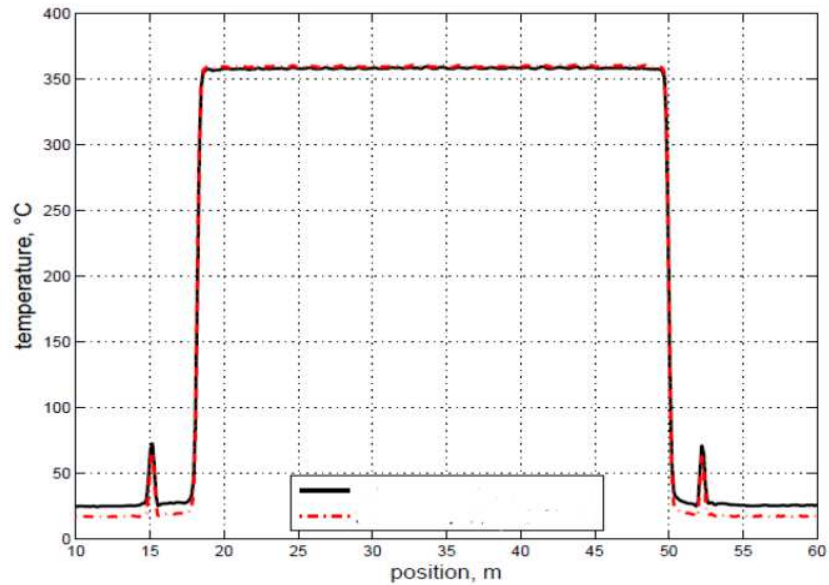


Figure 4 : Essai de tenue en température d'une fibre AFS50-125-155G FIMT à revêtement or

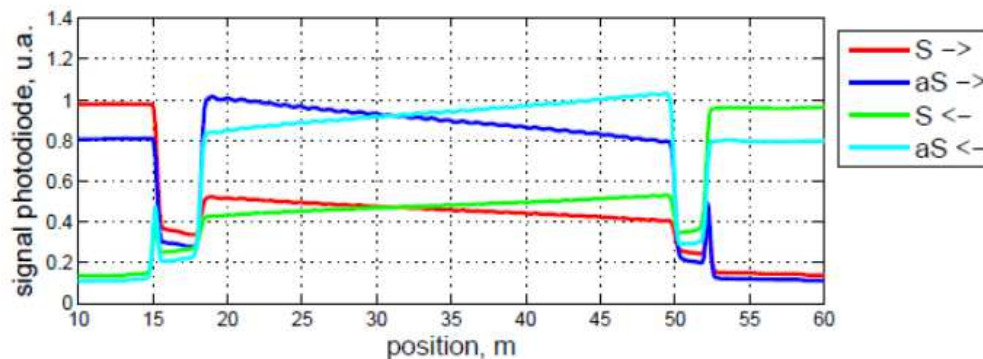


Figure 5 : Données brutes Stokes et anti-Stokes normalisées

La figure 4 montre clairement que la fibre optique à revêtement or résiste à des températures allant jusqu'à 350°C pendant plusieurs mois. Son type de revêtement a parfaitement protégé la fibre sans variation notable de comportement mécanique ou de transmission optique. Les deux pics de température à 15 et 52 m ne sont pas thermiques mais optiques. Les données brutes Stokes et anti-Stokes normalisées sur la figure 05 permettent d'observer que le pic de réflexion n'apparaît que lorsque la lumière traverse une interface CFOcâble de départ à travers un connecteur.

4. DISCUSSION

Comme discussion, on s'intéresse à la comparaison entre la fibre optique à revêtement polyimide et la fibre optique à revêtement or par rapport à leur tenue en haute température. Le test a été effectué durant la même période ainsi que dans la même gamme de températures.

- Cas de la fibre à revêtement polyimide

Après observation des résultats obtenus, on remarque qu'en plus du fait, ce type de revêtement ne permet pas à la fibre de résister à des températures hydrothermales dépassant les 350 °C, il est aussi impossible pour ce type de fibre de tenir plus de quelques semaines en cette température. Cependant, la fibre à revêtement polyimide a une faible atténuation par rapport aux fibres à revêtements métalliques comme ceux à revêtement aluminium.

- Cas de la fibre à revêtement or

Pour le cas du CFO à revêtement or, on observe que l'atténuation minimale dans la gamme de température allant de 300°C et plus, ce qui est optimal pour réaliser des mesures de température à 350 °C. De plus, selon une étude, les performances des fibres à revêtement aluminium, cuivre et or ont été évaluées : les fibres or ont été retenues car leur atténuation est la moins élevée (de l'ordre de 10 à 15 $dBkm^{-1}$) pour une résistance à des températures plus élevées, sachant que d'une façon générale : plus la température augmente et plus l'atténuation de la fibre métallique diminue. Ce phénomène peut être expliqué par un relâchement de contraintes induites par l'or sur la fibre lorsque la température dépasse les [200 °C].

5. CONCLUSION

Le RDTS a la performance métrologique adéquate pour la mesure de température par fibre optique dans les zones à hautes températures. De plus, il s'agit de la seule mesure de température par fibre optique répartie uniquement, sensible à la température ce qui simplifie l'interprétation des mesures sur des fibres optiques dont la contrainte induite varie avec la température. L'utilisation d'un RDTS multi mode à haute résolution spatiale, capable de réaliser des mesures en double-ended, est un compromis intéressant entre l'exactitude de la mesure de température, le nombre de points de mesure, la résolution spatiale et la résolution en température. Concernant le type de fibre optique retenu pour ce type d'application, c'est-à-dire, qui peut résister à des températures allant jusqu'à 350 °C, et cela pour une longue période. On a opté pour la fibre optique à revêtement or, non seulement car ce type de fibre est quasiment la seule qui peut supporter des températures très élevées mais également pour son faible atténuation.

BIBLIOGRAPHIE

[4] Farahani M. A. et Gogolla T., 1999, : « Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing. », *Journal of Lightwave Technology*, Volume 17, Issue 8, 1379-1391

[6] Hausner M. B., Suarez F., Glander K. E., Giesen N. v. d., Selker J. S. et Tyler S. W., 2011, « Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data », *Sensor*, Volume 11, Issue 11, 10859-10879

WEBOGRAPHIE

[1] Ferdinand P., Juin 1992, *Capteurs à fibres optiques et réseaux associés*, consulté le 15 juin 2019, source : <https://www.lavoisier.fr/livre/physique/capteurs-a-fibres-optiques-et-reseaux-associes/ferdinand/descriptif-9782852067813>

[2] Slideplayer, Les mesures basées sur la fibre optique, consulté le 15 mai 2019, source : <https://slideplayer.fr/slide/1176955/>

[3] Lecomte P., 11 avril 2017, Mesure haute température en environnement irradié par fibre optique utilisant l'effet Raman, Thèse de Doctorat - Université de Perpignan, consulté le 9 avril 2019, source : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01973289/>

[5] Silixa sense the difference, 9 Novembre 2016, « Ultima™ DTS - Distributed temperature sensor » consulté le 15 mai 2019, Source : <http://silixa.com/technology/ultima-dts/>