

Séparation de sources pour l'estimation de la déformation mesurée par capteur à fibre optique

EDOUARD BUCHOUD¹, VALERIU VRABIE², MARINE CAMPS³, JEROME I. MARS³, GUY D'URSO¹, ALEXANDRE GIRARD¹, SYLVAIN BLAIRON¹, JEAN-MARIE HENAULT¹

¹ EDF R&D

6 quai Watier, 78400 Chatou, France

² CRESTIC

Moulin de la Housse, 51867 Reims

³ GIPSA-Lab,

Univ. Grenoble Alpes, GIPSA-Lab, F-38000 Grenoble, France

¹edouard.buchoud@edf.fr, guy.durso@edf.fr, alexandre.girard@edf.fr, sylvain.blairon@edf.fr, jean-marie.henault@edf.fr

²valeriu.vrabie@univ-reims.fr,

³marine.camps@ense3.grenoble-inp.fr, jerome.mars@gipsa-lab.grenoble-inp.fr,

Résumé – La surveillance d'un ouvrage est une problématique importante pour augmenter sa durée de vie tout en garantissant sa stabilité. Un moyen efficace pour la surveillance de grands ouvrages linéaires est le capteur à fibre optique par effet Brillouin qui fournit une mesure de la déformation sur plusieurs dizaines de kilomètres de manière répartie avec un pas de mesure de 40 cm. Cette mesure est sensible à la déformation de la fibre optique mais également aux variations de température. Pour interpréter le signal fourni par un tel capteur il est alors nécessaire de séparer l'influence de l'effet de la température de la mesure de déformation. Sachant que dans une structure géotechnique des déformations thermiques apparaissent à cause de la dilatation du matériau, l'objectif est d'estimer les variations de la déformation athermique. Nous proposons alors une méthodologie de séparation de source basée sur le filtre de Wiener. En prenant en compte des informations a priori liées à la température dans la fibre optique mais également à la température extérieure à l'ouvrage, elle permet d'estimer la déformation irréversible dans l'ouvrage. Elle a été testée sur des données acquises sur une digue en terre, et l'influence de la mesure des sources est discutée.

Abstract – Structural Health Monitoring is an important issue to increase the exploitation age of a structure as well as its structure. An efficient sensor to measure the strain is the optical fiber sensor, which provides a measure into the optical fiber with a 40cm spatial resolution. This measurement is sensitive to the strain but also to the temperature into the optical fiber. To interpret the strain signal, the influence of the variations of temperature has to be corrected from the given measurement. Knowing that in a geotechnical structure some reversible strain variations appear because of the dilatation of the material, the goal is the estimation of the irreversible strain into a geotechnical structure. We propose a separation source methodology based on the Wiener filter. Taking into account prior temperature measurements, this methodology enables to estimate the irreversible strain into the structure. It has been tested on data acquired into a dyke, and the influence on the sources measurement is discussed.

1 Introduction

Afin de garantir la sécurité et une durée de vie plus importante, EDF souhaite optimiser la surveillance de ses ouvrages hydro-électriques. Une solution satisfaisante économiquement est l'utilisation d'un capteur à fibre optique permettant de fournir des mesures réparties sur plusieurs dizaines de kilomètres. Cette approche consiste à positionner dans la structure un câble à fibre optique, relié à un interrogateur. Selon le type de technologie de celui-ci, on peut mesurer la température – utilisant le phénomène de diffusion Raman – ou la déformation – utilisant le phénomène de diffusion Brillouin. Plusieurs travaux ont permis l'interprétation des mesures de température pour la détection et localisation automatique de fuite dans les digues [1]. Dans la continuité, l'interprétation des mesures de déformation devrait permettre de détecter,

localiser et quantifier des déplacements dans des structures géotechniques [2].

Il est alors nécessaire de comprendre les grandeurs physiques influençant la mesure brute d'un interrogateur Brillouin. Celui-ci fournit une déformation apparente sensible à la déformation dans la fibre optique, mais également à la température. Les sources d'origine thermique liées aux phénomènes de diffusion de la température et de dilatation d'un matériau peuvent altérer le signal utile. La problématique est alors d'en extraire que l'information utile : la déformation athermique dans la structure.

Nous proposons une méthodologie permettant de séparer les sources thermiques de la déformation athermique de la structure. La première étape est la correction des événements thermiques internes, comme l'apparition de fuites. Celle-ci nécessite la mesure de la température dans la fibre optique par un interrogateur

Raman. La deuxième étape consiste à déterminer la proportion d'information liée à la dilatation thermique contenue dans la déformation apparente grâce au filtre de Wiener.

Cette méthode est appliquée sur des mesures de déformation acquises par un capteur à fibre optique installé au sein d'un canal en terre. Une discussion est proposée sur l'influence de la mesure de la température sur l'estimation de la déformation athermique.

2 Mesures de déformation par capteur fibre optique

2.1 Calcul de la déformation apparente

Un capteur à fibre optique se compose de deux parties : un appareil optoélectronique, appelé aussi interrogateur, et un câble à fibre optique. Le premier envoie une impulsion lumineuse monochromatique dans la fibre optique et analyse une partie de la lumière rétrodiffusée. Il est possible de localiser l'endroit, noté z , où la lumière a interagi avec la silice de la fibre optique grâce au temps de propagation de la lumière dans le matériau. Cette mesure est répétée avec un pas de décalage Δz , le pas de mesure associé à l'interrogateur. Pour une longueur L de câble à fibre optique, le nombre d'acquisitions sera $N_d=L/\Delta z$. Pour chaque z , l'appareil fournit une fréquence Brillouin, notée ν_B , qui dépend de la déformation et la température. Le profil de déformation relatif $\varepsilon_{FO}(z, t)$ dans la fibre optique entre deux instants t et t_0 (instant de référence) est défini en fonction de la fréquence Brillouin relative $\Delta \nu_B^{FO}$ et de la température relative dans la fibre optique ΔT_{FO} :

$$\Delta \nu_B^{FO}(z, t) = C_T^{FO} \cdot \Delta T_{FO}(z, t) + C_\varepsilon^{FO} \cdot \varepsilon_{FO}(z, t) \quad (1)$$

avec C_T^{FO} et C_ε^{FO} des constantes de calibration. Pour une fibre optique nue, et un interrogateur de technologie Brillouin, ils sont équivalents à 1 GHz/°C et 0.05 MHz/ μ def. Le capteur fournit alors une mesure de déformation déduite de (1) entachée des variations de température dans la fibre optique, qu'on note déformation apparente $\varepsilon_{app}(z, t)$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{app}(z, t) &= \varepsilon_{FO}(z, t) + \beta_{FO} \cdot \Delta T_{FO}(z, t) \\ &= \frac{\Delta \nu_B^{FO}(z, t)}{C_\varepsilon^{FO}} \end{aligned} \quad (2)$$

avec $\beta_{FO} = \frac{C_T^{FO}}{C_\varepsilon^{FO}}$ le rapport entre les deux coefficients de calibration, qui est égal à 20 μ def/°C pour une fibre optique nue. Une augmentation de 1°C se traduit donc dans la mesure de déformation apparente par une augmentation de 20 μ m/m. Ce facteur varie selon le type de gaine du câble à fibre optique utilisé. Pour une interprétation correcte des mesures de déformation, il est alors obligatoire de corriger l'influence de la température pour estimer la déformation athermique dans la structure.

2.2 Relation avec la déformation athermique de la structure

Dans une structure en géomatériau, il est possible de considérer la déformation dans la fibre optique comme étant la somme de la déformation dans la structure $\varepsilon_{st}(z, t)$ et un terme de bruit $\varepsilon_{th}(z, t)$, dû à la dilatation thermique du matériau présent dans la structure [3] :

$$\varepsilon_{FO}(z, t) = \varepsilon_{st}(z, t) + \varepsilon_{th}(z, t) \quad (3)$$

En effet, par effet de diffusion dans la structure, la température de l'air peut faire varier la température du sol proche du câble, s'il n'est pas assez profondément enterré. On considère alors que la température dans la fibre optique est égale à celle de la structure, qui est elle-même dépendante de la température de l'air ΔT_{air} , à une amplitude et un retard τ près. Par effet de dilatation, une déformation apparait et ce terme, qui devient non-négligeable, peut s'exprimer comme :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{th}(z, t) &= \alpha_{dil}(z) \cdot \Delta T_{FO}(z, t) \\ &= \alpha_{dil}(z) \cdot \alpha_{dif}(z) \cdot \Delta T_{air}(t - \tau(z)) \end{aligned} \quad (4)$$

avec $\alpha_{dil}(z)$ et $\alpha_{dif}(z)$, les coefficients de dilatation et de diffusion du matériau. Ils peuvent varier en fonction de la distance, puisque les structures sont souvent constituées de matériaux hétérogènes. Finalement, le terme de bruit de température dans l'équation (3) est supposé dans notre cas seulement dépendant de la température de l'air proche de la structure. La déformation athermique de la structure peut alors s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{app}(z, t) &= \varepsilon_{st}(z, t) + \alpha_{th}(z) \cdot \Delta T_{air}(t - \tau(z)) \\ &\quad + \beta_{FO} \cdot \Delta T_{FO}(z, t) \end{aligned} \quad (5)$$

où $\alpha_{th}(z)$ correspond au produit de $\alpha_{dil}(z)$ et $\alpha_{dif}(z)$. Il est nécessaire d'estimer ces coefficients afin de supprimer l'influence de chaque source.

3 Séparation de sources

Plusieurs solutions sont possibles pour séparer l'influence de chaque source. Si aucune source de température n'est mesurable sur le site, les méthodes de séparation de sources aveugles peuvent être une solution. Notamment, la Décomposition Modale Empirique [4] permet d'extraire du signal de déformation les composantes sinusoïdales présentes à cause des variations journalières et saisonnières. Le problème majeur de ces méthodes est l'éventuelle suppression du signal utile. Si les mesures de température de l'air et dans la fibre optique sont disponibles, il est alors possible de supprimer les effets thermiques grâce au filtre de Wiener [5].

Le profil de température dans la fibre optique peut être mesuré par un interrogateur de type Raman. Le coefficient β_{FO} est alors estimable en minimisant l'erreur quadratique entre la déformation apparente et la

déformation thermique dans la fibre. Nous le considérons invariant selon z et t :

$$\tilde{\beta}_{FO} = \underset{z,t}{\operatorname{argmin}} \left\| \varepsilon_{app}(z,t) - \beta_{FO} \cdot \Delta T_{FO}(z,t) \right\|_2^2 \quad (6)$$

La déformation dans la fibre optique est alors estimée, mais il est nécessaire de séparer la déformation athermique et thermique de la structure (la dernière est principalement due à la température de l'air). En faisant l'étude de la corrélation entre la déformation ε_{FO} et ΔT_{air} , le vecteur de retard $\tau(z)$ est estimé : il correspond à la position du maximum de l'intercorrélation. On considère alors N_d observations de la température de l'air, notées $Y(z,t)$, qui sont retardés en fonction du retard estimé $\tau(z)$. Ces observations peuvent être considérées stationnaires au second ordre et centrées si les variations journalières sont éliminées au préalable (grâce à un filtre coupe-bande par exemple) puisque seules les variations saisonnières seront présentes. La relation entre $Y(z,t)$ et $\varepsilon_{th}(z,t)$ est définie par l'intermédiaire de la transposée du filtre de Wiener W , notée W' :

$$\tilde{\varepsilon}_{th}(z,t) = W' Y(z,t) \quad (7)$$

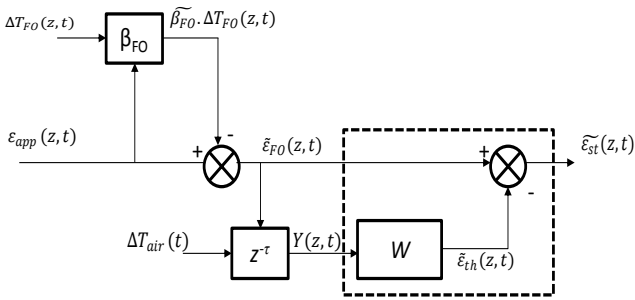


Figure 1 : Soustracteur de bruit pour l'estimation de la déformation athermique de la structure par correction de l'influence de la température sur la mesure de déformation.

Le bruit thermique ε_{th} est donc un mélange pondéré par les coefficients $\alpha_{th}(z)$ - à déterminer - des observations de température dans le milieu. L'approche statistique du problème consiste alors à minimiser l'erreur entre la déformation dans la fibre optique, ε_{FO} , et l'estimation du bruit $\tilde{\varepsilon}_{th}$ [4]. L'expression du filtre de Wiener W en découle directement dans notre cas :

$$W = \Gamma_{YY}^{-1} \Gamma_{Y\varepsilon_{FO}} \quad (8)$$

avec Γ_{YY} la fonction d'autocorrélation des observations de température et $\Gamma_{\varepsilon_{FO}Y}$ la fonction d'intercorrélation entre la déformation ε_{FO} et les observations de température. En soustrayant l'estimation du bruit, il est alors possible d'estimer la déformation athermique irréversible $\tilde{\varepsilon}_{st}$ comme schématisé sur la Figure 1.

4 Applications sur des mesures de déformation acquises sur un canal

Lors de la rénovation d'une digue, une portion de 100 m a été instrumentée par un câble à fibre optique, enterré à 20 cm de la surface. Des interrogateurs Brillouin et Raman ont permis d'effectuer des mesures de déformation et de températures sur une période de 2 mois, à intervalle de 1h et avec une résolution spatiale de 10 cm (après interpolation).

Nous nous focalisons dans cet article à une zone de 50 m de la structure dans laquelle des déformations apparaissent. D'après la Figure 2. a., des variations en fonction du temps apparaissent notamment entre 50 m et 80 m dans la structure. Lorsqu'on analyse la température dans la fibre optique (Figure 2. b.), nous constatons que ces variations réversibles sont liées aux variations saisonnières et journalières. Ces variations, entre +/- 4 °C selon la distance et le temps, sont donc réversibles. Celles-ci engendrent une variation équivalente de +/- 80 μm/m dans la déformation apparente, ce qui est non négligeable et donc préjudiciable pour l'interprétation de la déformation.

Une zone de traction importante dans la fibre de l'ordre de 500 μm/m apparaît autour de 95m sans qu'il y ait d'augmentation du signal de température au même endroit. Cette augmentation de la déformation apparente a donc pour origine une déformation athermique et irréversible de la structure qui pourrait engendrer d'importants déplacements. Nous allons le vérifier par la suite. Afin d'enlever l'influence de la température, nous appliquons la méthode proposée.

La première étape consiste en l'optimisation du coefficient β_{FO} à partir de la mesure de température fournie par l'interrogateur Raman. Nous obtenons un coefficient de 29.5 μdef/°C au lieu de 20 μdef/°C théorique pour cette fibre optique. Cela signifie que les variations de température ont plus d'impacts sur la déformation apparente que le modèle identifié dans la littérature. Cet écart est dû à l'influence de la gaine du câble et à l'interaction sol / câble. La figure 2.c. représentant la moyenne de la matrice de déformation apparente en fonction du temps (en rouge) permet d'illustrer le résultat obtenu après la première étape. La moyenne de la matrice de déformation $\tilde{\varepsilon}_{FO}(z,t)$ (courbe bleue) après soustraction par le coefficient $\tilde{\beta}_{FO}$ égal à 29.5 μdef/°C montre que des variations réversibles liés à la dilatation du matériau persistent.

Plusieurs mesures de températures de l'air peuvent être utilisées en entrée du filtre de Wiener. Sur ce site, aucun capteur ponctuel de température de surface n'a été installé. Nous pouvons alors utiliser une portion de la fibre optique (20 m) permettant d'estimer une température proche de celle de l'air en surface de la digue en moyennant la température mesurée par l'interrogateur Raman en fonction de la distance. En parallèle, une mesure de température a été effectuée sur une station Météo France à 5 km du site étudié. Nous avons testé ces deux références de température pour supprimer les variations dues à la dilatation de la structure causée par la température de l'air.

En utilisant la température de l'air à la surface de la structure, le résultat de la séparation (Figure 2.c. –

courbe noire) n'est pas satisfaisant puisque les variations saisonnières ne sont pas totalement corrigées. L'hypothèse suivante peut expliquer ce résultat : la température de la fibre optique mesurée par l'interrogateur Raman ne reflète pas la température proche de la structure, mais fournit une température plus locale qui subit des phénomènes radiatifs importants selon l'exposition du câble à fibre optique.

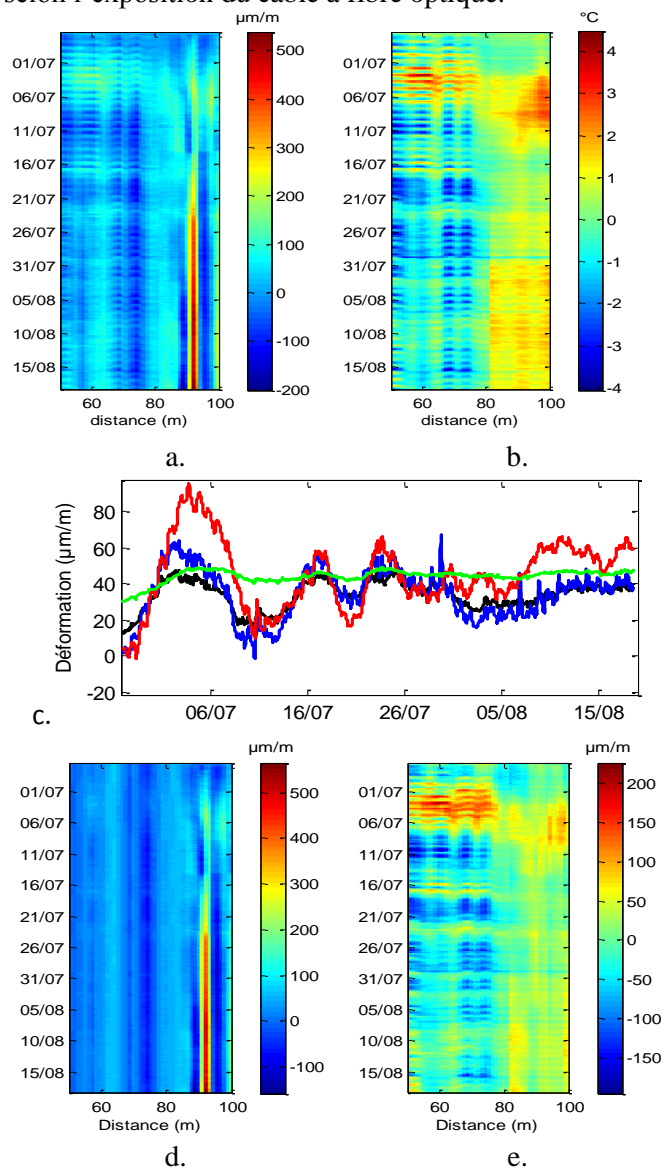


Figure 2 : a. Déformation apparente ε_{app} fournit par l'interrogateur Brillouin en $\mu\text{m/m}$. b. Température dans la fibre optique fournit par un interrogateur Raman en $^{\circ}\text{C}$. c. Projections de la matrice de déformation apparente (en rouge), de la déformation athermique $\tilde{\varepsilon}_{FO}(z, t)$ après soustraction avec $\tilde{\beta}_{FO} = 29.5 \mu\text{def}/^{\circ}\text{C}$ (en bleu), des déformations athermiques estimées $\tilde{\varepsilon}_{st}(z, t)$ selon la méthodologie proposée en utilisant les mesures de température à la surface de la structure grâce au capteur à fibre optique (en noir), et à Météo France (en vert). d. Estimation de $\tilde{\varepsilon}_{st}(z, t)$ grâce à la méthodologie proposée et la référence de température donnée par Météo France. e. Estimation de la déformation thermique dans la fibre optique, $\tilde{\varepsilon}_{th}(z, t)$.

La température de l'air mesurée par Météo France permet d'avoir une meilleure corrélation entre la matrice de déformation ε_{FO} et la température de l'air (moyenne de 0.86). L'estimation de la déformation

athermique dans la structure par la méthode proposée avec cette référence de température ne présente alors plus de variations thermiques (Figure 2.c. – courbe verte). Il est alors possible d'obtenir la déformation athermique et thermique dans la structure (Figure 2.d. et e). Nous remarquons que la déformation thermique (Figure 2.e.) présentait au sein de la déformation mesurée des variations maximales de l'ordre de 200 $\mu\text{m/m}$. Maintenant corrigée de ces variations, la déformation athermique augmente peu en fonction du temps, sauf autour de 95 m, où la déformation augmente jusqu'à atteindre 525 $\mu\text{m/m}$. Une interprétation physique de ce phénomène pourra ensuite être effectuée. Aucun capteur de déformation de référence n'a été installé donc la validation de la méthode reste à effectuer.

5 Conclusion

L'article propose l'application d'une méthodologie alliant optimisation et filtre de Wiener pour résoudre un problème inhérent à la mesure de déformation par capteur à fibre optique. Notre approche est basée sur l'identification des sources potentielles pouvant affecter la mesure de la déformation dans la structure. Ayant accès aux mesures de ces sources, il est possible de corriger leurs influences et estimer une déformation athermique dans la structure proche du câble à fibre optique. La prochaine étape est de comparer le résultat de cette estimation avec des capteurs de déformation de référence. Une autre perspective est d'utiliser des méthodes de séparation aveugles de sources dans le cas où aucunes mesures de température ne sont disponibles sur site. Néanmoins, l'interprétation de la signature de cette déformation athermique permet d'estimer de manière plus précise le déplacement dans la structure. Cette méthode pourrait être également appliquée à d'autres types de capteurs de déformation influencés également par d'autres phénomènes physiques.

6 Références

- [1] Khan, A. A., V. Vrabie, Y. L. Beck, J. Mars, G. D'Urso, (2014), "Monitoring and early detection of internal erosion: Distributed sensing and processing." Structural Health Monitoring, SAGE Publications, pp.1-15.
- [2] Buchoud, E., (2014), "Détection, localisation, quantification de déplacements par capteurs à fibre optique." Thèse soutenue à l'Université de Grenoble, France.
- [3] Chang J.-H. (1958). "Ground temperature", Harvard University, Blue Hill Meteorological Observatory, Vol. 1.
- [4] Huang, N.E., Z. Shen, S.R. Long, M.L. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung & H.H. Liu, (1998), "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proc. Roy. Soc. London A, Vol. 454, pp. 903–995.
- [5] Baudois, D., C. Servière, & A. Silvent, (1989). « Soustraction de bruit ». Traitement du Signal, Vol. 6, No. 5, pp. 389-497.