



HAL
open science

Mesure de champ de déformation par capteur à fibre optique

Pierre Travers, François Louf, Pierre-Alain Boucard, Yohann Léguillon,
Guillaume Arpison, Ines Ghorbel, Vincent Crozatier, Vincent Kemlin

► **To cite this version:**

Pierre Travers, François Louf, Pierre-Alain Boucard, Yohann Léguillon, Guillaume Arpison, et al..
Mesure de champ de déformation par capteur à fibre optique. Congrès Français de Mécanique 2022 -
CFM 2022,, Aug 2022, Nantes, France. hal-03825291

HAL Id: hal-03825291

<https://hal.science/hal-03825291>

Submitted on 22 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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

Mesure de champ de déformation par capteur à fibre optique

P. TRAVERS^{a,b}, F. LOUF^a, P.-A. BOUCARD^a, Y. LEGUILLON^a, G. ARPISON^a, I. GHORBEL^a, V. CROZATIER^a, V. KEMLIN^a,

a. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France - francois.louf@ens-paris-saclay.fr, pierre.alain.boucard@ens-paris-saclay.fr, pierre.travers@ens-paris-saclay.fr

b. Thales Land and Air Systems, 76520 Ymare, France - yohann.leguillon@thalesgroup.com

c. Thales Defense Mission Systems, 06560 Valbonne, France - guillaume.arpison@thalesgroup.com

d. Thales Research and Technology, 91767 Palaiseau, France - ines.ghorbel@thalesgroup.com, vincent.crozatier@thalesgroup.com, vincent.kemlin@thalesgroup.com

Résumé :

Nous présentons la mise en place d'un essai maîtrisé sur une fibre optique collée sur une plaque d'acier. Cet essai a pour objectif d'apporter une compréhension fine des phénomènes menant à une variation de phase optique dans une fibre optique lorsqu'elle subit des déformations. En excitant la structure sur un mode propre, le champ de déformation subi par la fibre est parfaitement maîtrisé. Les fréquences et les formes des modes propres de la plaque sont connus grâce à un modèle numérique validé expérimentalement. Ceci nous permettra, à terme, de comparer quantitativement les champs de déformation issus des simulations à ceux mesurés par le système de mesure dynamique et distribué de déformations basé sur dispositif d'interrogation de fibre optique.

Abstract :

We present the implementation of a mechanical test on optical fiber which is glued on a steel plate. The main goal of this test is to have a complete understanding of the phenomena leading to an optical phase variation in an optical fiber undergoing strain. We propose to stimulate the plate at one eigenmode, so the strain field undergone by the fiber is perfectly controlled. The structure eigenmodes frequencies and shapes are known thanks to a numerical model which has been experimentally validated. This will allow us to compare quantitatively the strain fields from simulations with the strain fields from a dynamic and distributed strain sensing system based on an optical fiber sensor.

Mots clés : capteur à fibre optique, dynamique des structures, mesure de champ

1 Introduction

Les bobines de fibre optique sont des composants essentiels dans les systèmes optoélectroniques fibrés embarqués tels que les gyroscopes à fibre ou les oscillateurs optoélectroniques. Dans ces dispositifs, les longueurs de fibre optique installées peuvent atteindre plusieurs kilomètres. La fibre optique peut être bobinée sur un mandrin. Elle peut aussi être en « freestanding » : la fibre est bobinée sur un mandrin et une résine est ajoutée à chaque épaisseur de fibre ; à la fin du bobinage, le mandrin est retiré. Les bobines de fibre sont très sensibles aux chargements thermiques ainsi qu'aux vibrations. Ces perturbations extérieures peuvent fortement dégrader les performances des systèmes qui les utilisent [1, 2].

Dernièrement, un nouveau système de capteur à fibre optique basé sur une technique de type OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) a été proposé [3]. Cet interrogateur a déjà permis de mettre en évidence les déformations dans des bobines soumises à des vibrations lors de mesures avec une résolution spatiale de 40 cm pour une longueur de fibre de 1100 m et un taux de rafraichissement de 10 kHz [4]. Si cette mesure est un premier pas pour comprendre la réponse mécanique des bobines aux vibrations, la complexité de l'objet testé (bobine de fibre optique de 1000 m en « freestanding », collée dans une boîte métallique, elle-même fixée à un pot vibrant) est un frein à la compréhension fine des phénomènes observés. En effet, les caractéristiques mécaniques des bobines sont mal connues et leur modélisation n'est pas aisée [5]. Par ailleurs, il est impossible de réaliser des mesures de déformations à l'intérieur du bobinage avec les techniques conventionnelles.

Nous proposons de faire des mesures sur un système dans lequel les déformations vues par la fibre optique sont maîtrisées. Pour cela, nous mettons en place une solution où la fibre optique est collée selon un chemin défini sur une structure vibrant sur un mode dynamique déterminé et bien connu. Cet essai permet donc de maîtriser parfaitement les champs de déformation que va subir la fibre, ce qui en fait un moyen très utile pour relier la déformation à la variation de phase optique résultante que notre interrogateur est capable de mesurer.

2 Système de mesure

L'OFDR est une mesure interférométrique reposant sur une source laser dont la fréquence est modulée linéairement dans le temps. Cette modulation est périodique, avec une période $T_{mod} = 1/f_{mod}$. L'émission laser passe dans un interféromètre comprenant un bras court et un bras long, ce dernier contenant la fibre « capteur ». Dans cette dernière, la lumière est rétrodiffusée par les impuretés de la fibre. La recombinaison sur un photodétecteur entre le champ lumineux du bras court et celui rétrodiffusé donne un signal de battement dans lequel une position de rétrodiffusion est associée à une fréquence. En suivant l'amplitude et la phase du spectre de battement, il est possible de mesurer différents phénomènes physiques dans une fibre optique, de manière dynamique.

Dans une fibre optique de longueur L_{fibre} , les variations de phase optique $\Delta\phi$ en sortie de fibre sont directement liées à la déformation dans l'axe de propagation de la fibre optique le long de son abscisse curviligne s . Cette déformation est notée ε_t et s'exprime de la manière suivante [6, 7] :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n}{\lambda} \left[1 - \frac{n^2}{2} (P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})) \right] \int_0^{L_{fibre}} \varepsilon_t(s) ds, \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde de la lumière se propageant dans la fibre optique, n est l'indice de réfraction de la fibre optique, P_{11} et P_{12} sont ses coefficients élasto-optiques et ν est son coefficient de Poisson.

3 Dispositif expérimental

3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges du dispositif expérimental est intrinsèquement lié aux capacités de notre interrogateur. Dans ce dernier, un compromis doit être fait entre la résolution spatiale de mesure δz , la fréquence de rafraîchissement de la mesure f_{mod} , et la longueur de fibre interrogée L_{FUT} . Pour rester dans le même cadre de mesure de vibration que pour les bobines, on fixe la fréquence de rafraîchissement de la mesure à 10 kHz. À cette fréquence de modulation, la meilleure résolution spatiale que l'interrogateur peut fournir est de l'ordre du centimètre. Elle est limitée par les performances du laser. La résolution spatiale doit être au moins 5 fois plus petite que la période spatiale des déformations si on veut que le système soit capable de les mesurer avec précision.

Pour cet essai, une petite portion de fibre est suffisante dès lors que les sollicitations sur cette portion sont parfaitement maîtrisées. Une zone de test de la fibre capteur entre 5 et 10 m de longueur, nous semble adéquate. En prenant une résolution spatiale de l'ordre de 3 cm, cette zone représente entre 200 et 300 points de mesure. Une dernière contrainte est à prendre en compte : le placement de la fibre sur la structure ne doit pas engendrer un rayon de courbure de la fibre inférieur à 10 mm. Un rayon de courbure plus petit entraînerait des pertes de propagation du mode optique dans la fibre, ce qui peut poser des problèmes pour la transmission de notre signal d'interrogation.

Il faut donc mettre en place une structure assez simple, modélisable facilement et sans hypothèse trop forte. La mise en place de plusieurs mètres de fibre optique étant assez complexe, une structure plane est privilégiée.

3.2 Géométrie

Nous avons choisi de fabriquer une plaque en acier, de dimensions 312x300x14 mm. Un modèle de cette structure sous CAST3M nous permet d'évaluer les fréquences et les formes de ses premiers modes propres. Les propriétés mécaniques utilisées pour ces simulations sont décrites dans le tableau 1. La plaque est considérée comme une coque épaisse afin de prendre en compte le cisaillement.

Dimensions (L_x, L_y, L_z)	312x300x14 mm
Module de Young (E)	210 GPa
Masse volumique (ρ)	7860 kg/m ³
Coefficient de Poisson (ν)	0.28

TABLE 1 – Propriétés mécaniques pour les simulations

Les fréquences des quatre premiers modes propres de la plaque simulée sont 483 Hz, 728 Hz, 875 Hz et 1223 Hz. Notre système de mesure optique est donc capable de les détecter. Grâce aux analyses modales numériques, nous connaissons les champs de déplacement pour l'ensemble des points du maillage de la plaque. À partir de ces champs de déplacement, nous pouvons calculer pour chaque mode propre les champs de déformation sur une couche de la plaque $\varepsilon_{xx}(\omega)$, $\varepsilon_{yy}(\omega)$, $\varepsilon_{zz}(\omega)$, $\varepsilon_{xy}(\omega)$, $\varepsilon_{xz}(\omega)$, $\varepsilon_{yz}(\omega)$.

Pour le chemin de la fibre sur la plaque, deux solutions sont envisagées, représentées dans la figure 1. La première est de consister à réaliser un quadrillage de la fibre dans la longueur (ou la largeur) de la plaque. La fibre est orientée dans une direction sur 300 mm puis fait demi-tour jusqu'à l'autre extrémité et ainsi de suite jusqu'à remplir la plaque. En tenant compte du fait que le rayon de courbure de la fibre

doit être supérieur à 10 mm, cette solution permet de positionner au plus 4,5 m de fibre optique. Dans la seconde solution, la fibre suit un chemin en spirale partant des bords de la plaque vers son centre suivie d'une seconde spirale attenante partant du centre vers les bords de la plaque. La formule décrivant la spirale en coordonnées polaires est donnée ci dessous :

$$r(\theta) = r_0 + \frac{P}{2\pi}\theta, \quad (2)$$

avec $r(\theta)$ le rayon courant de la spirale, θ l'angle polaire, r_0 le rayon initial de la spirale et P le pas de la spirale (différence de rayon sur un tour). Dans ce cas, le rayon de courbure est largement supérieur au rayon minimum (sauf au centre de la plaque pour joindre les deux spirales). En jouant sur le pas de la spirale et l'écart entre les deux spirales, il est possible de positionner entre 7 et 9 m de fibre optique.

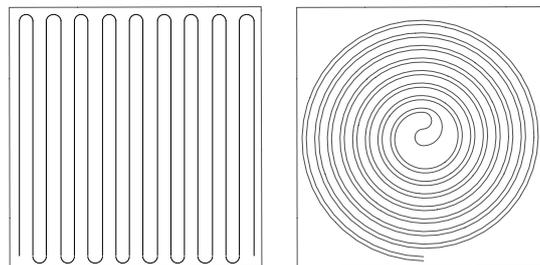


FIGURE 1 – Solutions envisagées pour le chemin de fibre sur la plaque

Le chemin de fibre est donc constitué de deux spirales de rayons initiaux 30 et 35 mm avec un pas de 15 mm. Elles sont reliées au centre par deux demi-cercles de rayon 10 mm et un demi-cercle de 45 mm de diamètre. La longueur de fibre dans une spirale est d'environ 4,2 m. La longueur totale de fibre collée sur la plaque est de 8,5 m. Le sillon a été tracé grâce à une gravure réalisée au jet d'eau. La fibre a ensuite été collée dans le sillon avec une résine époxy. Une photo de la plaque est donnée dans la figure 2.

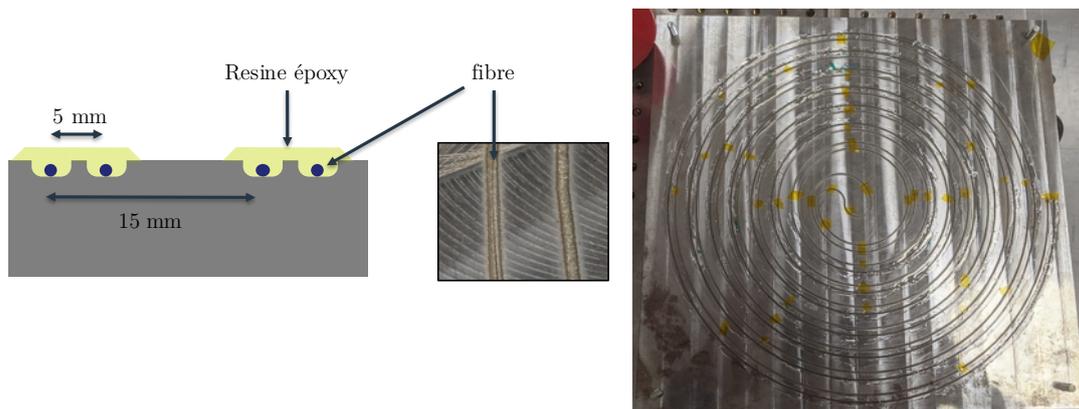


FIGURE 2 – Plaque d'acier avec une double spirale de fibre optique.

3.3 Déformations le long de la fibre

Maintenant que nous avons défini le parcours de la fibre, nous pouvons l'intégrer dans notre modèle. Chaque mode propre de la structure a un champ de déplacement propre. Notre modèle fournit les champs de déformation que va subir la fibre optique en chaque point de son abscisse curviligne s pour chaque mode de pulsation ω . Ces champs sont notés $\varepsilon_{xx}(\omega, s)$, $\varepsilon_{yy}(\omega, s)$, $\varepsilon_{zz}(\omega, s)$, $\varepsilon_{xy}(\omega, s)$, $\varepsilon_{xz}(\omega, s)$,

$\varepsilon_{yz}(\omega, s)$. D'après l'équation 1, le champ de déformation qui nous intéresse est celui dans l'axe de propagation de la lumière dans la fibre optique (ε_t), il faut donc projeter les champs précédents sur le vecteur tangent à la spirale. On obtient la déformation tangente à la spirale le long de l'abscisse curviligne pour un mode propre, notée $\varepsilon_t(\omega, s)$, telle que :

$$\varepsilon_t(\omega, s) = \{\vec{t}(s)\}\{\vec{\varepsilon}(\omega, s)\}\{\vec{t}(s)\}, \quad (3)$$

où $\vec{t}(s)$ est le vecteur tangent le long de l'abscisse curviligne de la spirale.

Les résultats des simulations de $\varepsilon_t(\omega, s)$ sont données en figure 3. Chaque mode possède bien une signature différente. On observe que pour tous les modes, $\varepsilon_t(\omega, s)$ a une périodicité spatiale (avec même une double modulation spatiale pour les modes 3 et 4). Celle-ci est liée à la forme des modes couplée avec la disposition de la fibre optique sur la structure. La période spatiale des champs de déformation est de 30 cm pour les modes 1 et 2 et de 20 cm pour les modes 3 et 4. Cette période tend à diminuer en arrivant au centre de la plaque. Pour une résolution spatiale de 3 cm, l'interrogateur fournit entre 6 et 10 points de mesure par période spatiale, ce qui devrait donc permettre de les définir.

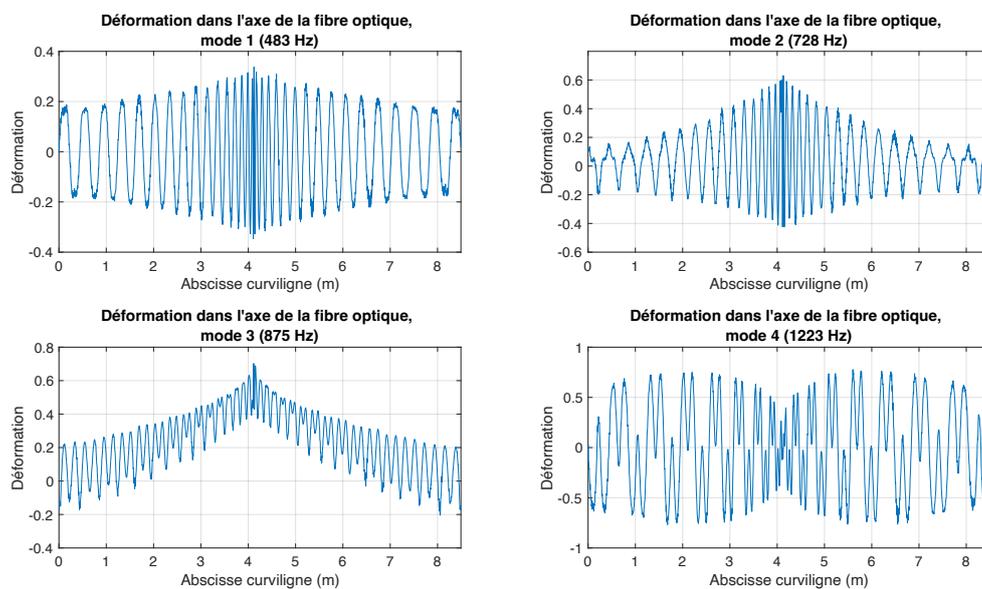


FIGURE 3 – $\varepsilon_t(M(s))$ pour chaque mode propre de la plaque

Il est intéressant de noter que l'intégrale de $\varepsilon_t(\omega, s)$ est différente pour chaque mode (voir tableau 2). La valeur de l'intégrale donnée n'a pas d'intérêt en soit pour l'instant, car elle est calculée sur une base de modes normalisés par rapport à la matrice de masse. Le rapport entre les intégrales est quant à lui bien représentatif et intéressant pour l'étude. En effet, en venant exciter la plaque à un mode donné, la fibre va subir un champ de déformation bien défini et le déphasage optique en sortie de fibre est donné par l'intégrale du champ de déformation le long de la fibre.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
$\int \varepsilon_t(M(s))ds$	4	100	473	33

TABLE 2 – Intégrale de $\varepsilon_t(s)$ pour chaque mode propre de la plaque.

Cet essai nous permet de préparer plusieurs types de résultats pour notre interrogateur. Premièrement, l'interrogateur doit être capable de détecter les fréquences des modes propres de la structure. Deuxièmement, il doit fournir des mesures quantitatives (et cohérentes entre elles) des intégrales de $\varepsilon_t(s)$ pour chaque mode. Troisièmement, il doit être capable de mesurer les variations spatiales du champ de déformation.

3.4 Validation expérimentale du modèle

Nous avons réalisé des tests au marteau de choc afin de valider les analyses modales numériques. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est donnée dans la figure 4 et le tableau 3. L'erreur relative sur la fréquence des modes est inférieure à 1 % pour les 4 premiers modes de la plaque. Le modèle sous-estime légèrement la fréquence des modes propres mais cette erreur reste acceptable. La forme des modes concorde elle aussi très bien.

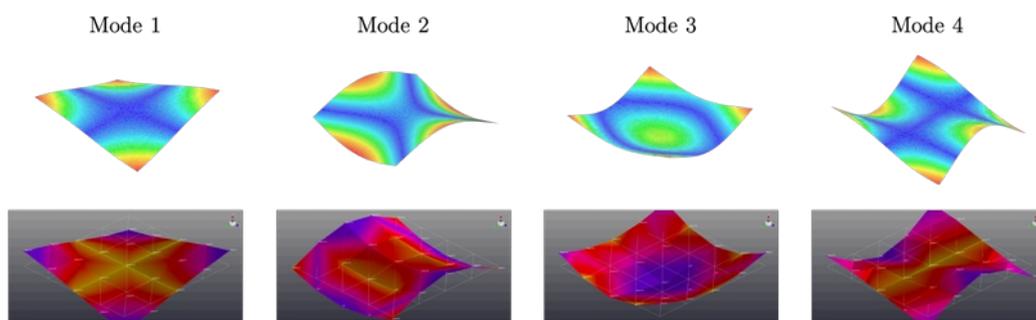


FIGURE 4 – Comparaison des formes des modes propres pour les analyses modales numériques (haut) et expérimentales (bas)

	Essai au marteau de choc	Analyse modale numérique	Erreur relative
Mode 1	484 Hz	483 Hz	-0.2 %
Mode 2	733 Hz	728 Hz	-0.6 %
Mode 3	884 Hz	875 Hz	-1 %
Mode 4	1221 Hz	1223 Hz	-0.2 %

TABLE 3 – Comparaison des fréquences des modes propres.

Des tests au marteau de choc ont été réalisés avec et sans la fibre collée sur la plaque. Le comportement n'est pas modifié significativement.

4 Premiers résultats

Une première mesure avec le système OFDR a été réalisée afin de confirmer la capacité du système de mesure à détecter les quatre premières fréquences propres. Ce premier test consiste à venir exciter la plaque avec un impact comme pour les essais au marteau de choc. L'impact est réalisé dans un des coins de la plaque. Cette position permet d'exciter les quatres premiers modes propre car elle n'est localisée sur aucun nœud de vibration de ces modes. Ce processus d'excitation ne permet de conclure sur la valeur des intégrales de $\varepsilon_t(s)$.

Le schéma expérimental est donné dans la figure 5. L'interrogateur est déporté par rapport à la strucutre test, c'est pourquoi une première bobine de 24,5 m est nécessaire. Une bobine de 100 m est ajoutée à la

fin pour avoir une grande longueur de fibre au repos. La fibre capteur de notre interrogateur est donc de 132,5 m. Les paramètres de cette première mesure sont les suivants : le taux de rafraîchissement de la mesure est de 10 kHz avec une résolution spatiale de 13 cm.

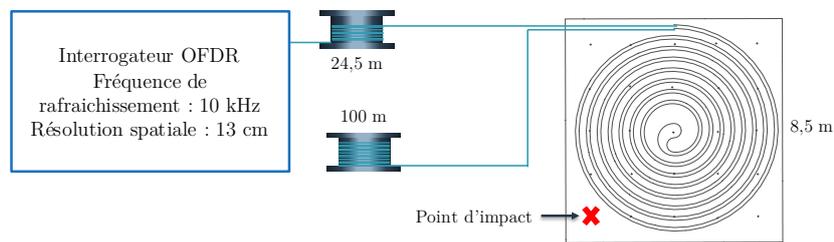


FIGURE 5 – Schéma expérimental des premiers tests.

La figure 6 présente les résultats issus de la mesure de phase réalisée par l'interrogateur. Dans le diagramme temps-position (figure 6(a)), chaque ligne correspond à un instant de mesure (figure 6(b)) et chaque colonne à l'évolution temporelle de la phase optique à une position dans les 132,5 m de fibre capteur (figure 6(c)). Dans la figure 6(b), on observe que la phase est constante entre 0 et 24,5 m, puis de 32 m jusqu'à la fin de la fibre, ce qui est en accord avec notre montage expérimental. En effet, on s'attend à des variations spatiales de phase optique à des positions où la fibre subit des déformations mécaniques, entre 24,5 m et 32 m.

Dans la figure 6(c), la réponse impulsionnelle de la plaque est clairement visible après le moment de l'impact (0,05 s). Le contenu spectral de cette trace est donné dans figure 6(d), où les quatre premiers modes de la plaque sont parfaitement visibles. Les autres pics sont apportés par l'environnement autour de la fibre (bruits dans le laboratoire).

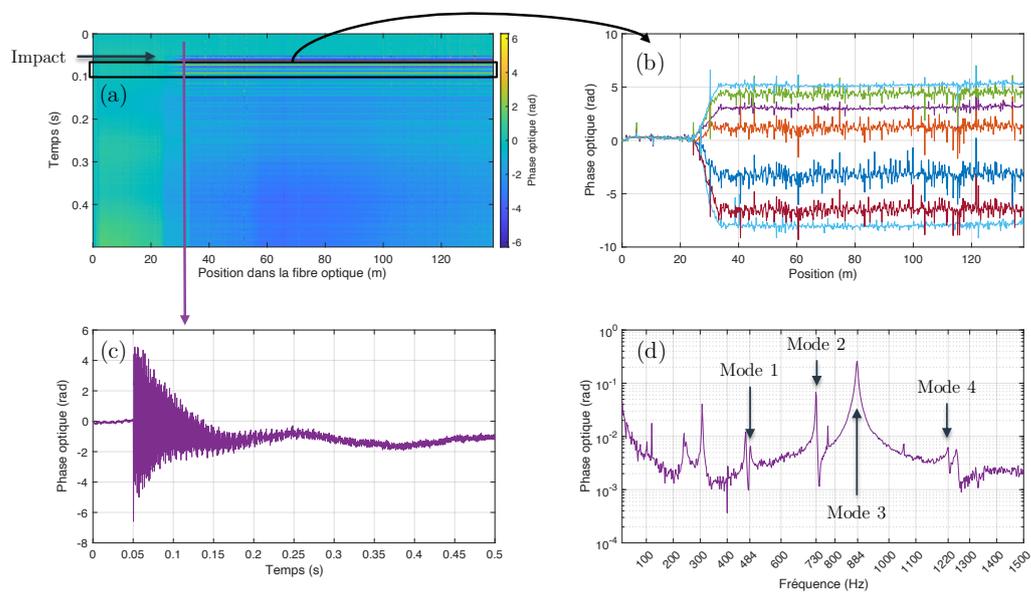


FIGURE 6 – Résultats de mesure de phase optique avec l'interrogateur OFDR. (a) Diagramme temps-position de la phase optique, (b) Évolution de la phase optique le long de la fibre pour plusieurs instants de mesure [90; 91] ms, (c) Évolution temporelle de la phase à une position (31 m), (d) Transformée de Fourier de l'évolution temporelle de la phase à 31 m.

5 Conclusion

Nous avons présenté la mise en place d'un essai maîtrisé sur une fibre optique ayant pour objectif la validation d'un dispositif d'interrogation dynamique et distribué de capteurs fibrés. Un câble de 8,5 m de fibre optique standard est collé dans un sillon sur une plaque d'acier dont les caractéristiques mécaniques sont parfaitement connues. Les modes propres de la structure ont été simulés et validés par des tests au marteau de choc. Le principe de l'essai est d'exciter un seul mode propre de la structure pour que la fibre subisse un champ de déformation qui soit connu à l'avance grâce aux simulations. L'objectif est de comparer quantitativement les champs de déformation simulés avec un système de mesure dynamique et distribué utilisant la fibre optique. Les premiers résultats sont encourageants. Ils montrent que l'interrogateur OFDR est capable de capter l'ensemble des modes propres recherchés lors d'une réponse de la plaque à un impact. Deux objectifs perdurent sur le système de mesure : premièrement, une comparaison de l'intégrale de la déformation tangentielle simulée et mesurée. Une excitation à un seul mode propre est envisagée grâce à un pot vibrant et une tige d'excitation modale. Le second objectif nécessite un changement des paramètres de l'interrogateur pour atteindre une résolution spatiale de 3 cm et résoudre spatialement le champ de déformation $\varepsilon_t(s)$.

Références

- [1] A. Hati, C. W. Nelson, and D. A. Howe, "Vibration sensitivity of optical components : A survey," in *2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings*. IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [2] W. Katrycz and A. Fischer, "On specification and measurement of the ifog vibration error," in *2021 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE, 2021, pp. 1–20.
- [3] G. Arpison, V. Kemlin, A. Peigne, and E. Lacot, "New interest for deskew filter post-processing algorithm in long range dynamic & coherent ofdr measurements," in *Optical Sensors*. Optical Society of America, 2021, pp. STu2B–5.
- [4] P. Travers, G. Arpison, I. Ghorbel, Y. Leguillon, F. Louf, P.-A. Boucard, V. Kemlin, and V. Crozatier, "Distributed strain sensing inside a fiber coil under vibration," *submitted*, 2022.
- [5] J. Pillon, H. Boiron, F. Louf, E. Peter, M. Rattier, P.-A. Boucard, and H. Lefevre, "Numerical model of optical-fiber gyroscope coil under homogeneous thermal field," in *14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020*, 2021.
- [6] G. Cumunel and P. Argoul, "Extensomètres à fibre optique longue base pour l'évaluation dynamique des structures," in *Congrès français de mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie, France, 2011.
- [7] C. D. Butter and G. B. Hocker, "Fiber optics strain gauge," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 18, pp. 2867–2869, Sep 1978. [Online]. Available : <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-17-18-2867>