



**HAL**  
open science

## Mesure de champs de déformation par interrogation optique OFDR

Pierre Travers, Clément Charliac, Inès Ghobrel, Vincent Kemlin, Vincent Crozatier, Yohann Leguillon, François Louf, Pierre-Alain Boucard

► **To cite this version:**

Pierre Travers, Clément Charliac, Inès Ghobrel, Vincent Kemlin, Vincent Crozatier, et al.. Mesure de champs de déformation par interrogation optique OFDR. 40èmes JOURNÉES NATIONALES d'OPTIQUE GUIDÉE - JNOG 2023, Jul 2023, LYON, France. hal-04179086

**HAL Id: hal-04179086**

**<https://hal.science/hal-04179086>**

Submitted on 9 Aug 2023

**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.

Public Domain

# MESURE DE CHAMPS DE DEFORMATION PAR INTERROGATION OPTIQUE OFDR

Pierre TRAVERS<sup>1,2</sup>, Clément CHARLIAC<sup>3</sup>, Inès GHOBREL<sup>3</sup>, Vincent KEMLIN<sup>3</sup>, Vincent CROZATIER<sup>3</sup>, Yohann LEGUILLON<sup>2</sup>, François LOUF<sup>1</sup>, Pierre-Alain BOUCARD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMPS, Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup>Thales Land and Air Systems, Ymare, France

<sup>3</sup>Thales Research and Technology, Palaiseau, France

[clement.charliac@thalesgroup.com](mailto:clement.charliac@thalesgroup.com)

## RESUME

Nous présentons ici un essai mécanique maîtrisé réalisé à l'aide d'une plaque métallique instrumentée par une fibre optique, servant de capteur distribué. L'objectif de cet essai consiste à quantifier la contrainte mécanique mesurée par le capteur à fibre optique, en la comparant à la contrainte simulée numériquement pour différents modes propres de la plaque. Pour cela, nous avons modélisé mécaniquement la plaque de manière à déterminer ses modes propres et calculer la déformation subie par la fibre optique intégrée à sa surface pour chacun de ces modes. Nous avons ensuite confronté ces simulations à des mesures optiques à l'aide d'un interrogateur  $\phi$ -OFDR dynamique à haute résolution spatiale (3cm, 3kHz).

**MOTS-CLEFS :** *capteur à fibre optique ; mesure de champ de déformation*

## 1. INTRODUCTION

Les capteurs à fibre permettent la détection de contraintes, de température, de pression, de rotation, de vibration. Parmi la grande variété de types de capteurs, on distingue en particulier les capteurs ponctuels des capteurs distribués. Dans ce second cas, une partie des capteurs exploitent des variations de phase optique pour ensuite extraire la grandeur utile. En 1990, Sirkis propose un modèle [1] permettant de relier la déformation d'une fibre optique de longueur  $L_{fibre}$ , le long de son abscisse curviligne  $s$  à une variation de phase optique  $\Delta\phi$  :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n}{\lambda} \int_0^{L_{fibre}} \left[ \epsilon_T(s) - \frac{n^2}{2} \left( \frac{1}{2} (P_{11} + P_{12}) (\epsilon_{N1}(s) + \epsilon_{N2}(s)) + \epsilon_T(s) P_{11} \right) \right] ds, \quad (1)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde optique,  $n$  l'indice de réfraction de la fibre optique,  $P_{11}$  et  $P_{12}$  ses coefficients élasto-optiques,  $\nu$  son coefficient de Poisson,  $\epsilon_T(s)$  la déformation dans l'axe de propagation de la fibre,  $\epsilon_{N1}(s)$  et  $\epsilon_{N2}(s)$  les déformations mécaniques orthogonaux à l'axe de propagation de la fibre. Ce modèle a été validé par des mesures interférométriques, c'est-à-dire en mesurant la phase accumulée tout au long de la fibre, pour une structure simple (poutre encadrée) [2]. Nous proposons ici de confronter ce modèle dans un système mécanique plus évolué, avec un interrogateur distribué.

## 2. STRUCTURE MECANIQUE

Pour connaître la déformation perçue par la fibre, nous avons conçu une plaque en acier de dimensions 312x300x14 mm, sur laquelle nous avons intégré une fibre optique monomode standard à 1.5  $\mu\text{m}$  (coating 250  $\mu\text{m}$ ) en creusant un sillon en forme de double spirale. Trois demi-cercles d'un rayon de courbure de 1 cm joignent les deux spirales au centre de la plaque. La longueur totale du chemin optique sur la plaque est de 8,5 m. Cette structure est suspendue

grâce à des élastiques attachés à un portique. On s'affranchit ainsi des conditions aux limites, qui sont souvent difficiles à modéliser avec précision.

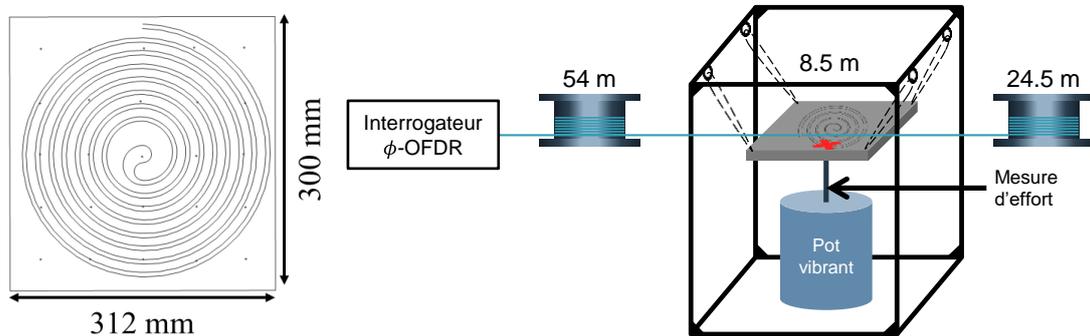


Figure 1: Gauche : Solution retenue pour le chemin de fibre sur la plaque. Droite : Schéma expérimental des mesures sous vibrations

Nous avons modélisé mécaniquement le comportement de cette plaque à l'aide d'un modèle numérique MEF (méthode des éléments finis) réalisé sur le logiciel CAST3M, de manière à connaître les fréquences propres ainsi que les champs de déformation le long de la fibre optique pour chacun des modes propres de la plaque métallique. Ce modèle a été affiné par recalage à l'aide de deux techniques de mesures mécaniques [3]:

- Essai au marteau de choc ;
- Fonction de réponse en fréquence (FRF) sur un pot vibrant.

Tab. 1 : Valeurs de fréquences propres et d'amortissement modal

	Fréquence propre			Amortissement modal (en %)	
	FRF	Marteau	Simulation	FRF	Marteau
Mode 1	484 Hz	484 Hz	484 Hz	$0.83 < \zeta < 0.93$	$0.24 < \zeta < 0.50$
Mode 2	729 Hz	733 Hz	729 Hz	$0.11 < \zeta < 0.13$	$0.05 < \zeta < 0.26$
Mode 3	879 Hz	886 Hz	879 Hz	$0.28 < \zeta < 0.34$	$0.29 < \zeta < 0.58$
Mode 4	1221 Hz	1223 Hz	1227 Hz	$0.24 < \zeta < 0.28$	$0.26 < \zeta < 0.36$

Comme le présente le tableau ci-dessus, on obtient un excellent accord sur les fréquences propres entre les mesures expérimentales et les simulations. En ce qui concerne l'amortissement modal, on constate que les valeurs sont très faibles, typiques d'un système très peu amorti. L'incertitude sur ces valeurs d'amortissement extraites n'est pas négligeable, et doit être pris en compte pour le calcul de déformation. A l'aide de notre modèle nous pouvons déterminer l'évolution des déformations tangentielle  $\epsilon_t$  et normale  $\epsilon_N$  dans le plan de la plaque au parcours de la fibre. En intégrant numériquement cette déformation le long de l'abscisse curviligne  $s$  de la fibre, nous pouvons calculer les variations de phase optique accumulée dans la fibre grâce à l'Eq (1), et les normaliser par l'effort injecté.

Les variations de phase calculées pour les 4 premiers modes propres sont présentées sur la figure 2. Les traces tiennent compte des différentes incertitudes liées à la fréquence d'excitation et à l'amortissement modal. L'épaisseur des courbes tend ainsi à augmenter au fur et à mesure du chemin de la fibre (accumulation des incertitudes). On observe des réponses très différentes selon les modes, avec des variations oscillantes pour les modes 1 et 4 (période spatiale de l'ordre de 40 cm en début et fin de fibre), et des variations monotones

pour les modes 2 et 3. L'amplitude de la phase accumulée est également très variable d'un mode à l'autre (du rad/N pour les modes 1 et 4 à plus de 10 rad/N pour le mode 2).

### 3. BANC DE MESURE OPTIQUE

Pour réaliser nos mesures optiques, nous utilisons un interrogateur  $\phi$ -OFDR développé dans le laboratoire [4], qui nous a déjà permis de mesurer les variations de phase optique à l'intérieur de bobines de fibres optiques sous vibrations [5]. Un interrogateur OFDR repose sur un laser continu dont la fréquence est modulée linéairement dans le temps. La résolution spatiale  $\delta z$  de la mesure est inversement proportionnelle à l'amplitude de la modulation  $\Delta f$  de la fréquence du laser ; la période de modulation détermine quant à elle la cadence de mesure. Nous avons ajusté les paramètres de balayage du laser pour pouvoir mesurer les champs de déformation. D'une part, nous modulons le laser sur 3 GHz, ce qui nous donne une résolution spatiale  $\delta z$  de 3 cm, inférieure aux modulations spatiales des différents modes. Dans ces conditions, la fréquence de modulation est de 3 kHz, ce qui est suffisant pour pouvoir échantillonner les quatre modes propres de la plaque. Nous avons également utilisé un second jeu de paramètres avec une résolution spatiale dégradée à 6 cm, mais permettant une cadence de mesure à 5 kHz.

Comme le montre la figure 1, la fibre capteur se compose de la fibre collée sur la plaque et de deux câbles supplémentaires. Le premier permet de relier le laboratoire de l'interrogateur au laboratoire de l'essai mécanique. Lorsque la fibre arrive dans le second laboratoire, elle est libre sur plusieurs mètres, puis est connectée à la fibre collée sur la plaque. Le signal passe à travers la spirale extérieure puis par la spirale intérieure et va ensuite dans un dernier câble. La plaque est excitée à une fréquence grâce à un pot vibrant avec une tige d'excitation modale. Cette tige est vissée sur le pot vibrant et collée à la plaque. Un capteur de force (PCBPiezotronic 208C02) est placé entre la tige et la plaque. Nous venons mesurer la phase optique extraite de notre interrogateur, que l'on normalise par l'effort injecté.

### 4. RESULTATS

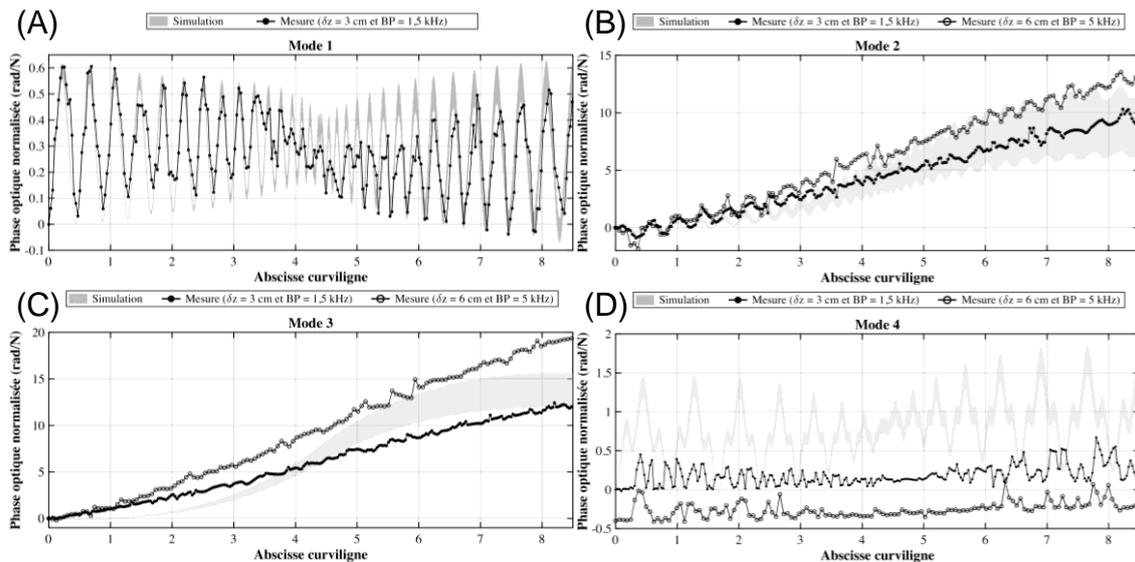


Figure 2: Phases optiques accumulées normalisées pour les 4 premiers modes (A à D) de vibrations de la plaque. Traces grises : simulations. Ronds noirs pleins : mesures optiques à  $\delta z = 3$  cm/3 kHz ; Cercles noirs : mesures optiques à  $\delta z = 6$  cm /5 kHz.

La figure 2 présente les mesures de phase optique normalisée obtenues uniquement sur la zone correspondant à la fibre collée sur la plaque. Aucun ajustement n'est réalisé.

Sur le premier mode propre, nous observons un excellent accord entre les phases simulées et mesurées optiquement, en termes d'amplitude et de forme. On observe une atténuation de la modulation au centre de l'abscisse curviligne, vraisemblablement liée à un problème de résolution spatiale de notre mesure pour bien définir les variations spatiales.

Pour le deuxième mode, l'accord entre phases mesurée et prédite est aussi très bon. La modulation spatiale est aussi bien visible et l'accord est excellent sur les premières et dernières modulations spatiales (en début et en fin de fibre). Nous constatons néanmoins un glissement de la phase des oscillations spatiales. Passé 3 m d'abscisse curviligne, les périodes spatiales mesurée et prédite sont en opposition de phase. Nous observons ce même phénomène lorsque la résolution spatiale est réduite (6 cm) et l'échantillonnage temporel plus important (5 kHz).

Pour le mode 3, l'accord entre les phases prédite et mesurée est moins bon que dans les mesures précédentes mais est globalement satisfaisant. L'ordre de grandeur est cohérent sur les deux mesures que nous avons effectuées par rapport à celui prédit. Le principal point de désaccord entre les mesures et les simulations est l'absence de sigmoïde dans les mesures. Aucune des mesures que nous avons réalisées ne présentent cette forme malgré un balayage de l'amplitude d'excitation sur plus d'un ordre de grandeur (entre 0,5 N et 0,02 N).

Pour le mode 4, l'accord entre la mesure et la prédiction est moins bon que pour les trois premiers modes. Globalement, l'ordre de grandeur de la phase accumulée mesurée est plus faible que celui prédit. La phase présente une modulation spatiale mais qui ne reproduit pas celle prédite. Dans la mesure moins résolue spatialement, l'information est totalement perdue entre 3 et 6 m, tandis que dans la mesure plus résolue spatialement l'information est perdue entre 4,2 et 5,2 m. Les caractéristiques ce mode sont à la limite des paramètres de mesures, notamment pour la fréquence propre (1,2 kHz) à la limite du critère de Shannon (1,5 kHz). De même, la périodicité spatiale de la phase optique se rapproche de la résolution de mesure. Ces deux points peuvent expliquer le mauvais accord entre la mesure et la prédiction.

## 5. CONCLUSION

Nous avons présenté la mise en place d'un essai maîtrisé autour duquel nous avons comparé quantitativement les champs de déformation simulés d'une plaque instrumentée avec un système de mesure dynamique et distribué utilisant la fibre optique. L'accord entre le modèle et la mesure est très variables d'un mode à l'autre (excellent pour le premier, plus mauvais pour le dernier). Des études plus poussées à la fois sur l'interrogateur et sur les simulations sont à mettre en place pour analyser les différences observées sur les différents modes.

## 6. REFERENCES

- [1] J. S. Sirkis, and H. W. Haslach, "Complete phase-strain model for structurally embedded interferometric optical fiber sensors," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 2, pp. 3-24, 1991.
- [2] J. S. Sirkis, and H. W. Haslach, "Interferometric strain measurement by arbitrarily configured surface-mounted, optical fibers," *J. Lightw. Technol.* vol. 8, pp. 1497-1503, 1990.
- [3] Pierre Travers, et al., "Mesure de champ de déformation par capteur à fibre optique," *Congrès Français de Mécanique*, 2022.
- [4] G. Arpison, "Nouvelle stratégie de mesure d'ondes acoustiques par capteur à fibre optique distribué," 2021.
- [5] Travers, Pierre, et al. "Distributed strain sensing inside a fiber coil under vibration," *J. Lightw. Technol.* vol. 40, pp. 6280-6287, 2022.