



**HAL**  
open science

## Structural health monitoring of high pressure composite vessels for hydrogen storage with embedded optical fibres – H2E project

Laurent Maurin, Pierre Ferdinand, Fabien Nony, Stéphane Villalonga,  
Maxime Bertin, Christophe Langlois, Clémence Devilliers

### ► To cite this version:

Laurent Maurin, Pierre Ferdinand, Fabien Nony, Stéphane Villalonga, Maxime Bertin, et al.. Structural health monitoring of high pressure composite vessels for hydrogen storage with embedded optical fibres – H2E project. C2I 2013 - 6ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2013, Lyon, France. pp.39-46, 10.1051/978-2-7598-1206-6-004 . cea-03908702

**HAL Id: cea-03908702**

**<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-03908702>**

Submitted on 21 Dec 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.

# **Contrôle santé par fibres optiques de réservoirs composites pour le stockage d'hydrogène sous haute pression – Projet H2E (Horizon Hydrogène Énergie)**

Laurent Maurin<sup>1</sup>, Pierre Ferdinand<sup>1</sup>, Fabien Nony<sup>2</sup>, Stéphane Villalonga<sup>2</sup>,  
Maxime Bertin<sup>2</sup>, Christophe Langlois<sup>3</sup> et Clémence Devilliers<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEA, LIST, Laboratoire de Mesures Optiques,  
F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

<sup>2</sup>CEA, DAM, Laboratoire de Synthèse et Transformation des Polymères,  
F-37260 Monts, France.

<sup>3</sup>EADS Composites Aquitaine, 19 Route de Lacanau,  
F-33160 Salaunes, France.

<sup>4</sup>Air Liquide, Centre de Recherche Claude Delorme, 1 Chemin de la Porte des Loges,  
F-78354 Les Loges-en-Josas, France.

laurent.maurin@cea.fr

## **Structural Health Monitoring of high pressure composite vessels for hydrogen storage with embedded optical fibres – H2E project**

*This document presents the results of mechanical tests performed on carbon fibre epoxy composite samples of high pressure storage hydrogen vessels, equipped with embedded Optical Fibre Sensors devoted to their Structural Health Monitoring (SHM).*

*Early measurements on flat samples have proved the Fibre Bragg Gratings (FBG) transducers ability to measure strains into such anisotropic materials, and pointed out the optical fibre location importance relative to the structural layers orientations for strain measurements of the structure.*

*Comparative tests on flat samples and NOL rings, with and without embedded optical fibres, did not permit to conclude about any significant intrusive effect of optical fibres on their ultimate tensile strength.*

*Moreover, interpretation in energy of fatigue tests performed on NOL rings, known to be more representative of pressure vessels, have first demonstrated the weakness of the sole interpretation of force measurements which can lead to wrong interpretations, and second the need to accurately control the energy during the first fatigue cycles, since it has a significant effect on the sample fatigue strength.*

*Mechanical tests on vessels first performed to acquire some knowledge about their behaviour, and also to early detect the occurrence of “critical” structural defects, have demonstrated the essential contribution in this application of the Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) based on Rayleigh backscattering compared to other “traditional” optical techniques, e.g. Brillouin reflectometry.*

*Based on the fact that pressure vessels are subjected to an homogeneous hydrostatic stress (their internal pressure), we demonstrate, according to OFDR measurements on first composite vessels, the ability to detect some structural defects without the need to inflate them at pressures greater than their working pressure, thus reducing the risk of creation or evolution of new or existing internal defects.*

*Besides the fact that these optical measurements provide information of a mechanical nature (i.e. the distributed strain profile all along the optical fibre), they are performed by the same sensor –the optical fibre– embedded into the composite structure throughout its lifetime, eliminating by design any measurement dispersion between different sensors.*

*Thus, the optical fibre used in combination with OFDR turns to be a high-end and non-destructive in situ measurement technique for long-term SHM of high pressure vessels.*

## 1. Introduction

Le projet H2E (Horizon Hydrogène Énergie) a pour objectif de participer à la mise en place d'une filière hydrogène-énergie, durable et compétitive, sur des marchés pour lesquels l'hydrogène et la pile à combustible répondent dès à présent à un besoin [1, 2].

Parmi le développement des technologies innovantes, la mise au point par la société Composites Aquitaine, filiale d'EADS, de réservoirs composites pour le stockage à haute pression (700 bar) de l'hydrogène est une composante clef requérant une attention toute particulière, car rentrant dans le cadre réglementaire des "équipements sous pression" [3].

Ainsi, afin de comprendre quels sont les mécanismes d'endommagement de ces nouveaux types de réservoirs [4], disposer d'un outil adapté de détection *in situ* de leurs défauts structuraux pouvant potentiellement évoluer vers des défauts "critiques" pendant leur utilisation, est par conséquent essentiel.

Parmi les technologies explorées, le CEA LIST et le CEA DAM, en collaboration avec leurs partenaires, ont instrumenté puis réalisé un certain nombre d'essais mécaniques sur des échantillons et réservoirs composites afin d'évaluer le potentiel des fibres optiques pour analyser et surveiller le comportement sous contraintes de ces nouvelles structures bobinées.

Cet article présente les résultats d'essais et de caractérisations réalisés pour tenter de mettre en évidence un caractère éventuellement intrusif de la fibre optique noyée au sein de ces structures et démontrer l'apport de certaines technologies de mesure par fibres optiques pour la mise en évidence de défauts structuraux. L'application de la technologie OFDR (*Optical Frequency Domain Reflectometry*) à une mesure répartie très résolue, tant spatialement que quantitativement de la déformation de la fibre optique maillant la structure réservoir, est présentée et illustrée par la détection de premiers défauts.

Dans un contexte plus général, l'apport de la fibre optique silice en tant que capteur de mesure *in situ* permettant, à l'aide des méthodes de mesure associées, la surveillance *ad vitam* des structures réalisées en composites organiques, est argumenté [5-7].

## 2. Mesures sur échantillons

Les essais sur échantillons ont pour objectifs de mettre en évidence un éventuel caractère intrusif de la fibre optique pouvant entraîner un abatement des performances des structures mises en œuvre, et de démontrer l'aptitude des fibres optiques à réaliser des mesures fidèles des déformations de leurs structures hôtes.

### 2.1 Mesures sur échantillons plans

#### 2.1.1 Essais à rupture

Le caractère intrusif de la fibre optique est évalué par comparaison des limites à la rupture en traction uniaxiale de populations d'éprouvettes (avec ou sans fibres optiques) sollicitées dans le sens des fibres de renfort en carbone (orientation unidirectionnelle à 0°).

Les essais montrent une forte dispersion des contraintes et déformations à la rupture de chaque population d'échantillons : leur comparaison statistique ne permet pas de conclure au caractère intrusif de la fibre optique pour ce type d'essai (Figure 1).

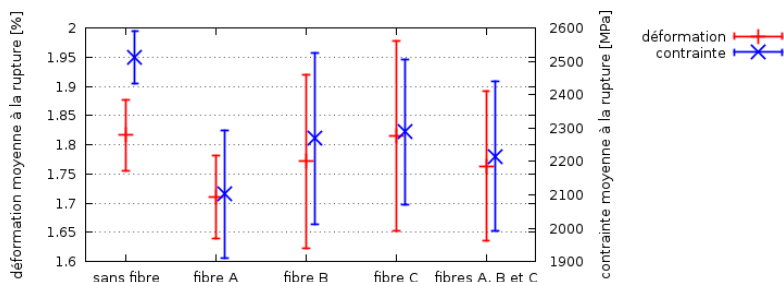


Figure 1 : contraintes et déformations à la rupture d'éprouvettes planes UD 0°.

### 2.1.2 Mesures in situ de déformations par fibres optiques à réseaux de Bragg

La mesure *in situ* des déformations est réalisée à l'aide de réseaux de Bragg, la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_{\text{Bragg}}$  caractéristique de chaque réseau étant corrélée à sa variation de déformation longitudinale  $\Delta\epsilon$  selon la relation :  $\Delta\lambda_{\text{Bragg}}/\lambda_{\text{Bragg}} = 0,78 \Delta\epsilon$  [6, 7].

On constate que la mesure de la déformation est fidèle à la déformation moyenne mesurée en surface tant que l'orientation des fibres de carbone est proche de la direction de l'effort, mais peut être significativement différente dès lors que les différences d'orientations sont marquées. On s'aperçoit aussi que la fibre optique survit aux ruptures des fibres de carbone en fournissant une mesure jusqu'à la rupture complète de l'échantillon (Figure 2).

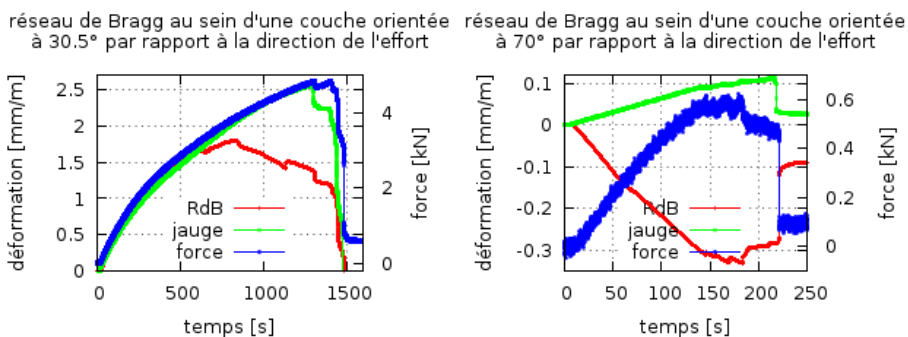


Figure 2 : mesures in situ par réseau de Bragg (RdB) et en surface par jauge électrique.

## 2.2 Essais de fatigue oligocyclique sur anneaux NOL

Les essais complémentaires de fatigue sur anneaux NOL [8] montrent quant à eux, quel que soit l'échantillon, des affaiblissements caractéristiques de ruptures de fibres de carbone. Une analyse en énergie souligne l'endommagement continu sous contrainte des anneaux, contrairement à une analyse fondée sur la seule mesure de l'amplitude des efforts, en particulier en démarrage d'essai (Figure 3).

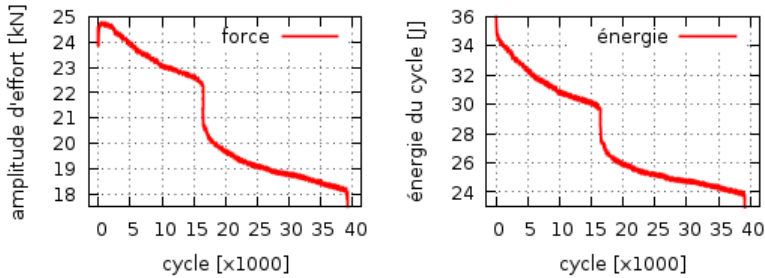


Figure 3 : interprétation en amplitude d'effort (figure de gauche) et en énergie de déformation (figure de droite) d'une courbe de fatigue à déplacement constant d'un anneau NOL.

Cette analyse en énergie permet de mettre en évidence le caractère absolu déterminant de la quantité d'énergie dissipée pendant les premiers cycles de fatigue sur la rapidité d'endommagement des anneaux lors des cycles suivants (Figure 4).

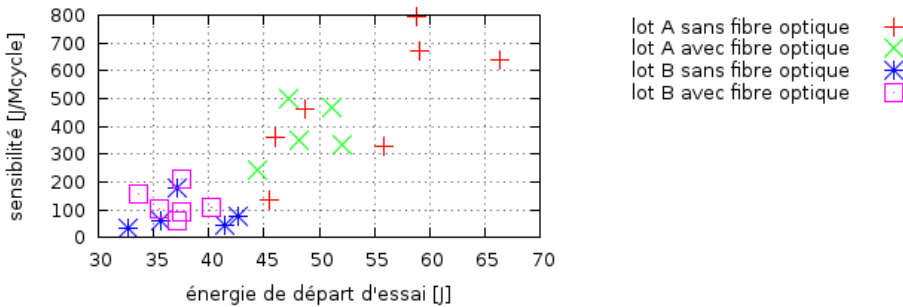


Figure 4 : sensibilité à l'endommagement des anneaux NOL en fonction de l'énergie initiale.

Un réglage précis des essais dans une même gamme d'énergie, compte tenu de la très grande rigidité des anneaux, aurait nécessité *a minima* de pouvoir disposer d'une machine de test pilotable en énergie (et non simplement en force ou en déplacement) : le caractère non intrusif de la fibre optique n'a donc pas pu être mis en évidence dans de telles conditions.

Des analyses sur échantillons confirment toutefois la parfaite intégration de la fibre optique aux anneaux, même après sollicitations mécaniques (Figure 5).

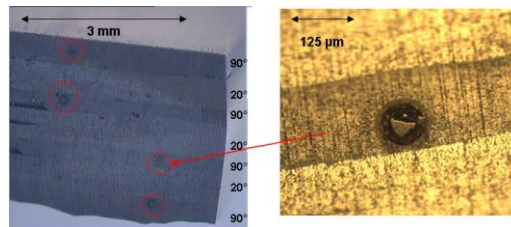


Figure 5 : analyse post-mortem d'un anneau NOL après un essai de fatigue : on n'observe pas de décohésion de la matrice ni de présence de défaut au voisinage des fibres optiques.

### 3. Mesures sur réservoirs et détection de défauts

Les mesures de déformation au sein des réservoirs sont réalisées par réflectométrie fréquentielle de Rayleigh (instrument Luna™ OBR-4600) : cette technique permet de disposer de plusieurs milliers de points de mesure sur des portées multi-décamétriques avec une résolution proche du  $\mu\text{m/m}$  [9].

#### 3.1 Caractéristique discriminante du défaut de structure

Le défaut de structure se caractérisant par un comportement mécanique local différent de son environnement supposé sain, il est possible, par un jeu de mesures différentielles, de faire apparaître ce défaut : la sollicitation homogène (sous pression hydrostatique) du réservoir, impose en effet qu'il se déforme en tout point proportionnellement à la pression.

On considère dès lors un "profil des écarts de déformations" (1) caractérisé par la différence de déformations, en tout point  $s$ , mesurées aux pressions  $P_A$  et  $P_B$  (en valeurs inférieures à la pression de service  $P_s$ ), moyennant un coefficient de proportionnalité  $K$ .

$$\text{profil}_{\{P_A, P_B\}}(s) = \Delta\varepsilon_{P_B}(s) - K_{\{P_A, P_B\}} \times \Delta\varepsilon_{P_A}(s) \quad (1)$$

Ce profil, calculé par minimisation au sens des moindres carrés, est centré sur zéro. Tout écart significatif par rapport à cette valeur traduit donc une "erreur" locale de comportement de la structure entre les deux paliers de pression, pointant la présence probable d'un défaut.

#### 3.2 Mesures sur réservoirs bobinés

Les mesures sur réservoirs confirment toutes le bien-fondé d'une formulation proportionnelle du profil (1) avec un écart typique de l'ordre de quelques  $\mu\text{m/m}$  pour un réservoir sain, celui-ci pouvant être bien plus important en présence de défaut (Figure 6).

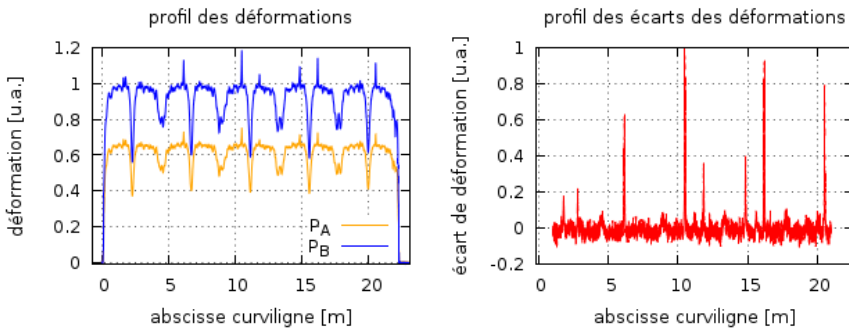


Figure 6 : mise en évidence de défauts de type entaille lors du timbrage (remplissage en eau).

La mesure étant aussi sensible à la température, la formulation (1) est à adapter pour qu'elle puisse convenir à un remplissage en hydrogène : la minimisation de cette fonction d'erreur faisant, par exemple, intervenir un terme correctif supplémentaire prenant en compte les effets thermiques du remplissage en gaz, pourra alors être considérée.

## 4. Conclusion

Les mesures profilométriques par fibres optiques au sein de réservoirs hautes pressions sont prometteuses pour une détection non invasive de leurs défauts de structure pourvu que ceux-ci se traduisent par une variation d'élongation sur la fibre optique de mesure : l'excellente résolution apportée par une mesure OFDR permet désormais de distinguer des défauts se traduisant par des écarts de déformations de quelques dizaines de  $\mu\text{m}/\text{m}$ , ce que ne permettent pas, à ce jour, les mesures réparties par analyse Brillouin.

L'intérêt de telles mesures ne réside pas tant dans le fait qu'elles se font à cœur du matériau avec un capteur solidaire à vie de la structure, mais aussi parce que la procédure de détection des défauts reposant sur l'interprétation d'un "*profil des écarts de déformations*" ne nécessite pas de solliciter le réservoir au-delà de sa pression de service, prévenant ainsi tout risque de sur-endommagement [10].

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier OSEO pour son soutien dans les travaux conduits à l'occasion de ce projet, ainsi que chacun des partenaires pour leur écoute, leur disponibilité et leur esprit constant d'innovation.

## Bibliographie

- [1] Anonyme. Air Liquide lance le programme Horizon Hydrogène Énergie (H2E). Communiqué de presse d'Air Liquide du 8 octobre 2008.
- [2] Queruel M, Valentin P. Hydrogen: from the lab to the real world. CEA News. 2012;(21):8-13.
- [3] Parlement Européen. Directive 97/23/EC du parlement européen et du conseil du 29 mai 1997 relative au rapprochement des législations des États membres concernant les équipements sous pression. JO L 181, 97/23/EC juill 9, 1997.
- [4] Bertin M, Villalonga S, Vernède M, Magnier C, Tissier P, Nony F. Mechanical behaviour of 700 bar type IV high pressure vessel: comparison between simulations and experiments through OSIRHYS IV project. 15<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials. Venice, Italy; 2012.
- [5] Ferdinand P, Dewynter V, Laffont G, Maurin L, Magne S, Roussel N, *et al.* La surveillance des structures composites par capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg. Revue des composites et des matériaux avancés. 25 mai 2007;17(2):217-226.
- [6] Ferdinand P. Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg. Techniques de l'Ingénieur; 1999.
- [7] Ferdinand P. Réseaux de capteurs à fibres optiques, Mesures et multiplexage. Techniques de l'Ingénieur; 2008.
- [8] ASTM Standard D2290 - 08 Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method. 2008;
- [9] Froggatt M, Moore J. High-Spatial-Resolution Distributed Strain Measurement in Optical Fiber with Rayleigh Scatter. Appl. Opt. 1 avr 1998;37(10):1735-1740.
- [10] Ramadan S, Yaacoubi S, Chauveau D. On the Potential use of Acoustic Emission Testing to Control Composite Tanks in Service Conditions. Proceedings of the 30<sup>th</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing & 7<sup>th</sup> International Conference on Acoustic Emission. University of Granada, Spain: Prof. Antolino Gallego, Prof. Kanji Ono; 2012.