



HAL
open science

Capteur de Pression à réseaux de Bragg pour l'Elaboration Intelligente de pièces structurales Composites -Le projet ELICo-CP

Laurent Maurin, Pierre Ferdinand, Laurent Robert, Jean-José Orteu

► To cite this version:

Laurent Maurin, Pierre Ferdinand, Laurent Robert, Jean-José Orteu. Capteur de Pression à réseaux de Bragg pour l'Elaboration Intelligente de pièces structurales Composites -Le projet ELICo-CP. 12ème Colloque international francophone du club CMOI/SFO méthodes et techniques optiques pour l'industrie, Nov 2011, Lille, France. 8 p. hal-01771335

HAL Id: hal-01771335

<https://hal.science/hal-01771335>

Submitted on 22 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.

Capteur de Pression à réseaux de Bragg

pour l'ÉLaboration Intelligente de pièces structurales Composites

- Le projet ELICo-CP -

L. Maurin⁽¹⁾, P. Ferdinand⁽¹⁾, L. Robert⁽²⁾, et J.-J. Orteu⁽²⁾

⁽¹⁾ CEA, LIST, Laboratoire de Mesures Optiques, Boîte courrier 94, F-91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

⁽²⁾ Université de Toulouse, Mines Albi, ICA (Institut Clément Ader), Campus Jarlard
F-81013 Albi cedex 09, France

Contact : laurent.maurin@cea.fr – Tél. : +33 (0)1 69 08 44 24 – Fax : +33 (0)1 69 08 83 95

Mots-clés : Matériaux composites, outillage, fibre optique, réseau de Bragg, capteur de pression de contact, suivi de fabrication, autoclave, RTM.

1. Introduction

Les pièces structurales réalisées en matériaux composites revêtent une importance accrue dans les structures primaires aéronautiques, leur pourcentage en masse étant passé de 5 % sur l'A300 à plus de 15 % sur l'A380 et 53 % pour le futur A350XWB. Pour l'avenir, des pièces multi-technologies intégrant des sous-ensembles composites sont en développement comme les portes, le fuselage ... De fait, de plus en plus de pièces de structures primaires sont ou seront réalisées en composites lors des prochaines générations de porteurs et de gros porteurs. Parmi ces pièces innovantes, on peut citer la poutre ventrale de l'A340-500, le caisson central de voilure de l'A380, et bien sûr, le fuselage de l'A350 qui constituent des premières mondiales en termes de pièces composites fortement chargées¹.

La structure de coût d'une pièce primaire se scinde approximativement en : 30 % (matière), 65 % (procédé), et 5 % (contrôles, CND). Dans une perspective de validation et d'un meilleur contrôle de fabrication fondé sur l'acquisition de paramètres procédés, il est envisageable, par l'utilisation de la Maîtrise Statistique des Procédés (MSP²), de réduire le CND (gain 5 %) et la réalisation d'éprouvettes suiveuses ainsi que leur caractérisation (gain : 6 à 10 %) donc, *in fine*, obtenir un gain global voisin de 12 % dans le coût des pièces. Ainsi, étant donnée l'importance croissante des coûts consacrés aux contrôles de la santé des pièces, il devient stratégique de disposer d'un système de surveillance et de maîtrise de leur procédé d'élaboration. En effet, s'il était autrefois possible de rebuter une pièce de qualité douteuse, aujourd'hui de telles incertitudes sur sa santé ne sont plus admissibles dans la mesure où les panneaux -pouvant atteindre 7 x 4 m² avec des zones allant jusqu'à 160 plis-, sont *de facto* très coûteux. Dès lors, les recherches permettant de garantir une maîtrise optimale des procédés de fabrication apparaissent comme indispensables, en particulier pour accroître la robustesse des cycles de polymérisation.

L'instrumentation des outillages par des Capteurs à Fibres Optiques (CFO) permettant d'enregistrer localement les conditions de pression et de température est une des voies privilégiées pour accéder à ces informations locales. Le surcoût induit par l'intégration de l'instrumentation devrait être rapidement amorti par les gains de productivité et la réduction des coûts du CND qui pourrait être

¹ Le nombre de pièces composites fabriquées par an par Airbus est considérable : 4500 ailerons, trappes, radômes ; 400 poutres centrales, cornières ; 180 panneaux auto-raidis. Ce nombre va croître de manière importante avec l'arrivée de l'A350 et l'A400M. La production de ces pièces fait appel à deux procédés majeurs : la cuisson en autoclave de préimprégnés carbone/époxy et l'injection de résine sur structure sèche (RTM : *Resin Transfer Molding*).

² MSP : Maîtrise Statistique des Procédés – Normes AFNOR NF-X-06-031 à NF-X-06-034.

partiellement et progressivement remplacé par un suivi MSP des données des paramètres de fabrication.

Dans ce contexte, le projet ANR ELICo-CP a consisté à développer un capteur de pression de contact³ à réseaux de Bragg (RdB) faiblement intrusif, destiné à être intégré dans des moules et outillages de fabrication de pièces composites adaptés aux *process* de type RTM (*Resin Transfer Molding*) et autoclave, principalement dans les zones d'incidents géométriques de forme, comme par exemple au niveau des faibles rayons de courbure.

2. Contexte technologique et innovations

La contrainte dimensionnelle liée au positionnement d'un capteur dans les congés de raccordement (de rayons de courbure inférieurs à 4 mm) impose de recourir à une surface sensible très réduite, placée au contact des pièces à surveiller, limitant d'autant la sensibilité de la mesure de pression. Rappelons que dans ces domaines de fabrication des matériaux composites, la gamme de pression s'étend typiquement sur une dizaine de bar, sachant que l'objectif prescrit porte sur une résolution d'incrément de pression de l'ordre de 0,1 bar. Précisons également que la plupart des procédés de cuisson concernés imposent de disposer d'un capteur soutenant, en continu, des températures parfois supérieures à 200°C (jusqu'à 240°C en pointe).

Il apparaît que les quelques capteurs de pression du commerce potentiellement utilisables, de type piézoélectrique ou piézorésistif, présentent soit un diamètre trop important, soit montrent une dérive inacceptable, ou bien encore ne supportent pas de telles températures en continu. D'autre part, la mesure simultanée de la pression et de la température n'est que rarement disponible (en général seule la question de la compensation thermique est traitée). Enfin, il s'agit principalement de capteurs de pression de type hydrostatique ne pouvant plus fournir de mesures fiables dès que la résine n'est plus fluide. Par contre, les transducteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg (RdB) offrent quant à eux l'avantage d'être peu intrusifs, sensibles aux déformations et à la température : conditionnés de façon adéquate, ils peuvent dès lors être noyés au sein des outillages de fabrication (concept dit de « *smart manufacturing* » dans la littérature anglo-saxonne).

Dans ce projet, l'innovation scientifique et technique sous-jacente au développement du mini-capteur de pression de contact à RdB, repose sur la miniaturisation du capteur et la compensation thermique du transducteur de pression à RdB. Le CFO présente ainsi une partie sensible de 3 mm de diamètre, affleurante à la surface de l'outillage, autorisant de fait des mesures dans les congés de raccordement des outillages sans nuire significativement à la géométrie des pièces fabriquées.

Le projet a conduit, par ailleurs, à mettre au point un outillage permettant la fabrication "à façon" de pièces composites de géométries plus ou moins complexes (RTM et autoclave), avec des congés de raccordement, et de procéder à des mesures comparatives par rapport à des capteurs du commerce en pression et en température [2].

3. Développement du capteur et essais en laboratoire

La mesure de pression de contact doit être réalisée dans des cavités ou bien des zones de faibles rayons de courbure. Une mesure représentative impose un capteur miniature, d'un diamètre de surface sensible inférieur aux rayons de courbure usuels, typiquement inférieur à 3 mm. Rappelons qu'une variation de la pression de contact de $\delta P = 0,1$ bar appliquée sur un corps d'épreuve massif en acier (module d'Young $E \approx 210$ GPa) conduit à une très faible déformation $\delta \varepsilon \approx 0,048$ $\mu\text{m}/\text{m}$, généralement noyée dans l'incertitude de mesure, indépendamment de la technique de mesure utilisée (Cf. figure 1).

³ Il ne s'agit pas d'un capteur de pression « hydrostatique » mais bien d'un capteur de pression « de contact » placé à l'interface outillage / pièce.

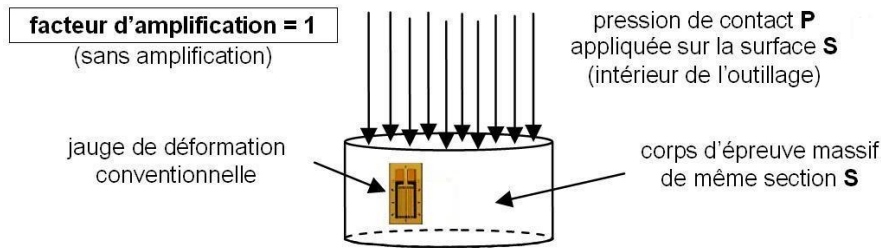


Figure 1 Principe de mesure sans mécanisme d'amplification (d'après [2]).
*Reprinted from Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011
 Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.*

Deux options principales permettent de satisfaire à ce besoin de sensibilité accrue :

1. utiliser un mécanisme de type “bras de levier” pour amplifier les déformations mécaniques du corps d'épreuve mesurées par le transducteur RdB,
2. utiliser un corps d'épreuve avec un matériau présentant un plus faible module d'Young permettant, pour une même section du corps d'épreuve, d'atteindre des niveaux de déformations plus importants,

et ce, tout en gardant en mémoire la contrainte de température élevée inhérente au procédé de fabrication du composite : jusqu'à $\sim 200^{\circ}\text{C}$ pendant plusieurs heures.

La solution choisie a consisté à utiliser un corps d'épreuve tubulaire (diamètre extérieur $\varnothing 0,8$ mm) équipé de deux RdB transducteurs, et une plus grande surface sensible S en contact avec la pression P à mesurer, conduisant à un facteur d'amplification de la déformation longitudinale supérieur à 14, et une sensibilité $\delta\varepsilon/\delta P$ proche de 7 ($\mu\text{m}/\text{m}$)/bar malgré une surface de contact d'un diamètre inférieur à 3 mm, dimension maximale autorisée pour ce type de capteur (Cf. figure 2).

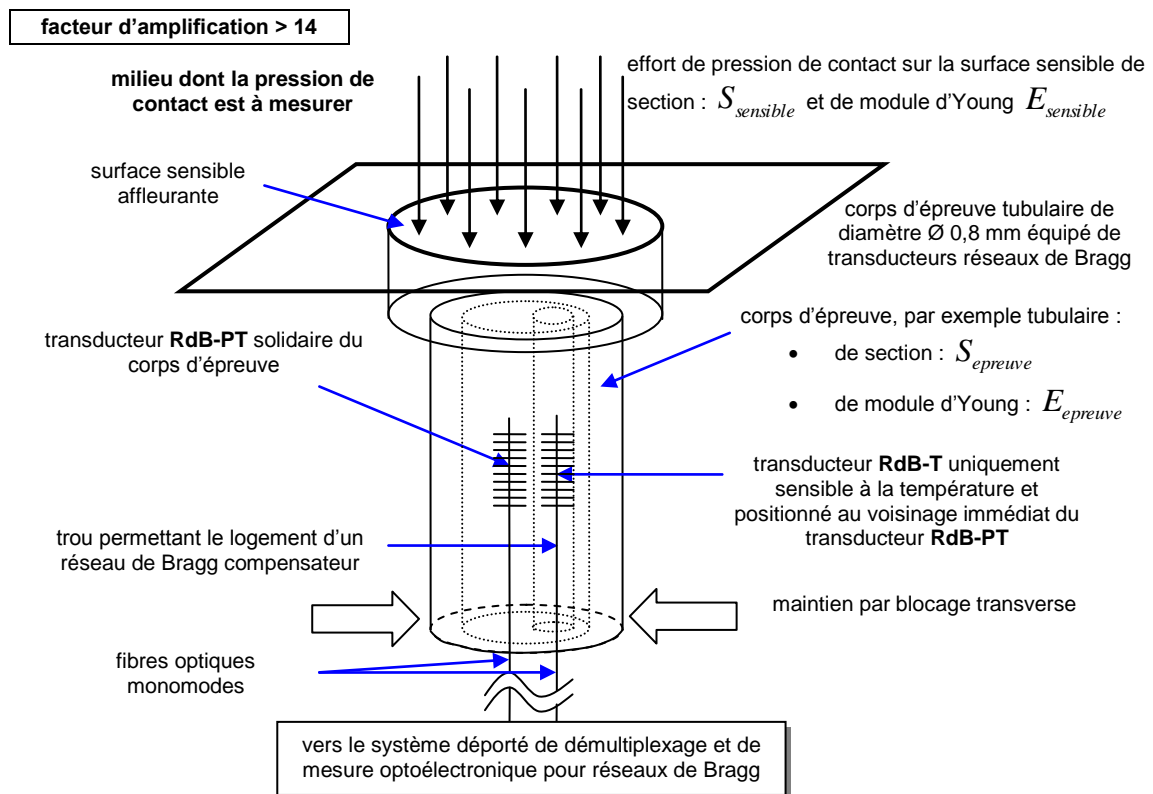


Figure 2 Principe de mesure de pression de contact utilisé pour le projet ELICo-CP.

Les transducteurs à RdB sont en effet très bien adaptés à cette problématique : ils peuvent s'insérer facilement dans le corps d'épreuve tubulaire, et lui être solidarisés pour des mesures de déformations mécaniques. De plus, des transducteurs de Bragg supplémentaires RdB-T peuvent être insérés au contact du transducteur principal RdB-PT afin d'assurer une compensation en température⁴ optimale : celle-ci est d'ailleurs essentielle pour la réalisation de mesures précises (Cf. figure 3).



Figure 3 Corps d'épreuve cylindrique développé au cours du projet ELICo-CP avec transducteurs RdB pour la mesure de déformations et la compensation en température (d'après [2]).
*Reprinted from Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011
 Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.*

L'assemblage mécanique du capteur conduit à un dispositif miniature qui peut facilement s'insérer dans un moule pour la mesure de pression de contact (Cf. figure 4). Ce capteur fournit deux types d'informations :

1. les variations de température, grâce au transducteur RdB-T assurant également la compensation en température,
2. la pression de contact sur la surface sensible du capteur, grâce au transducteur RdB-PT dont la mesure aura été compensée des effets thermiques, pression qui peut être :
 - a. la pression hydrostatique si le matériau (résine époxy) est fluide,
 - b. la pression de contact en présence d'un mélange solide / liquide, ou en présence d'un solide.

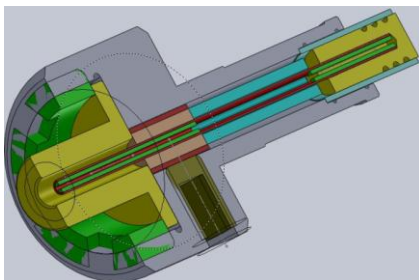


Figure 4 Capteur de pression de contact ELICo-CP.

Ce prototype a été préalablement qualifié en laboratoire, la procédure correspondante consistant à déposer des poids calibrés sur sa surface sensible, la relation d'équivalence entre la pression de contact P et la masse m s'exprimant par la relation :

$$P = \frac{4mg}{\pi\Phi^2} \quad \text{avec } \Phi : \text{diamètre de la surface sensible (g} = 9,81 \text{ m/s}^2\text{)}$$

⁴ On rappelle que les Réseaux de Bragg (comme toute fibre optique), sont sensibles à la fois aux déformations et à la température.

Les données expérimentales, à température ambiante, montrent une grande sensibilité en pression, compatible avec la résolution en pression de contact de 0,1 bar envisagée, tributaire bien naturellement de la résolution spectrale du système de mesure pour RdB utilisé (Cf. figure 5).

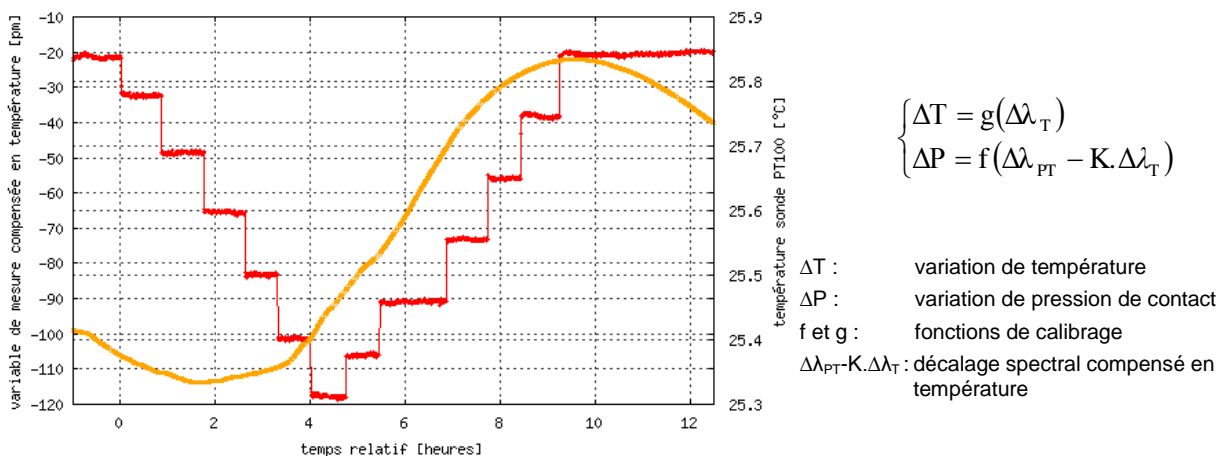


Figure 5 Tests en laboratoire avec des poids appliqués sur la surface sensible du capteur pour simuler une pression de contact équivalente. En rouge : échelons de 1 bar de pression. En jaune : évolution de la température pendant l'expérience

Un phénomène d'hystérésis, proche de 10 % de la pleine échelle, a été constaté (Cf. figure 6). Il semble reproductible cycle après cycle. Celui-ci pourrait être dû à une friction entre la partie sensible du capteur et le corps du capteur lui-même.

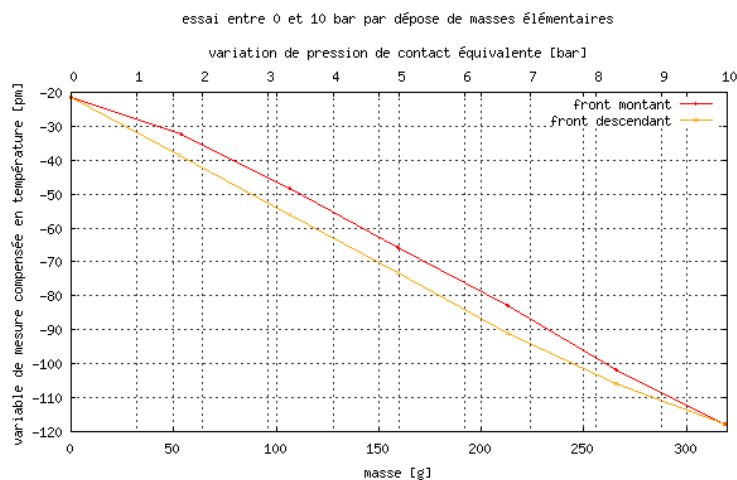


Figure 6 Mise en évidence d'un phénomène d'hystérésis dans la courbe de réponse du capteur.

4. Evaluation du capteur inséré dans un moule RTM

Conjointement, un démonstrateur a été spécialement conçu et mis en place pour évaluer *in situ* les performances du capteur en développement. Ce banc de test expérimental concerne le procédé RTM (*Resin Transfer Molding*). Un moule RTM dédié a donc été développé et instrumenté avec le nouveau capteur à RdB, ainsi qu'avec des capteurs complémentaires, à savoir : un capteur de pression conventionnel fondé sur des jauges de déformations (XPCM10 de FGPSensors®) et des sondes PT100, à des fins de comparaison.

La figure 7 présente ce démonstrateur expérimental. Le moule, posé sur une table chauffante, est connecté à une unité d'injection de résine, qui permet d'imposer des échelons de température et de

pression. Bien que ce moule soit destiné à la production de pièces composites par injection, pour l'étude préliminaire rapportée dans cet article, nous y avons seulement injecté de l'air sous pression.

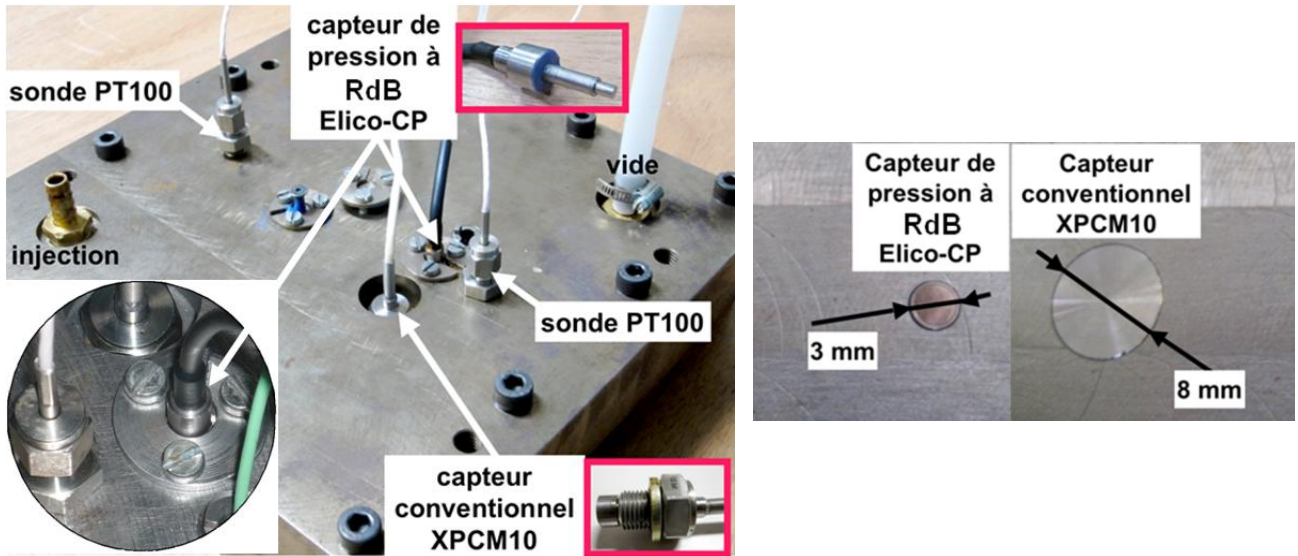


Figure 7 Démonstrateur RTM développé pour évaluer les performances du capteur. A gauche, l'extérieur du moule instrumenté. A droite, les deux capteurs de pression affleurant la surface intérieure du moule (d'après [2]).

*Reprinted from Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011
Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.*

Calibrage en température *in situ*

La figure 8(a-b) présente les variations de longueur d'onde des deux transducteurs RdB-PT et RdB-T en fonction de la température mesurée durant un cycle thermique. On constate que les réponses sont, d'une part, légèrement non-linéaires, et d'autre part, légèrement différentes selon que l'on considère une augmentation ou une baisse de la température (hystérésis).

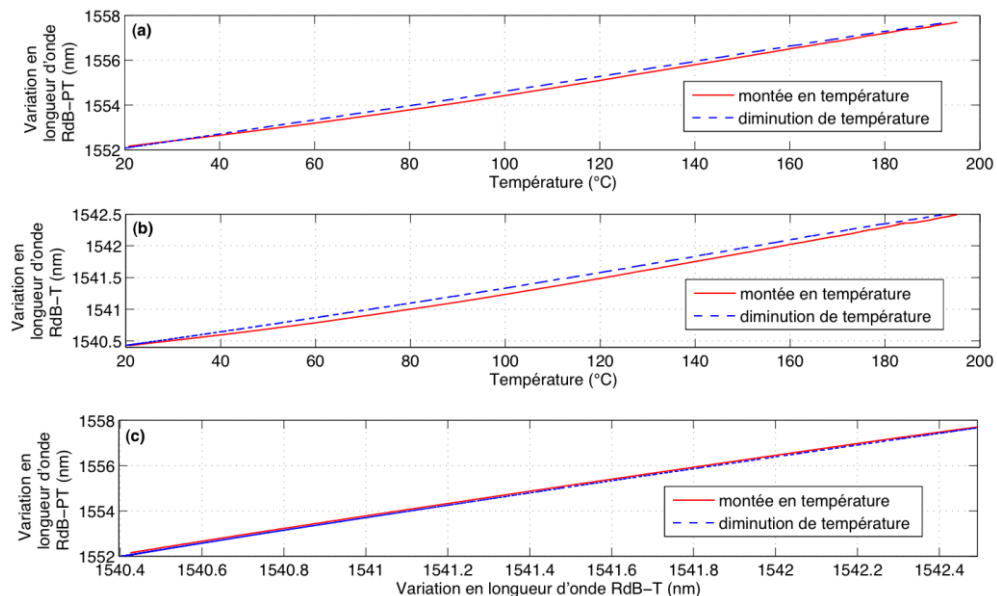


Figure 8 Calibrage en température *in situ* (d'après [2]).
*Reprinted from Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011
Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.*

Néanmoins, la figure 8(c) montre que les RdB présentent un comportement en température équivalent, et fournissent donc une mesure correctement compensée thermiquement. Une régression linéaire fournit une sensibilité égale à 2,66 nm/nm pour une augmentation de température et de 2,75 nm/nm pour une diminution de température. Si nécessaire, une interpolation d'ordre supérieur peut être utilisée pour conduire à une meilleure approximation des données.

Calibrage en pression *in situ*

Le calibrage en pression a été effectué tout d'abord à température ambiante, par des montées et des descentes de pression, pas-à-pas, comme le montre la figure 9.

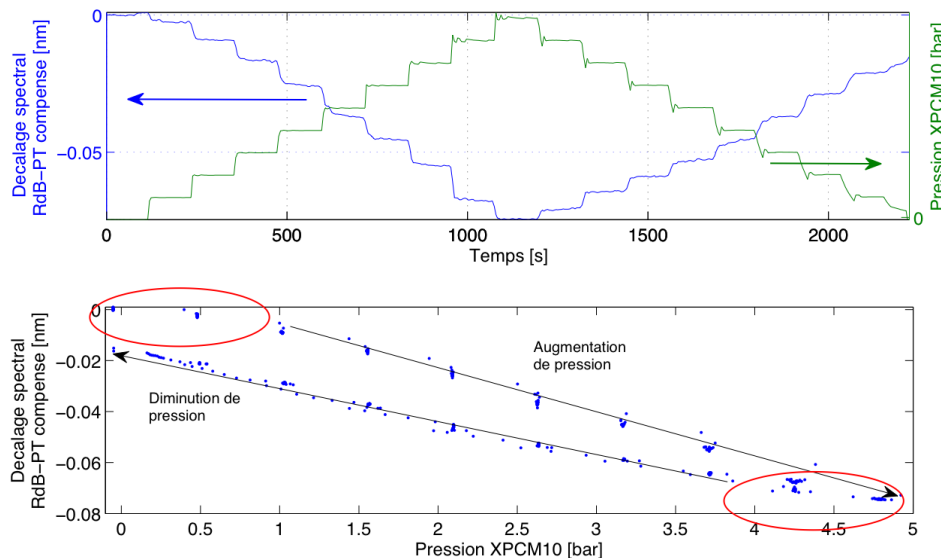


Figure 9 Calibrage en pression *in situ* (d'après [2]).

Reprinted from Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011
Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.

La plage de pression s'étend de 0 à 5 bar et les échelons de pression sont de l'ordre de 0,5 bar. La figure 9 montre que les variations de pression sont relativement mal détectées au début des montées et des descentes de pression (Cf. ellipses rouges sur la figure 9). Sans tenir compte de ces données, une réponse quasi-linéaire est obtenue à la fois pour les montées et les descentes en pression, avec des sensibilités estimées à - 18 pm/bar et - 16 pm/bar respectivement. Cela conduit à un phénomène d'hystérésis, discuté précédemment, évalué de l'ordre de 10 % de la pleine échelle et toujours présent sur chacun des essais que nous avons menés.

5. Conclusion

Un capteur de mesure simultanée de la pression de contact et de la température, par transducteurs à fibre optique à réseau de Bragg, a été développé spécifiquement pour des applications d'instrumentation pour le suivi des procédés de fabrication de pièces en matériaux composites. Il n'existait pas jusqu'alors de capteur équivalent en terme de miniaturisation pour l'intégration dans les outillages métalliques de mise en forme des composites.

Le mécanisme de transduction de ce nouveau type de CFO à RdB intègre un micro-dispositif d'amplification mécanique des déformations appliquées au RdB de mesure de pression [1], ce qui conduit à une mesure très sensible capable de résoudre localement 0,1 bar de pression de contact entre 0 et 10 bar. Ce capteur, qui bien que souffrant encore dans sa version prototype actuelle d'un hystérésis

d'une dizaine de pourcents, est en mesure de fonctionner à des températures continues supérieures à 200°C.

Il nous semble que, du fait de ses propriétés métrologiques spécifiques (grande sensibilité, insensibilité aux variations d'intensité, mesures différentielles compensant les effets thermiques, capacité de déport et de multiplexage, insensibilité aux perturbations électromagnétiques ...) et de son potentiel d'intégration, cette nouvelle technologie de capteurs de pression de contact à RdB, utilisée de façon adéquate (positionnés en surface des outillages au niveau de ses incidents géométriques, donc non intrusifs pour les pièces à réaliser) pourrait permettre d'améliorer la qualité des pièces composites réalisées, ainsi que la rentabilité des procédés.

En effet, le besoin pour les utilisateurs finaux porte sur l'amélioration des processus de fabrication de pièces coûteuses, de haute technologie et destinées à des besoins où la qualité est le maître mot, soit pour des applications structurelles aéronautiques et spatiales (composites à matrice organique), soit pour des applications en propulsion spatiale et moteurs aéronautiques (composites thermo-structuraux pour les hautes températures).

De fait, le capteur de pression développé, associé à des capteurs de température également de type RdB, permettra d'acquérir des informations lors des cycles de polymérisation. Les objectifs, à terme, pourraient consister à doter les unités de production de capteurs de contrôle en temps réel du procédé pouvant s'intégrer dans un système de surveillance plus vaste, afin de garantir la reproductibilité des pièces, contrôler en temps réel et *in situ* les dérives du procédé ou lors de changement de lot de matière première, vérifier que la cuisson s'est effectuée localement dans les tolérances admissibles, anticiper des zones éventuelles de non-conformité, et disposer d'un outil d'aide à la décision en cas d'incident de cycle.

A plus long terme, ce type d'instrumentation permettra le pilotage « intelligent » des autoclaves, afin d'optimiser les propriétés par zones, en tenant compte des grandes variations de forme et de géométrie des pièces ainsi que des inerties thermiques variables des outillages. Ce type d'instrumentation pourra aussi être appliqué au procédé RTM, et sera également nécessaire pour l'émergence et la maturation de nouveaux procédés hors autoclave (type infusion de résine).

6. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Nationale de la Recherche, pour le soutien apporté à ce projet ELICo-CP, soutenu dans le cadre de la Convention ANR 2007 P2IC 003, et plus particulièrement M^{me} S. Niessen et M. J.-C. Grandidier pour leur aide et commentaires constructifs.

7. Bibliographie

1. L. Maurin, L. Robert, A. Hamasaid, P. Ferdinand, et J.-J. Orteu, "*Dispositif de mesure combinée de pression et de température faiblement intrusif* ", demande de brevet français N°1053074, 22 avril 2010
2. L. Maurin, P. Ferdinand, L. Robert, and J.-J. Orteu, "*Development of an integrated Fiber Bragg Grating contact pressure and temperature sensor for composite smart manufacturing*", Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring, 13-15 Septembre 2011, Stanford, CA (USA), Structural Health Monitoring 2011, Volume 2, pp 1449-1456, édité par Fu-Kuo Chang, DESTech publications Inc., <http://www.destechpub.com/>, ISBN 978-1-60595-053-2