



HAL
open science

Conception optimale de structures composites par instrumentation à cœur et identification multi-échelle

Francis Collombet, Matthieu Mulle, Yves-Henri Grunevald, Redouane Zitoune, Benjamin Trarieux

► **To cite this version:**

Francis Collombet, Matthieu Mulle, Yves-Henri Grunevald, Redouane Zitoune, Benjamin Trarieux. Conception optimale de structures composites par instrumentation à cœur et identification multi-échelle. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812984

HAL Id: hal-01812984

<https://hal.science/hal-01812984>

Submitted on 12 Jun 2018

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

Conception optimale de structures composites par instrumentation à coeur et identification multi-échelle

**Francis Collombet¹, Matthieu Mulle^{1 2}, Yves-Henri Grunevald²
Rédouane Zitoune¹ et Benjamin Trarieux¹**

¹Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, équipe PRO²COM
I.U.T. P. Sabatier, dépt. GMP, 133c av. de Rangueil, BP 67701, 31077 Toulouse
cedex 4
prenom.nom@iut-tlse3.fr

²DDL Consultants, Pas de Pouyen, 83330 Le Beausset

RÉSUMÉ. L'utilisation des démonstrateurs technologiques présente l'intérêt de placer la matériau composite dans les conditions représentatives des choix conceptuels. Un démonstrateur de type poutre est étudié dans le cas d'une sollicitation de flexion trois points. Des capteurs de fibres optiques à réseaux de Bragg sont utilisés pour identifier des relations entre la réponse mésoscopique et structurelle. L'analyse des propriétés matériaux dans une pièce nécessite de faire face aux problèmes numériques associés du calcul de structure. On présente un modèle E.F. capable de restituer une réponse de structure - en tenant compte des conditions pratiques du croisement calcul/expérience. Les propriétés matériaux ont été ajustées dans le cadre d'une approche multiéchelle itérative par comparaison des mesures et des résultats numériques. L'analyse physique des phénomènes liés à l'élaboration des pièces composites rend crédible les résultats de l'approche itérative proposée.

ABSTRACT. The use of technological demonstrators has an interest to place composite material under conditions which are representative of conceptual choices for the real structure. A beam demonstrator is presented for a three points bending loading. The embedded optical fibres with Bragg gratings are used in order to identify relations between mesoscopic and structural behaviour. To analyze the material properties within a structure means to face the associated numerical problems of the stress analysis. A FE model is discussed to reproduce a response of structure by taking into account of the practical conditions of a crossing calculation/experience. The material properties within the structure have been fitted to put in agreement measurements and the FE results on the different scales. The physical analysis of the composite material makes credible the results of the fitting approach by numerical iterations.

MOTS-CLÉS : composites, conception, Fibre optique à Réseaux de Bragg, calcul de structure, identification de propriétés matériaux.

KEY WORDS: composites, design, Fibre with Bragg Gratings, stress analysis, identification of material properties.

1. Introduction

Il est reconnu que le matériau composite n'existe qu'au sein de la structure industrielle. Cependant l'identification des propriétés "matériau" est généralement réalisée à l'aide d'éprouvettes élémentaires qui ne restituent pas totalement la réalité du matériau composite et notamment l'influence des conditions d'élaboration pour des choix conceptuels et des conditions de travail donnés. L'utilisation de démonstrateurs technologiques présente l'intérêt de placer le matériau composite dans des conditions représentatives de la structure réelle (prises de plis, bords libres, fortes épaisseurs, ...). Une famille de 48 démonstrateurs technologiques de type "poutre" est obtenue par découpe jet d'eau à partir de plaques "mère", réalisées par dépose manuelle de pré-imprégné UD M21/35 %/268/T700 GC (produit fourni par Hexcel Composites et utilisé pour la fabrication du caisson central de l'A380) puis polymérisées en autoclave. La moitié de ces structures disposent d'une instrumentation à cœur réalisée à l'aide de fibres optiques à réseaux de Bragg (capteurs sensibles à la fois à la déformation longitudinale, la température et la pression transverse). Les poutres "démonstrateur" de 30 mm de large sont constituées d'une zone centrale de 28 plis, entourée de deux zones courantes ou latérales de 20 plis (cf. Figure 1). Les échantillonnages (respectivement les pourcentages de plis à 0°, +/- 45°, 90°) sont choisis pour correspondre à ceux qualifiés en fatigue pour des structures aéronautiques. Les démonstrateurs sont sollicités en flexion trois points sur une portée de 250 mm. Il s'agit de rapprocher des mesures expérimentales aux échelles respectivement, mésoscopique (la déformation longitudinale fournie par les capteurs) et structurelle (la force résultante appliquée sur le démonstrateur pour un déplacement donné) avec des informations issues d'un modèle numérique pour une flèche imposée de 8 mm.

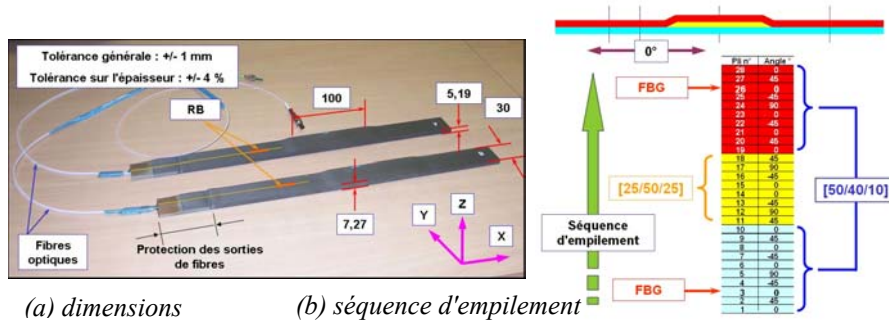


Figure 1. Démonstrateurs instrumentés par fibres optiques à réseaux de Bragg

2. Intégration de l'instrumentation dans la boucle de conception

2.1 Principes généraux

A la différence de la solution métallique, la solution composite autorise la mise en place d'une instrumentation à cœur au moment la phase de fabrication. Placée à cœur, cette instrumentation est - de facto - protégée des agressions extérieures à la pièce. Le développement de pièces instrumentées n'est pas une fin en soi. Elle doit

apporter une valeur ajoutée du point de vue économique et scientifique. Elle renseigne le concepteur sur l'aptitude de la structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue sur toute sa plage de vie. Le placement des capteurs et leur nombre dépendent de la nature des informations souhaitées. Il peut s'agir d'identifier les propriétés mécaniques du matériau composite au sein de la structure ou de détecter la présence d'un défaut et son niveau de "criticité" (délaminage, fissuration ...). Dans ces conditions le fonctionnement doit pouvoir être garanti jusqu'à la rupture de la pièce. En statique, la déformation longitudinale maximale d'une fibre optique dans la zone capteur est supérieure ou égale à 1.10^{-2} . Cette valeur pouvant être inférieure aux valeurs limites d'un stratifié carbone époxy, il est pertinent de placer le capteur dans l'une des directions principales des contraintes. De plus pour les capteurs, il faut éviter a priori de choisir des zones où les flux d'efforts sont les plus importants et/ou les risques d'apparition de dommage sont les plus grands. Des zones "sûres" doivent donc être identifiées, voire prévues, dans la phase de conception du système composite étudié. De plus, les contraintes économiques et techniques (notamment liées à la phase de fabrication des structures) sont des raisons qui incitent à utiliser un nombre réduit de capteurs. Le choix du placement des capteurs est un compromis équitable entre l'art de l'ingénieur et l'aide d'un modèle numérique restituant des informations dont la précision est du même ordre de grandeur que la mesure.

2.2 Cas des démonstrateurs étudiés

Il y a un intérêt évident à placer la fibre optique parallèlement aux fibres et à une abscisse garantissant l'intégrité du capteur jusqu'à la ruine du démonstrateur. La stratégie développée dépend des conditions d'usage de la structure étudiée. Comme on le montre sur la figure 1b, le choix des plis N° 3 et N° 26 est naturel car ils sont les plus éloignés du plan moyen des démonstrateurs (accroissement de la sensibilité). Ici, il s'agit de plis à 0° parce que l'éprouvette est sollicitée en flexion.

De plus, ils sont placés volontairement entre deux plis dont la direction des fibres est à $+ ou - 45^\circ$ (cf. Figure 2 ci-contre).

On contrôle la position des fibres optiques - à l'endroit des réseaux de Bragg - dans l'épaisseur de la plaque, en limitant leur migration durant la phase de cuisson. L'encombrement des fibres optiques nues est défini par un diamètre de $125 \mu\text{m}$ pour une épaisseur moyenne du pli de $264 \mu\text{m}$. Leur position est connue à $+ ou - 70 \mu\text{m}$.

3. Modèle numérique

Par construction, analyser les propriétés matériaux au sein d'une structure oblige à affronter les classes de problèmes numériques associés. Nous proposons un modèle numérique simple qui restitue de façon satisfaisante une réponse de

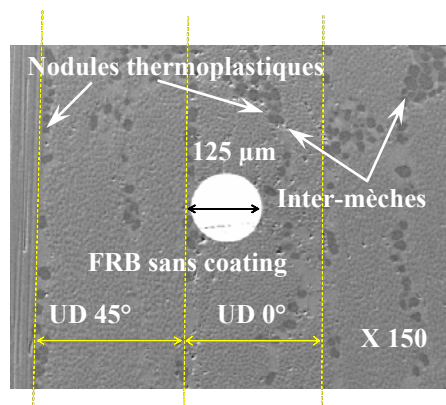


Figure 2. Position des fibres à RB dans l'épaisseur des démonstrateurs

structure. Cette démarche doit tenir compte des conditions pratiques à réunir pour effectuer un croisement calcul/essai, à l'aide de mesures tirées d'une instrumentation à cœur. La figure 3 présente les conditions de représentation numérique des démonstrateurs technologiques dans une configuration de flexion trois points. Nous utilisons des éléments de volume composite de type 11 au degré 2, disponibles dans la bibliothèque du code Samcef. Le modèle comporte 1040 éléments représentant 14702 degrés de liberté. Chaque élément de la demi peau (inférieure ou supérieure) contient 10 plis et les éléments de la zone à cœur (cf. Figure 4a) représentent 8 plis. La zone riche en résine à l'extrémité de la prise de plis n'a pas été représentée (cf. Figure 4b). En effet, il n'est pas possible d'utiliser l'élément de volume composite pour représenter un prisme composite. Ce type d'élément existe dans la bibliothèque de Samcef mais il n'est utilisé car il ne peut pas être placé dans le sens de l'empilement des couches. La taille des éléments est de 3 mm sur X, 6 mm sur Y. Sur Z on a respectivement, 2,6 mm sur les zones plates et 2,1 mm dans la prise de plis. Il existe donc un rapport de 3 entre les dimensions des éléments volumiques. On a 5 éléments dans la largeur afin de disposer de la rangée centrale correspondant au placement des fibres optiques dans les démonstrateurs instrumentés (cf. Figure 4c).

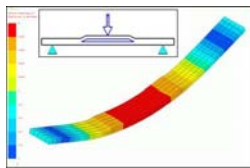


Figure 3. Maillage des démonstrateurs

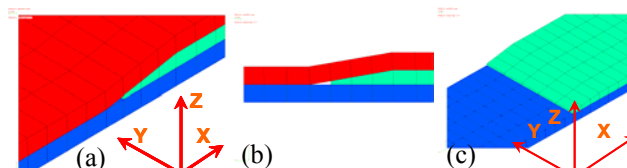


Figure 4. Détails (a), (b) et (c) du maillage des démonstrateurs

Le chargement s'effectue à l'aide de conditions en déplacement imposé (ou en force imposée) sur les nœuds qui sont situés sur une ligne correspondant au contact entre la machine d'essai et le démonstrateur. L'écart relatif entre ces deux conditions de chargement - pour les résultats en déplacement - est de l'ordre de 0,2 %. On note la manifestation d'un léger effet de flexion anticlastique lorsqu'on modélise le contact entre le rouleau cylindrique de la machine d'essai et le démonstrateur (cf. Figure 6). Dans ce cas, seuls les efforts appliqués aux nœuds - situés sur les bords du démonstrateur - sont égaux à zéro, du fait de la perte locale de contact. L'hypothèse de poutre reste correcte.

4. Données d'entrée du calcul de structure

Les dimensions des 48 démonstrateurs sont mesurées (cf. Figure 1a). L'épaisseur moyenne du pli (calculée pour chacun des démonstrateurs) varie de 0,262 à 0,265 mm pour une valeur moyenne générale de 0,264 mm (à comparer à la valeur de 0,260 mm donnée par le fabricant Hexcel Composites). C'est un écart faible puisqu'il est de l'ordre de 4 microns. La tolérance nécessaire pour englober 99 % de la population de démonstrateurs est de 0,147 mm ce qui atteste d'une fabrication de structures de qualité aéronautique (Esquer, 2002). Cependant elle est suffisante pour faire passer le taux volumique de fibres V_f de 58 % (valeur fabricant) à 57 %. Les

caractéristiques mécaniques corrigées à partir de la loi des mélanges sont présentées dans le tableau 1. La masse volumique du stratifié est basée sur l'hypothèse que le volume de porosité V_v est égal à 0,5 % (crédible car fabrication en autoclave).

	V_f (%)	E_{11t} (GPa)	E_{11c} (GPa)	$E_{22t} = E_{33t}$ (GPa)	$E_{22c} = E_{33c}$ (GPa)	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	ρ (kg/m ³)
Données de référence	58	141,9	114,3	8,4	10,5	4,6	1564
Données corrigées	57	139,5	112,5	8,2	10,3	4,5	1559

Tableau 1. Caractéristiques du matériau de référence et données corrigées

On note que la valeur corrigée de la masse volumique est égale à 1559 kg/m³ et ne correspond pas à celle évaluée en moyenne sur 14 démonstrateurs, soit 1524,4 kg/m³. Cela représente une diminution de 2,2 %. Cette variation de masse volumique ne peut être attribuée à la présence d'une porosité élevée (elle serait alors de l'ordre de 5 %) compte tenu des conditions de fabrication en autoclave et des contrôles effectués après cuisson. Nous pensons qu'il s'agit du rôle spécifique des nodules thermoplastiques placés au moment de la fabrication du pré imprégné pour améliorer la tenue au choc des structures. La résine M21 contient du thermoplastique, notamment en phase solide correspondant à 17 % de la masse totale de résine. Comme le montre la figure 2, Hexcel Composites fabrique les UD Hexply M21/35%/268/T700GC en plaçant des nodules thermoplastiques sur les faces extérieures des pré imprégnés lors de la phase d'imprégnation des fibres. L'objectif est d'intégrer la fonction "tolérance aux chocs" en disposant de propriétés d'inter-ply spécifiques pour les stratifiés. Ces fibres se présentent sous la forme de mèches et sont superposées suivant deux rangées afin d'obtenir la valeur de grammage de 268 g/m². Sur la figure 2, on distingue la présence de zones (inter-mèches) riches en résine mais aussi en nodules thermoplastiques. Lors de la polymérisation de la partie thermodurcissable de la résine, la température de 180 °C place la partie thermoplastique solide au dessus de sa température de transition vitreuse. Les nodules thermoplastiques augmentent de diamètre. Nos études physico-chimiques font apparaître l'existence d'une interaction entre les réseaux macromoléculaires de la partie thermoplastique et thermodurcissable. Les nodules ne peuvent pas reprendre leurs diamètres initiaux lors du refroidissement jusqu'à la température ambiante. Une valeur moyenne de diamètre de l'ordre de 23,7 µm suffit pour que la valeur moyenne de masse volumique soit égale à 1524,4 kg/m³. Cet effet des conditions d'élaboration est appelé l'effet "pop corn".

5. Approche itérative multi-échelle.

La détermination de l'évolution des déformations longitudinales (ϵ_{11}) dans les plis 3 et 26 (au centre des éléments finis placés dans la rangée centrale du maillage) établit que l'abscisse $X = -90$ mm correspond à un placement du capteur sans risque de dépassement de la valeur de déformation maximale, pour une utilisation jusqu'à rupture du démonstrateur y compris en fatigue. Sur la figure 5a, on constate une différence entre le calcul et la moyenne des mesures de l'ordre de 5 %, aussi bien à l'échelle mésoscopique (ϵ_{11}) qu'à l'échelle structurale (Force résultante). De plus, la réponse des fibres optiques est différente en compression et traction. On montre que cette tendance ne dépend pas des capteurs eux-mêmes car elle se retrouve sur

chacun d'eux par retournement des éprouvettes (rôle de l'interface fibre optique-composite). On pourrait se satisfaire d'un écart de 5 % entre les grandeurs mesurées et calculées. Par itérations numériques, trois valeurs sont ajustées respectivement, le module de Young en traction dans la direction longitudinale (E_{11t} passe de 139,5 à 125,0 GPa soit un écart de 10 %), le module de Young en compression dans la direction longitudinale (E_{11c} passe de 112,5 à 118 GPa soit un écart de 5 %) et le module de cisaillement (G_{12} passe de 4,5 à 3,7 GPa soit un écart de 18 %). Les écarts entre le calcul et la valeur moyenne des essais se réduisent à 1 % pour toutes les échelles (cf. Figure 5b). En fait grâce à l'analyse des différentes échelles du matériau dans la structure - en intégrant les procédés dans la boucle de conception -, on suspecte que la présence des nodules thermoplastiques (notamment dans les inter-mèches) modifie fortement les propriétés "attendues" des plis au sein des démonstrateurs étudiés (cf. diminution importante du module de cisaillement G_{12}).

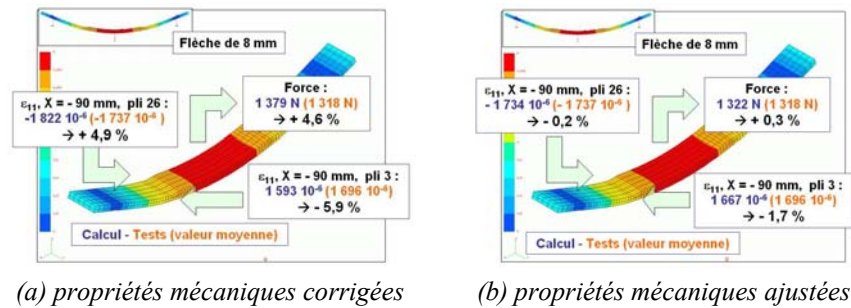


Figure 5. Analyse multi-échelle itérative par croisement calcul-expérience

6. Conclusion

L'utilisation de démonstrateurs technologiques instrumentés par fibres optiques à réseaux de Bragg fournit aux bureaux d'études un retour d'expérience très tôt, sur la connaissance du matériau dans des conditions représentatives des choix conceptuels. L'approche multi-échelle proposée permet de recaler (sur 48 démonstrateurs dont 14 instrumentés) des valeurs des propriétés élastiques du matériau dans la structure. Dans l'exemple traité, elles sont différentes de celles identifiées par des essais réalisés sur des éprouvettes élémentaires.

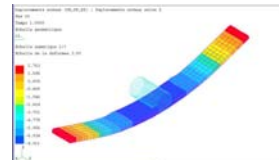


Figure 6. Calcul non linéaire géométrique avec poinçon cylindrique. Les résultats des calculs en cours (cf. Figure 6) montrent le bien-fondé de la validité de la modélisation numérique choisie. Cette démarche ouvre un large champ d'études sur la conception optimale (Takeda, 2000) et le suivi des pièces composites sur leur plage de vie.

7. Bibliographie

- Esquer P.M., Lence F.R., Menendez J.M., Optical fibre sensors in AIRBUS Spain, *SHM2002 First Europ. Workshop on Struct. Health Monitoring*, 10-12 July, Cachan (France), 2002.
- Takeda N., Structural Health Monitoring for Smart Composite Structure Systems in Japan, *Ann. Chim. Scien. Mat.*, pp. 545-549, 2000.

Remerciements. Ces travaux ont été menés dans le cadre du plan d'études amont AMERICO, soutenu par la DGA et piloté par l'ONERA. Ils ont reçu le soutien de la société Hexcel Composites France pour la fourniture du pré-imprégné UD M21/35%/268/T700GC et de la société DDL Consultants pour le financement sur fonds propres de la bourse de thèse de Matthieu Mulle.