HAL
open science

Valeur ajoutée d'une encapsulation de capteurs silicium pour l'instrumentation à coeur des structures composites

Mauricio Torres, Bernard Douchin, Francis Collombet, Laurent Crouzeix, Yves-Henri Grunevald, Robert Bazer-Bachi, Jérôme Lubin, Thierry Camps

To cite this version:

Mauricio Torres, Bernard Douchin, Francis Collombet, Laurent Crouzeix, Yves-Henri Grunevald, et al.. Valeur ajoutée d'une encapsulation de capteurs silicium pour l'instrumentation à coeur des structures composites. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.19. hal-00597883

HAL Id: hal-00597883

https://hal.science/hal-00597883v1

Submitted on 2 Jun 2011

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.

Valeur ajoutée d'une encapsulation de capteurs silicium pour l'instrumentation à cœur des structures composites.

Value added of silicon sensors encapsulation for composite structures in core instrumentation.

Mauricio Torres[1], Bernard Douchin[1], Francis Collombet[1], Laurent Crouzeix[1], Yves-Henri Grunevald[2], Robert Bazer-Bachi[3], Jérôme Lubin[4] et Thierry Camps[4]

1 : Université de Toulouse, INSA, UPS, Mines Albi, ISAE, ICA (Institut Clément Ader),
Groupe MSC, IUT Paul Sabatier, dépt. GMP, 133C Av de Rangueil, 31077 Toulouse CEDEX 4
2 : SaRL, Composites, Expertise et Solutions, 4 rue Georges Vallerey, 31320, Castanet Tolosan
3 : Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 9 Av du Colonel Roche, BP 44346, 31028 Toulouse Cedex
4 : Laboratoire d'Architecture et d'Analyses de Systèmes, 7 Avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse CEDEX 4

e-mail : [1]prenom.nom@iut-tlse3.fr, [2]yh.grunevald@composites-expertise-solutions.com,
[3]robert.bazer-bachi@cesr.fr, [4]camps@laas.fr, [4]jlubin@laas.fr.

Résumé

Les structures composites présentent l'intérêt d'être instrumentée à cœur. On peut dénombrer différentes techniques de capteurs candidates comme les capteurs de silicium (Sich), piézoélectriques (PZT) et mécano-électriques (MEMS). On envisage l'instrumentation à cœur selon deux pistes capteurs nus ou encapsulés. La première consiste à placer le capteur directement entre les plis de la structure. La seconde passe par une encapsulation du capteur au sein d'un environnement connu. L'Institut Clément Ader et la SaRL Composites Expertise & Solutions travaillent sur cette dernière piste en utilisant un patch d'enfouissement. Le concept de patch est proposé de façon à faciliter l'industrialisation de la mise en place des capteurs, particulièrement en cas de liaison filaire. Des études expérimentales sont réalisées pour analyser le comportement des éprouvettes carbone-époxy quasi-iso M21T700GC avec capteurs enfouis, nus ou encapsulés. La technique de Stéréo Corrélation d'Images Numériques durant l'essai est mise en place afin de déterminer l'évolution du champ de déformation au voisinage du capteur et, lorsqu'il est présent, du patch associé. En parallèle, des modèles Eléments Finis, sous SAMCEF®, sont développés pour étudier aux échelles structurelle, macroscopique et mésoscopique, le comportement numérique du capteur et de son entourage. La valeur ajoutée de la démarche est mise en évidence avant d'entamer des études sur structures plus complexes à l'aide de la boîte à outils « Evaluateurs Technologiques Multi Instrumentés (ETMIs) ».

Abstract

Composite in-core instrumentation with silica sensors (Sich), piezoelectric (PZT) and mechanic-electrical (MEMS) is being multiplied but its applications stay limited. This technique can be treated by two ways. The first one deals by placing the sensor directly in the structure plies. The second is through a sensor encapsulation inside a known environment. The ICA and the CES Company have started to study this approach by means of the monitoring patch. The monitoring patch is proposed to industrialise the instrumentation procedure, particularly in case of wire connection. Experimental test have been carried out to show the mechanical behaviour of M21T700GC carbon-epoxy composite plates with embedded sensors, alone or encapsulated. The Digital Image Correlation technique is used during the tests to calculate the evolution of strain field at sensor neighbourhood and, when it is present, of the related patch. In parallel the FEM models via SAMCEF are developed to study at the numerical behaviour of the sensor at the structural, macroscopic and mesoscopic scales. The added value of this approach is discussed and highlighted before apply it in more complex structures such as the Multi-Instrumented Technological Evaluators (MITEs).

Mots Clés : patch d'enfouissement, capteur, CIN, boîte à outils ETMI, variabilité.
Keywords: monitoring patch, sensor, DIC, MITE tool box, variability.

1. Introduction

Les capteurs céramiques sont utilisés pour l'instrumentation à cœur des structures composites depuis quelques années [1]. Les études attachées à ce type d'instrumentation concernent uniquement sur le lien entre la réponse mécanique de la structure et le caractère opérant du capteur [2]. Cependant l'instrumentation à cœur des structures composites primaires industrielles reste

inexistante ou limitée [3]. Parmi les verrous scientifiques majeurs, on peut citer la difficulté d'obtenir une information représentative de l'intégrité structurelle de la pièce composite à partir de la réponse du capteur. De plus, il est nécessaire d'envisager l'instrumentation des pièces dès le début de la phase de design et de fabrication de la pièce, ce qui n'est pas encore une pratique industrielle. Enfin, la mise en place de capteurs, notamment ceux à liaison filaire, pose des questions sur leur remplacement en cas d'endommagement et/ou de défaillance.

L'instrumentation à cœur des structures composites peut être envisagée naturellement selon deux voies. La première consiste à placer directement le capteur dans les plis composites. Des recherches ont mis en évidence que l'enfouissement de capteurs n'affecte pas la tenue mécanique d'éprouvettes instrumentées [4]. Par contre, ces études ont révélé l'existence de variabilités dans le voisinage du capteur, comme des poches de résine ou des désalignements de plis. Ces distorsions non contrôlées au sein des plis composites peuvent être à l'origine de l'apparition des premiers endommagements et n'aident pas à l'interprétation des mesures acquises par le capteur.

La deuxième voie, peu étudiée jusqu'à présent, est basée sur l'encapsulation du capteur au sein d'un enrobage connu car a priori elle suggère une modification locale forte du matériau au sein de la structure. L'ICA et la SaRL CES, dans le cadre du programme soutenu par le RTRA STAE[1] et intitulé « Instrumentation Multicapteurs pour les Matériaux et structures Composites[2] » (I2MC), exploitent de conserve cette approche au travers le concept d'un « patch d'enfouissement », afin de mettre en place une démarche qui favorise l'instrumentation des structures composites [5].

Le patch d'enfouissement est constitué des principaux points suivants. Il s'agit de créer une cavité de logement reproductible pour le capteur, quelque soit son volume. On améliore l'environnement entre le capteur et la périphérie de la cavité en supprimant le risque de présence accrue de porosités. On contrôle le désalignement local des plis grâce à une maîtrise des pentes des différents plis. La mise en place du capteur et de sa connectique s'effectuera par l'intermédiaire d'une manipulation aisée et automatisable. On peut aussi disposer d'une isolation électrique, voire d'un blindage contre les interférences électromagnétiques entre le capteur et la structure composite, particulièrement si cette dernière est constituée de fibres de carbone. On pourra assurer le contrôle de l'adhésion capteur-patch, en sachant que le contrôle de l'adhésion patch-structure composite repose sur des aspects connus et à variabilités moindres. On réduit les variabilités de mise en œuvre, que ce soit pour le capteur ou pour son environnement proche. Enfin, on peut autoriser une réparation de la zone instrumentée en offrant la possibilité, non seulement de récupérer et de changer le capteur, mais aussi de rétablir la connexion de la liaison filaire.

L'insertion du patch doit être étudiée pour connaître son influence au sein de la structure et minimiser le risque d'un endommagement initial. La comparaison du patch d'enfouissement avec la procédure d'instrumentation classique (capteur nu) permet de quantifier ses bénéfices et d'améliorer ses limitations. Le but final sera de consolider cette démarche par l'utilisation de la boite à outils « Evaluateur Technologique Multi-instrumenté » (ETMI) [6], c'est-à-dire de placer le capteur et son voisinage dans une situation de travail représentative de celle d'une pièce industrielle.

Pour une meilleure compréhension de l'instrumentation des structures composites via un patch d'enfouissement, cet article est composé de deux parties. La première partie décrite succinctement le concept du patch ainsi que les essais expérimentaux réalisés. La deuxième partie présente les modèles numériques aux différentes échelles. La corrélation essais-calculs est détaillée pour mettre en avant les points forts de l'encapsulation et discuter les écarts trouvés avec la situation sans patch. Des propositions de calculs d'un ETMI instrumenté avec un patch d'enfouissement sont présentées pour présenter les pistes des études en cours. Finalement, la valeur ajoutée de la démarche est mise en évidence avant de conclure sur les travaux programmés à court et moyen terme.

[1] RTRA STAE : Réseau Thématique de Recherche Avancée « Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace ».
[2] Instrumentation Multicapteurs pour les Matériaux et structures Composites : programme rassemblant l'Institut Clément Ader, la SaRL, Composites, Expertise et Solutions, le CESR, le LAAS et le laboratoire PHASE.

2. Procédure expérimentale d'enfouissement de capteurs dans des plaques composites

2.1 Mise en place de l'encapsulation de capteurs

Dans le cadre du programme I2MC[2], l'instrumentation de composites par des capteurs silicium-verre, possédant une sérigraphie électronique, est en cours. Ce type de capteur permet de récupérer la variation de signal électrique produit respectivement soit, par une variation de température, soit par une déformation au voisinage du capteur. L'étude est menée tout d'abord avec des leurres pour vérifier la tenue mécanique du support électronique. Le capteur a comme dimensions 2.2 x 2.2 x 0.5 mm^3, avec une connectique flex Kapton™ de 50 mm de longueur (Fig. 1-a).

Pour déterminer la performance de l'encapsulation du capteur verre, il faut comparer ce type d'instrumentation avec une situation d'enfouissement du capteur nu. Trois jeux d'éprouvettes sont testés pendant la première phase d'essais. Le premier comprend des éprouvettes vierges, qui servent de référence. Les deux autres jeux d'éprouvettes composites sont instrumentés, l'un par des capteurs enfouis nus, l'autre par des capteurs insérés dans des patchs d'enfouissement.

La première génération de patch est proposée à partir de plis de pré imprégné verre Taffetas CTMI 5192 – 1808S. Le patch se divise en plusieurs plis ayant des rôles spécifiques. En premier lieu, on drape un pli de base, qui est chargé d'assurer le contact entre le capteur et la structure. Puis on empile des plis de logement, munis au centre d'une découpe de forme et de dimensions similaires à celles du capteur : leur nombre dépend de l'épaisseur du capteur. Un dernier pli de recouvrement est ajouté pour parachever l'encapsulation. Chaque pli présente une marche par rapport au précédent, constituant ainsi un drop-off pour lequel la pente peut varier de 10 à 50, selon la norme aéronautique et les études précédentes [7]. Les plis constitutifs du patch sont illustrés par la Fig. 1-b.

Chaque jeu d'éprouvettes est testé sous deux sollicitations différentes : traction et flexion quatre points. Les structures instrumentées sont constituées de nappes carbone-époxy M21 T700GC fournies par HEXCEL®. Pour les essais de traction une configuration quasi-isotrope à 8 plis est utilisée : (0/45/90/-45/instrumentation avec ou sans patch/-45/90/45/0). Pour les essais de flexion quatre points, la configuration quasi-isotrope employée est de 17 plis : (0/45/90/-45/0/-45/90/45/0/45/90/-45/0/-45/90/instrumentation avec ou sans patch /45/0), (cf. Fig. 1-c et 1-d).

Les éprouvettes ont comme dimensions nominales 300 x 75 x 2 mm. La zone d'étude est restreinte à 200 mm. Elles sont instrumentées en surface avec des jauges de déformation : une première sur la zone du capteur, une deuxième à l'extrémité de la connectique flex. Dans le cas des éprouvettes avec patch d'enfouissement, une troisième jauge est collée au bord du patch d'enfouissement.

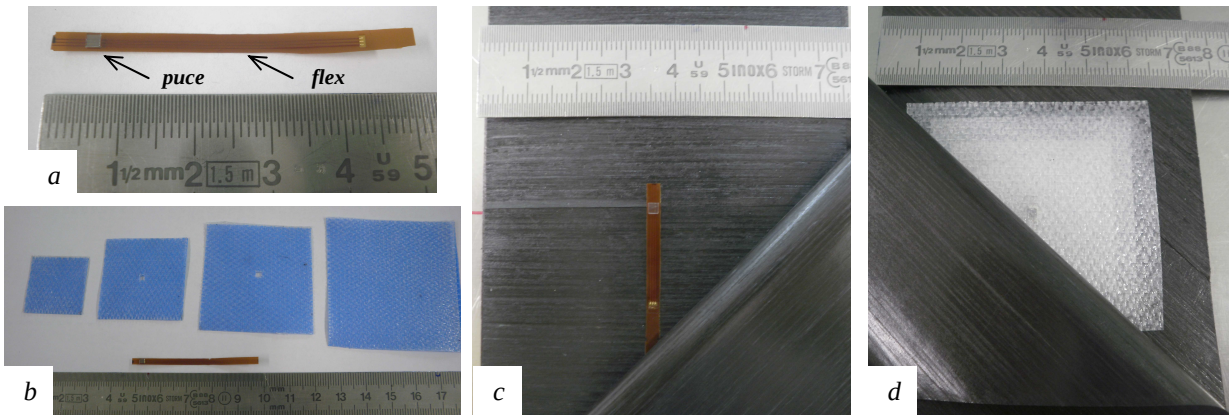

Fig. 1. Fabrication des éprouvettes instrumentées avec : a) capteur verre avec flex Kapton, b) plis constitutifs du patch d'enfouissement, c) éprouvette avec capteur nu et d) éprouvette avec patch d'enfouissement.

2.2 Essais de traction des éprouvettes instrumentées avec capteurs

Les éprouvettes des trois jeux ont été peintes pour les essais de traction d'un mouchetis aléatoire blanc/noir. Pendant les essais de traction, des photos numériques sont prises avec deux caméras CCD afin de récupérer le champ de déplacements et de calculer les déformations présentes dans la zone instrumentée. La campagne expérimentale est réalisée sur une machine d'essais mécaniques INSTRON 8720®, avec une vitesse de déplacement du vérin de 2 mm/min.

Les caméras CCD possèdent des lentilles de 2.4 mm de diamètre et 70 mm de distance focale. La région d'intérêt (ROI) est fixée dans la zone instrumentée (capteur nu ou avec patch) afin d'acquérir les déplacements liés aux charges imposées. Pendant les essais mécaniques, une image est prise environ pour chaque incrément de force égal à 2 kN.

Pour le post-traitement des images, le logiciel VIC 3D est employé avec les paramètres de ROI correspondant à une surface *(S)* de 19 x 19 px^2 et un pas *(p)* de 9 px. La résolution *(g)* de l'image de 0.13 mm/px^2 est calculée par rapport à la taille de l'éprouvette, avec une résolution spatiale $(S \cdot g)$ de 2.47 mm.

2.3 Essais de flexion des éprouvettes instrumentées avec capteurs

Pour les trois jeux d'éprouvettes concernant les essais de flexion quatre points, la distance entre appuis est de 200 mm avec une longueur entre les rouleaux de charge de 100 mm. Les essais sont réalisés avec la même vitesse de déplacement du vérin de 2 mm/min. La zone instrumentée, avec capteur nu ou avec patch, est située dans la zone tendue pendant l'essai.

3. Analyse numérique de l'enfouissement de capteurs dans des plaques composites élémentaires

La réponse mécanique des éprouvettes instrumentées est aussi étudiée à l'aide de modèles Eléments Finis avec le logiciel SAMCEF®. Ils permettent une comparaison avec la réponse fournie par les différents moyens de mesure.

Un modèle 2D est développé pour analyser à l'échelle macroscopique l'influence de divers paramètres géométriques et matériels du patch, ainsi que de tester plusieurs configurations. Ce modèle macroscopique considère une plaque constituée d'éléments coques multicouches (16676 EF). Le maillage offset – transfini est choisi permet un drapage de plis composite numériquement stable. De plus, il permet aussi d'analyser l'influence de divers paramètres géométriques et matériels de l'instrumentation choisie, de tester plusieurs configurations et de prendre en compte diverses variabilités liées au processus d'enfouissement (cf. § 5.2).

Pour le calcul en traction, les conditions frontières sont imposées de façon à représenter les fixations de la mâchoire fixe *(blocage des ddls en translation suivant X, Y, Z et en rotation suivant RX)* et de la mâchoire mobile *(blocage des ddls en translation suivant Y, Z et en rotation suivant RZ)*. Le déplacement de traction est imposé suivant l'axe *X* côté de la mâchoire mobile. En revanche, le calcul en flexion est effectué pour des fixations aux bords de l'éprouvette *(X, Y)* et aux appuis *(Z)*. Le déplacement est imposé sur l'axe *Z* en respectant la distance entre les lignes de charge.

Un deuxième modèle en 3D est proposé pour représenter les plis constitutifs de la zone instrumentée par patch d'enfouissement. Cette modélisation, à l'échelle mésoscopique, est menée avec des éléments volumiques multicouches (20833 EF cubiques et tétraédriques). On considère une maille pour quatre plis carbone-époxy, avec une maille par pli dans la zone du patch, en représentant de façon simplifiée la présence de coins de résine par des tétraèdres. Pour les conditions frontières, on utilise celles des calculs 2D concernant la zone d'intérêt modélisée. Les différents modèles proposés sont illustrés par la figure 2.

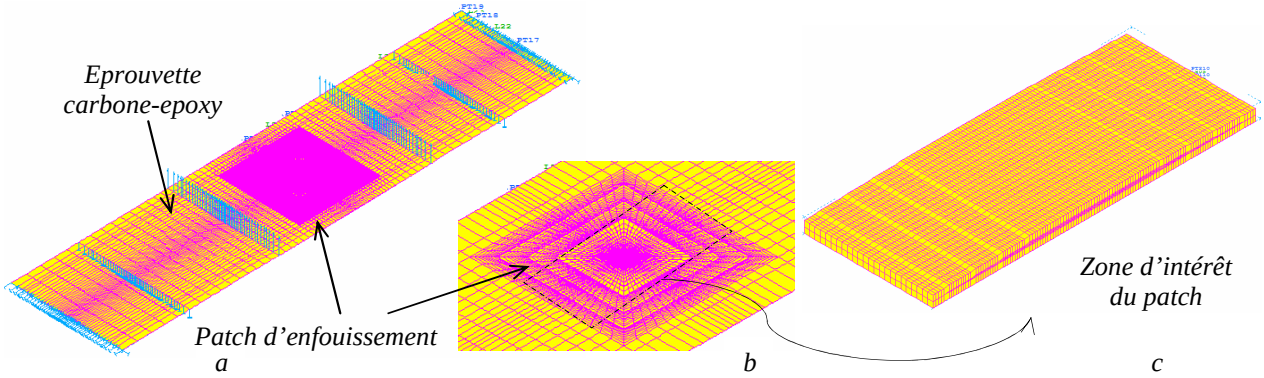

Fig. 2. Deux modèles numériques développés pour les éprouvettes instrumentées avec : a) modèle 2D de l'éprouvette instrumentée, b) détail du patch d'enfouissement et c) modèle 3D de la zone d'intérêt du patch d'enfouissement.

4. Comparaison essais – calculs de la réponse mécanique des plaques composites élémentaires

4.1 Résultats pour les essais de traction

La réponse mécanique des éprouvettes carbone-époxy instrumentées est décrite à l'aide des graphiques force - déformation. Les déformations obtenues par chaque méthode, jauges de déformation, CIN et EF sont comparées.

Pour les essais de traction, la Fig. 3 montre que les trois jeux d'éprouvettes ont un comportement linéaire. Dans la zone d'emplacement du capteur, les mesures obtenues montrent des différences. Les éprouvettes vierges, ainsi que celles avec le capteur nu, se déforment plus que celles équipées du patch d'enfouissement. Le patch renforce la zone instrumentée car il existe une augmentation de la raideur locale de l'éprouvette d'environ 25 %.

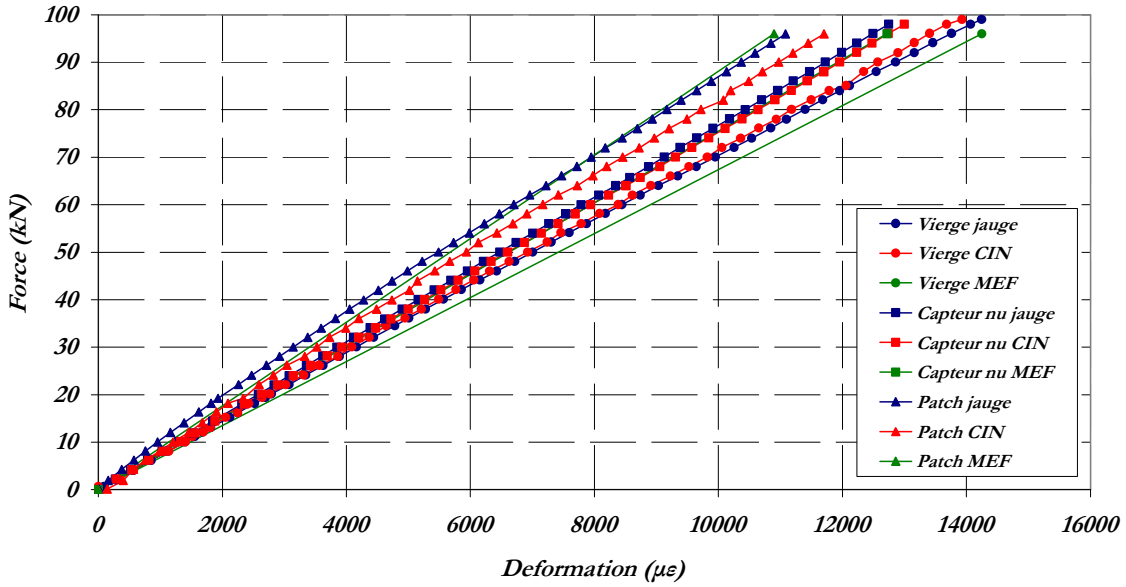

Fig. 3. Essais de traction avec la comparaison des déformations longitudinales entre les éprouvettes vierges, avec capteur nu et avec patch d'enfouissement.

Les champs de déformation axiale (ε_{xx}), pour les éprouvettes vierges et avec capteur nu, ne montrent pas de différences significatives. Cependant, il est difficile de prétendre que la rupture des éprouvettes avec capteur nu est due au niveau de charge imposé ou à une distorsion liée à la surépaisseur due à l'emplacement du capteur.

Les cartographies de la Fig. 4 présentent le champ de déformation axiale *(ε_{xx})*, acquis par CIN et calculé par MEF, pour les éprouvettes équipées d'un patch d'enfouissement. Le champ de déformation est hétérogène et révèle des zones particulières. La zone du patch présente les valeurs de déformation les plus basses de la cartographie. La déformation augmente de façon régulière sur les zones proches du bord du patch. Le bord du patch présente aussi des zones surdéformées qui se prolongent jusqu'aux bords de l'éprouvette et qui sont responsables de la rupture de l'éprouvette.

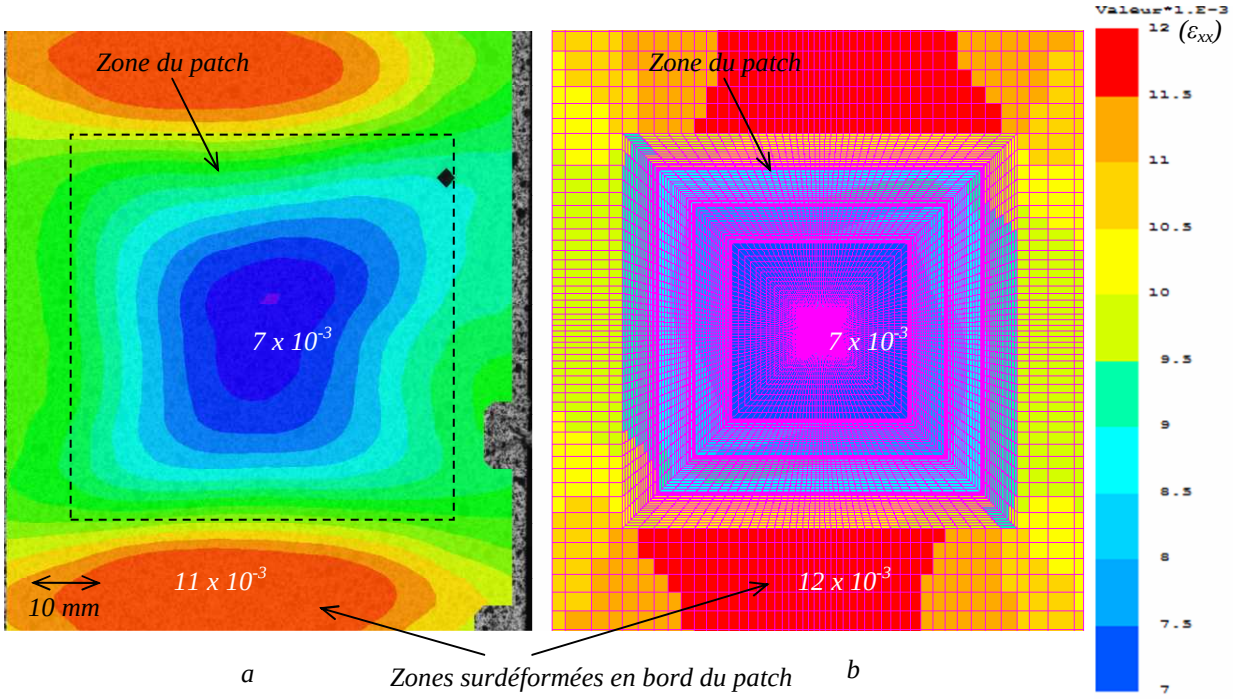

Fig. 4. Cartographies du champ de déformation axiale (ε_{xx}) pour 66 kN (66 % de la charge max) sur éprouvettes avec patch d'enfouissement et avec : a) CIN et b) MEF.

Le capteur enfoui, quelque soit la méthode, crée une surépaisseur qui modifie localement la géométrie de l'éprouvette. Cette surépaisseur favorise la présence de déformations locales plus faibles que la déformation moyenne de l'éprouvette. Pour le patch d'enfouissement, cette surépaisseur varie doucement, grâce au choix de la pente du drop-off. Néanmoins, l'extrémité du patch génère des zones de surdéformation. D'une part même si la pente du drop-off du patch diminue l'effet intrusif du capteur, la frontière patch – structure semble être un des maillons faible dans le cas d'une éprouvette élémentaire (à la différence de la situation décrite § 5.2). D'autre part, la fissuration se produit loin du capteur, donc la possibilité de réparation ou de réutilisation reste envisageable.

4.2 Résultats pour les essais de flexion quatre points

Pour les essais de flexion 4 points, la Fig. 5 montre que les trois jeux d'éprouvettes ont des comportements linéaires similaires au début du chargement, suivis par des comportements non-linéaires à la fin des essais. Les mesures obtenues dans la zone d'emplacement du capteur montrent que les éprouvettes vierges se déforment plus que celles équipées avec le capteur nu ou le patch d'enfouissement. Pour le mode de rupture, le délaminage le plus important apparaît entre les plis où le capteur nu a été posé. Le délaminage des éprouvettes avec patch a eu lieu dans le pli au dessus du patch.

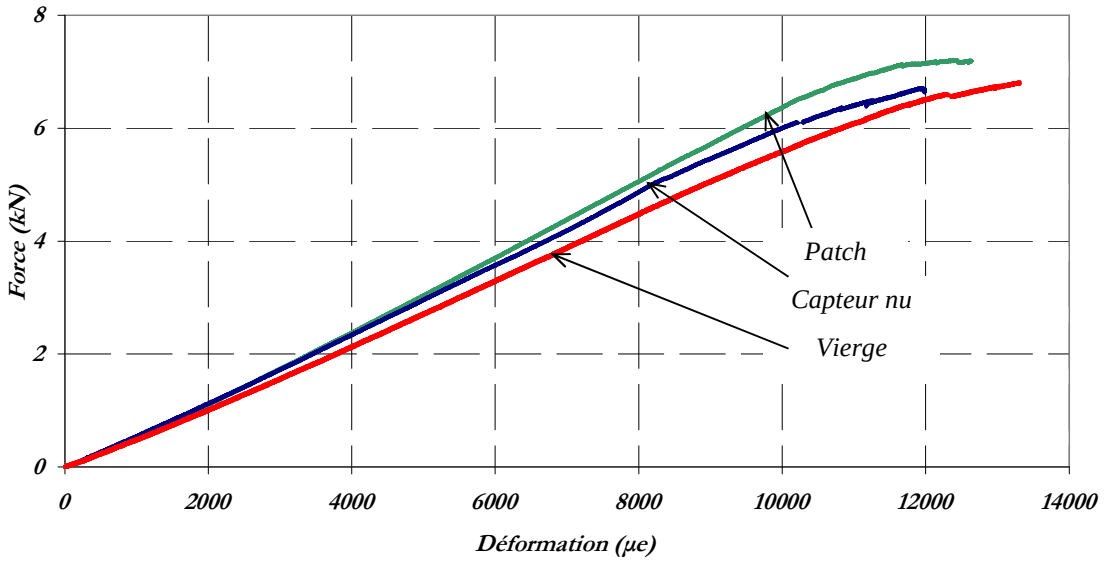

Fig. 5. Essais de flexion 4 points avec la comparaison des déformations longitudinales entre les éprouvettes vierges, avec capteur nu et avec patch d'enfouissement.

5. Instrumentation d'un ETMI avec un patch d'enfouissement

5.1 Evaluateur Technologique Multi instrumenté, démarche et cadre scientifique

La boite à outils « Evaluateur Technologique Multi Instrumenté (ETMI) » a pour objectif principal d'enrichir le dialogue essais – calculs en développant des modèles numériques optimisés et en réalisant des essais représentatifs sur une structure composite, avec la prise en compte des variabilités associées au procédé industriel de fabrication ou de réparation. L'ETMI est créé au cas par cas afin de regrouper plusieurs singularités conceptuelles (reprise de plis, arrêt de raidisseur, inserts, fixations, collages, etc.) pouvant avoir à interagir entre elles au sein de la structure. Au final, il rejoint quatre volets interactifs : les modèles numériques multi-échelles, la structure composite avec les singularités étudiées, l'instrumentation multiple et le moyen d'essais modulaire multi axial.

Dans le cadre du projet I2MC, le premier ETMI proposé représente une double reprise de plis. Il s'agit d'une plaque carbone-époxy M21 T700GC de 175 x 600 mm avec une zone épaisse de 36 plis et une zone courante de 20 plis. La zone épaisse est constituée par une configuration aéronautique courante $[(0/45/0/-45)_2/0/90/(0/45/0/-45)_2]_s$. Cet ETMI a pour but la validation du moyen d'essais modulaire multi axial en cours de montage et il servira de référence pour les futures structures instrumentées (cf. Fig. 6).

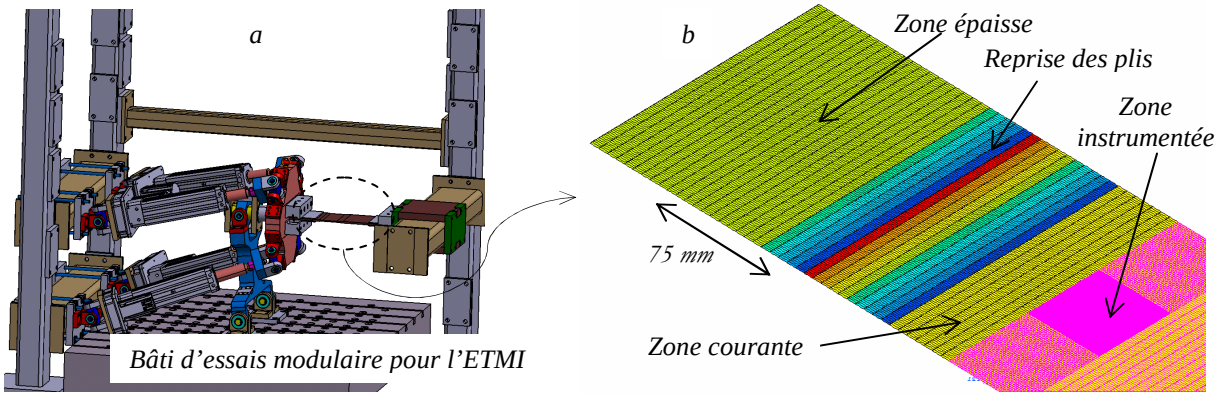

Fig. 6. Vue de deux volets de l'ETMI avec : a) moyen d'essais modulaire multiaxial et b) un modèle numérique de l'ETMI.

5.2 Etude numérique des variabilités liées au patch d'enfouissement.

Comme conséquence des opérations courantes d'enfouissement de capteurs, certaines « variabilités procédé » peuvent affecter la performance mécanique de la structure instrumentée. Dans cette étude, on identifie les variabilités de dimension des plis du patch, du drop-off et de positionnement angulaire des plis du patch. On considère qu'elles ont une influence marquée sur la réponse des éprouvettes instrumentées (ETMI).

Le modèle numérique 2D développé (28716 EF multicouches) intègre la prise en compte de ces variabilités en permettant d'analyser leur influence et de connaître les écarts qui peuvent apparaître selon les différentes configurations. La Fig. 7 illustre les variabilités étudiées.

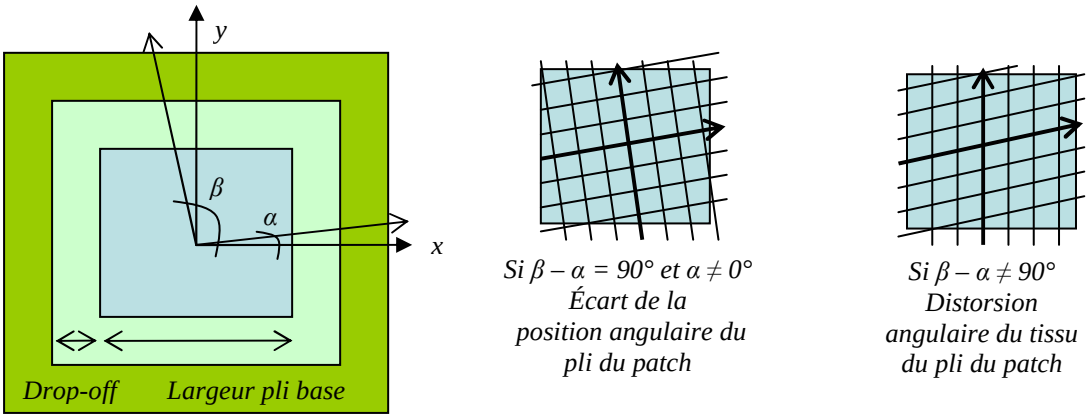

Fig. 7. Schéma des variabilités associées au procédé de fabrication du patch d'enfouissement.

Dans le tableau 1, on fournit l'intervalle de tolérances proposé pour chaque variabilité.

Variabilité du patch	Min	Théorique	Max
Largeur du pli de base (mm)	23	25	27
Dimension du drop-off (mm)	4.5	5	5.5
Angle α du tissu du patch	-5	0	5
Angle β du tissu du patch	85	90	95

Tab. 1. Carte de variabilités associées à l'instrumentation de l'ETMI avec un patch d'enfouissement.

La partie expérimentale faisant l'objet d'une étude en cours, on s'intéresse plus particulièrement au volet numérique pour évaluer l'influence de ces variabilités dans le cas où l'ETMI est instrumenté avec un patch d'enfouissement. Dans cette étude, l'ETMI est sollicité en traction avec un déplacement de 1 mm. Le panel de solutions est obtenu avec l'aide du logiciel BOSS Quattro. Parmi les résultats relevés, la déformation dans la zone courante semble la plus intéressante à analyser car elle peut être comparée à celle mesurée par les différentes techniques d'instrumentation. On utilise plusieurs critères d'endommagement classiques comme celui de Tsai-Wu ou de Tsai-Hill pour analyser la zone instrumentée afin d'estimer le risque potentiel de la présence d'un endommagement dans le voisinage du capteur enfoui.

La Fig. 8 montre la déformation moyenne de l'ETMI dans la zone courante pour 20 cas sur 135 possibilités de géométrie du patch d'enfouissement. On peut distinguer un faible écart entre les résultats pour chaque configuration du patch. Les variabilités géométriques et matérielles proposées semblent ne pas avoir de répercutions significatives sur le comportement global de l'ETMI. Parmi les variabilités d'enfouissement modélisées, même les distorsions les plus critiques ont une faible influence sur la valeur de la déformation de l'ETMI. Cependant, une analyse plus fine à l'échelle mésoscopique est en cours pour révéler (ou pas) des effets plus locaux autour de la zone instrumentée. Une fois de plus, l'information sur la déformation dans les zones spécifiques de

l'ETMI sera d'une grande utilité, surtout pour la comparer avec les moyens d'instrumentation proposés (CIN, capteur, fibre optique, etc.) des essais en cours.

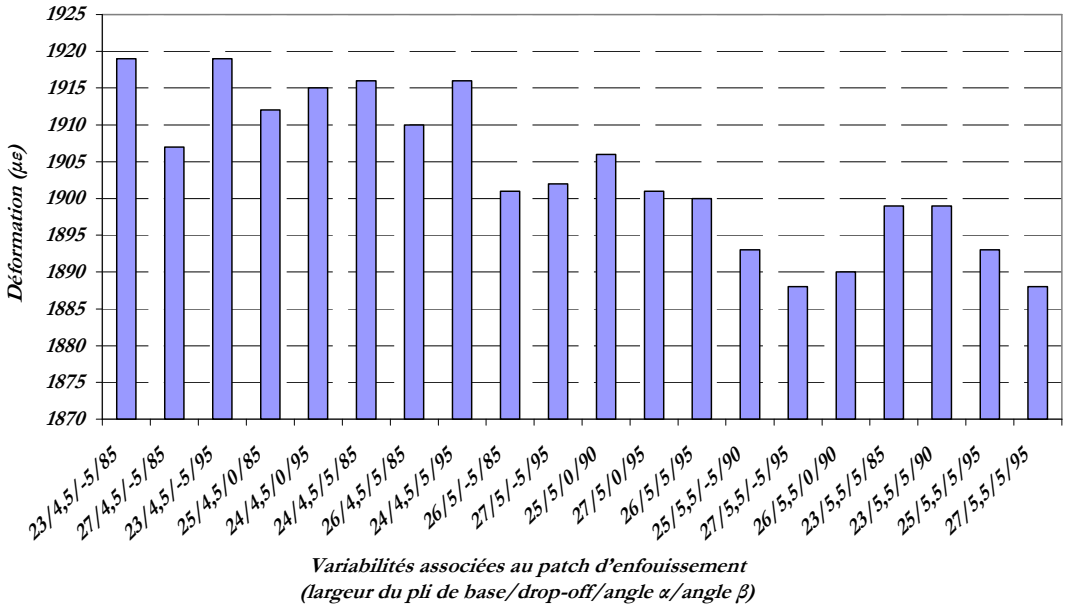

Fig. 8. Déformation moyenne de l'ETMI dans la zone courante en fonction des variabilités du patch d'enfouissement : largeur du pli de base / drop of f/ angle α / angle β.

Dans la Fig. 9, on exhibe le champ de déformation axiale de l'ETMI sollicité en traction. La zone courante présente la valeur la plus haute des déformations en comparaison avec celles de la zone épaisse. Cette tendance est logique à la vue de la configuration de la structure. Néanmoins, la zone instrumentée présente la déformation la plus faible grâce à la présence du patch d'enfouissement. Ce résultat renforce les hypothèses proposées par rapport aux résultats trouvés avec les éprouvettes élémentaires. Le moyen d'essais modulaire rend alors possible des scénarii de chargement de l'ETMI plus complexes. Deux de ces chargements sont présentés : le premier a pour objectif la présence d'un effort tranchant au niveau d'une zone de prise de plis, en choisissant un essai de type flexion. Le deuxième génère un chargement dans la largeur de l'ETMI, en produisant une dégradation à effort axial nul (F_x = 0). Avec ces choix de chargement, on pourra valoriser la démarche d'enfouissement de capteurs et montrer sa validité lors de situations plus représentatives de structures composites.

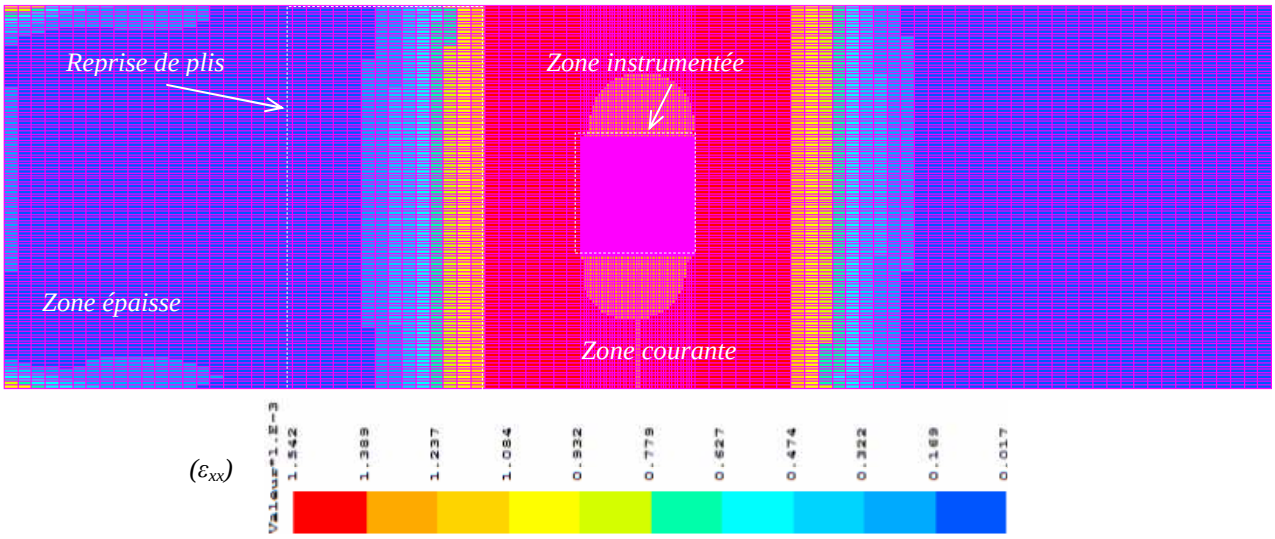

Fig. 9. Champ de déformation axiale (ε_{xx}) de l'ETMI sollicité en traction.

6. Conclusion

La valeur ajoutée de l'encapsulation de capteurs au sein de structures composites est présentée dans ces travaux. Avec un enrobage du type patch d'enfouissement, l'industrialisation de l'instrumentation à cœur de structures composites est envisageable.

La performance mécanique des plaques composites instrumentées ne semble pas être altérée par la présence d'un capteur nu ou avec un patch d'enfouissement. Cependant, le patch d'enfouissement modifie localement le champ de déformation, mesuré et calculé par CIN et MEF. La frontière patch-structure semble être l'endroit le plus favorable à l'initiation d'endommagement. L'utilisation du patch doit donc être bien maîtrisée pour en tirer un bénéfice sur la structure composite.

Une étude des variabilités dues à la mise en œuvre de l'encapsulation de capteurs a été explorée. Le volet numérique de la boîte à outils ETMI a été exploité en faisant varier les paramètres géométriques et matériels dans un intervalle de tolérances défini. On note que les valeurs extrêmes de tolérance ont une faible influence sur la déformation vue par le capteur. Ces distorsions restent dans un intervalle acceptable pour un usage maîtrisé du capteur grâce à la connaissance de son voisinage.

Les travaux à court terme permettront l'instrumentation de plaques composites élémentaires puis au sein d'ETMIs avec et sans patch, pour analyser les signaux émis par les capteurs. Grâce à cette démarche d'encapsulation de capteurs, il est possible d'envisager l'instrumentation de structures primaires pour leur surveillance, pour la prévision de tâches de maintenance et pour surveillance de zone réparée.

Remerciements

Le travail présenté est associé au projet de recherche « Instrumentation Multicapteurs pour les Matériaux et structures Composites (I2MC) » soutenu pour la fondation RTRA STAE[1] de Toulouse. Les auteurs remercient également le Conseil National des Sciences et Technologies du Mexique (CONACYT) pour le financement de la thèse de Mauricio Torres.

References

[1] P. Kudela, W. Ostachowicz, A. Zak, « Damage detection in composite plates with embedded PZT transducers ». *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, pp. 1327-1335, 2008.

[2] S. Mall, T. L. Hsu, « Electromechanical fatigue behavior of graphite/epoxy laminate embedded with piezoelectric actuator ». *Smart Materials and Structures*, Vol. 9, pp. 78-84, 2000.

[3] J. Park, S. Ha, F-K. Chang, « Monitoring Impact Events Using a System-Identification Method ». *AIAA Journal*, Vol. 47, pp. 2011-2020, 2009.

[4] Y. Huang, S. Nemat-Nasser, « Structural integrity of composite laminates with embedded micro-sensors ». *Sensors Systems and Networks*, Vol. 65, pp. 1-5, 2002.

[5] M. Torres, L. Crouzeix, F. Collombet, B. Douchin, Y-H. Grunevald, « Mechanical Characterization of an Alternative Technique to Embed Sensors in Composite Structures: The Monitoring Patch ». *Applied Composites Materials*, DOI: 10.1007/s10443-011-9198-7, 13 pages, 2011.

[6] F. Collombet, Y-H. Grunevald, R. Zitoune, M. Mulle, « Economical value added of Multi Instrumented Technological Evaluators for the development of composite civil aircraft ». *Proceedings of the 16th National Journeys on Composites*, France, 2009.

[7] A. Mukherjee, B. Varughes, « Design guidelines for ply drop-off in laminated composite structures ». *Composites Part B*, Vol. 32, pp. 153-164, 2001.