



**HAL**  
open science

## Caractérisation d'un matériau HexMC : identification de propriétés mécaniques par l'utilisation de mesures de champs de déplacements et de mesures ultrasonores.

Laurent Crouzeix, Jean-Noël Périé, Bernard Douchin, Philippe Marguerès, Michel Fournié, Francis Collombet

### ► To cite this version:

Laurent Crouzeix, Jean-Noël Périé, Bernard Douchin, Philippe Marguerès, Michel Fournié, et al.. Caractérisation d'un matériau HexMC : identification de propriétés mécaniques par l'utilisation de mesures de champs de déplacements et de mesures ultrasonores.. 15èmes Journées Nationales sur les Composites, Jun 2007, Marseille, France. pp.725-732. hal-04496708

**HAL Id: hal-04496708**

**<https://hal.science/hal-04496708v1>**

Submitted on 8 Mar 2024

**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.

**CARACTERISATION D'UN MATERIAU HEXMC<sup>®</sup> : IDENTIFICATION DE PROPRIETES MECANQUES PAR L'UTILISATION DE MESURES DE CHAMPS DE DEPLACEMENTS ET DE MESURES ULTRASONORES**

**CHARACTERIZATION OF A HEXMC<sup>®</sup> MATERIAL: ON THE USE OF FULL FIELD AND ULTRASONIC MEASUREMENTS FOR IDENTIFYING MECHANICAL PROPERTIES**

Laurent Crouzeix\* — Jean Noël Périé\* — Bernard Douchin\* — Philippe Marguerès\* — Michel Fournié\*\* — Francis Collombet\*

\* Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, équipe PRO<sup>2</sup>COM,  
IUT Paul Sabatier, 133 C avenue de Ranguel, 31077 Toulouse CEDEX4

\*\* Laboratoire de Mathématiques pour l'Industrie et la Physique,  
Université Paul Sabatier, Toulouse III, 31062 Toulouse Cedex.  
laurent.crouzeix@iut-tlse3.fr

**RESUME**

Le HexMC<sup>®</sup> est un composite carbone-epoxy SMC constitué de bandelettes de pré imprégné. Son hétérogénéité est révélée par des mesures CND, des caractérisations physico-chimiques et des essais mécaniques. Des essais de traction sur éprouvettes normalisées multi-instrumentées sont présentés. La cohérence des informations délivrées est discutée. Les champs de déplacements mesurés révèlent dans un premier temps l'hétérogénéité du champ de déformation. Ils servent ensuite de données d'entrée à une méthode d'identification de champs de propriétés élastiques basée sur l'« Equilibrium gap method ». Les cartes de modules d'Young identifiées au début et à la fin du chargement sont confrontées aux mesures ultrasons réalisées avant et après l'essai.

**ABSTRACT**

The HexMC<sup>®</sup> is a carbon epoxy SMC composite made of prepreg patches. Its heterogeneity is pointed out using NDT measurements, physico-chemical characterizations and mechanical tests. Tensile tests performed on multi instrumented standard coupons are presented. The coherence between the information retrieved is commented. Displacement fields are first used in order to reveal strain field heterogeneity. These measurements are then used as an input for a procedure developed for identifying elastic properties field and based on the "Equilibrium Gap Method". The maps of Young moduli identified at the principle and the end of the loading are compared with ultrasonic measurements performed before and after the tensile test.

MOTS CLES : identification, champs de propriétés élastiques, mesures de champs, « Méthode de l'écart à l'équilibre », structures composites

KEYWORDS: identification, fields of elastic properties, full field measurements, « Equilibrium Gap Method », composite structures

## INTRODUCTION

Les pièces fabriquées à partir de HexMC<sup>®</sup> sont produites par SMC (Sheet - Molding Compound). L'originalité du procédé proposé par Hexcel Composites réside dans le fait que la pièce est obtenue par compression dans un moule d'un empilement de plis. Chacun de ces plis est constitué de bandelettes de pré imprégné (en carbone-epoxy et de dimensions 50 mm x 10 mm) réparties aléatoirement (Fig. 1-a). Ce procédé économique permet d'obtenir des pièces présentant des formes et des courbures difficiles à obtenir à partir de procédés mettant en œuvre des fibres longues (autoclave, RTM, infusion, etc.). Ces structures possèdent en outre des caractéristiques mécaniques nettement supérieures à celles obtenues pour des matériaux fibres courtes et présentent toutefois une très bonne usinabilité. Ces composites sont destinés, de ce fait, à concurrencer l'emploi de matériaux traditionnels pour les pièces d'interfaces et de liaisons. Le caractère aléatoire du matériau (Fig. 1) et les rapports entre les dimensions de la pièce (en particulier son épaisseur) et les dimensions des bandelettes laissent cependant prévoir un comportement hétérogène.

Le but de l'étude présentée ici est de fournir des données pour améliorer la connaissance et la compréhension du comportement de ce type de matériaux. On souhaite, en particulier, obtenir des données destinées à alimenter les stratégies de calcul par éléments finis afin de permettre l'étude de structures utilisant le HexMC<sup>®</sup>. On cherche notamment à étudier les variabilités de propriétés locales du matériau, et à les lier à son architecture et à ses propriétés physico-chimiques. Pour cela, le matériau est étudié de diverses manières : études physico-chimiques classiques, contrôle non destructif par ultrasons (US), essai de traction multi instrumenté, avec notamment mesure de champs de déplacements (MDC) obtenus par corrélation d'images numériques. Ces mesures de champs sont en particulier exploitées afin d'identifier des variations de propriétés locales de module d'Young, ainsi que l'apparition de dégradations au cours de l'essai.

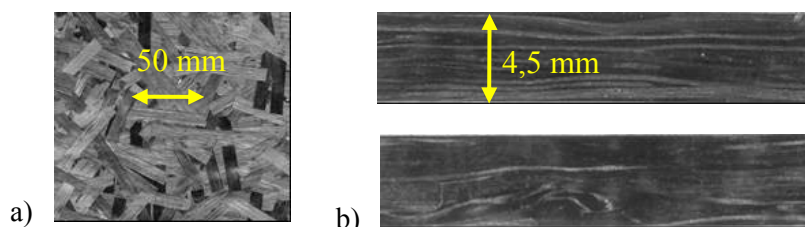


Figure 1. a) Répartition des bandelettes de pré imprégné dans un pli de HexMC<sup>®</sup>;  
b) sections d'une éprouvette.

*a) Distribution of prepregs patches in a ply; b) sections of a HexMC<sup>®</sup> tensile coupon.*

### 1. CARACTERISATION DU HEXMC<sup>®</sup>

Des analyses physico-chimiques sont effectuées sur des échantillons prélevés aléatoirement dans des plaques d'épaisseur constante. Le tableau 1 présente le taux de fibres mesuré par dissolution de résine (dans une solution d'acide sulfurique) ou calcination (8 heures à 350°C en étuve) pour deux tailles d'échantillons. Ces méthodes conduisent à des résultats comparables en terme de taux de fibres (aux environs de 61%). L'écart maximal observé atteint 4%. D'autres échantillons sont en cours d'analyse afin de compléter la base de données statistiques.

Méthode	Dissolution				Calcination		
Echantillon	1	2	3	4	1	2	3
Dimensions (mm)	20x20x5	20x20x5	10x10x5	10x10x5	10x10x5	10x10x5	10x10x5
Taux massique de fibres (%)	63.56	61.99	61.32	62.24	61.97	62	59.2

Tableau 1. Résultats des premiers essais de dissolution et de calcination sur HexMC<sup>®</sup>.  
*First results of resin digestion and calcination tests on HexMC<sup>®</sup>.*

Des éprouvettes planes normalisées (dimensions 50x200x4.4 mm) sont également analysées grâce à des techniques de contrôles non destructifs, avant et après les essais mécaniques. Ces mesures sont effectuées par ultrasons en transmission dans une cuve à immersion (Chang et al, 06). Les transmetteurs et récepteurs utilisés ont un diamètre de 13 mm et une fréquence de 5 MHz. On réalise des C-scan par translation des capteurs.

L'analyse des résultats en terme de temps de vol et d'amplitude confirme l'hétérogénéité du matériau à l'échelle de l'éprouvette (Fig. 2). L'atténuation mesurée varie ainsi de 1.67 dB à 8.57 dB au sein de la même éprouvette. Le lien entre le taux de fibres local et les mesures US au même point est en cours d'étude.

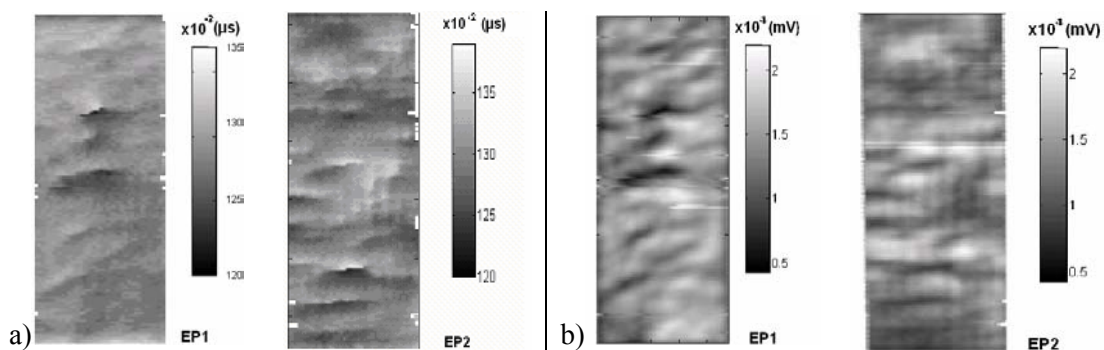


Figure 2. C-scan sur deux éprouvettes de HexMC<sup>®</sup> : a) temps de vol ; b) amplitude.  
*C-scan on two HexMC<sup>®</sup> coupons: a) flying time; b) amplitude.*

Les premiers essais réalisés sur des structures en HexMC<sup>®</sup> sont effectués sur des éprouvettes planes normalisées prélevées dans des plaques obtenues par le même procédé. Deux largeurs d'éprouvettes sont ainsi testées (250x50x5 mm et 250x25x5 mm). Les éprouvettes de petites largeurs montrent un comportement très fortement dispersé. Cette dispersion reste observable, dans une moindre mesure, pour les éprouvettes normalisées de 50 mm de large (contrainte à rupture moyenne variant de 205 à 220 MPa et module d'Young moyen variant de 32 à 39 GPa). Le comportement observé est globalement quasi linéaire jusqu'à rupture.

Certaines de ces éprouvettes, testées sur une machine de traction conventionnelle, bénéficient d'une multi instrumentation (Fig. 3-a). Quatre jauges de déformation (grille de 10x4 mm) sont collées au centre de l'éprouvette. Les deux jauges longitudinales sont placées en vis-à-vis de part et d'autre de l'éprouvette. Une paire de caméras CCD (Retiga 1300, résolution 1280x1024 px<sup>2</sup>, optique Nikkor 28-70 mm) filme la zone centrale de l'éprouvette sur toute sa largeur. Une caméra est placée perpendiculairement à l'éprouvette. L'autre est orientée de manière à mesurer les déplacements hors plan (Vic3D<sup>®</sup>, Correlated Solutions). Enfin, un extensomètre (50 mm entre couteaux) mesure la déformation moyenne de la région filmée.

Les déformations mesurées par les jauges longitudinales et l'extensomètre ne coïncident pas (Fig. 4-a). Les mesures de champs réalisées avec ViC<sup>3D</sup> ne révèlent toutefois pas de

déformation de flexion qui pourrait expliquer l'écart observé entre les deux jauges longitudinales. Les déplacements hors plans mesurés au cours de l'essai (ViC<sup>3D</sup>) sont inférieurs à 0,2 mm (juste avant rupture) alors que les caméras sont situées à environ 80 cm de l'éprouvette. Dans ces conditions, on suppose le champ de déplacements plan. Par la suite, les champs de déplacements exploités sont calculés à l'aide de CorreliLMT en utilisant la seule caméra placée en face de l'éprouvette. La figure 3-b propose une confrontation des déformations mesurées par jauges et par corrélations d'images numériques (imagettes de 64x64 px<sup>2</sup>, pas de 32 px et calcul de la déformation moyenne sur la surface de la jauge) qui conforte les mesures optiques. La figure 4-b montre un champ de déformations longitudinales avant l'apparition de fortes dégradations (environ 25% de la charge à rupture). L'allure de ce champ confirme le caractère hétérogène du matériau et explique partiellement la dispersion les mesures extensométriques.

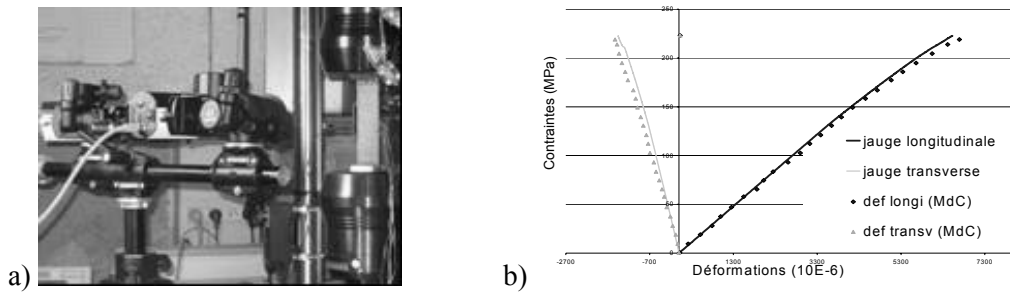


Figure 3. a) essai de traction multi instrumenté sur une éprouvette normalisée de HexMC<sup>®</sup>; b) comparaison des déformations mesurées par jauges et calculées par corrélation d'images.

a) *Multi-instrumented tensile test on a HexMC<sup>®</sup> standard coupon; b) comparison of strains measured by gages and computed by digital image correlation.*

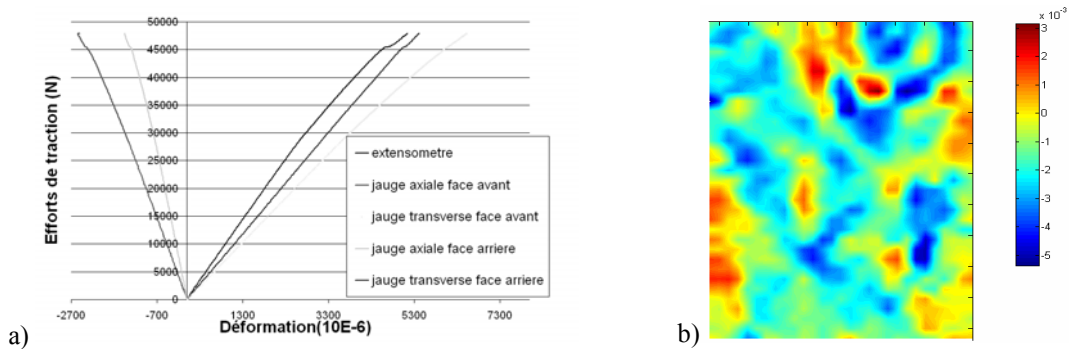


Figure 4. a) déformations mesurées par jauges et extensomètre sur une même éprouvette multi instrumentée lors d'un essai de traction. b) champ de déformations longitudinales obtenu par corrélation d'images numériques.

a) *Strains measured by gages and extensometer during a tensile test b) longitudinal strain field computed by digital image correlation.*

## 2. « EQUILIBRIUM GAP METHOD » ECRITE EN DIFFERENCES FINIES

Une méthode d'identification de champ de propriétés élastiques basée sur l'utilisation de mesures de champs est développée. L'objectif de ces travaux est de mieux comprendre les phénomènes physiques se produisant au cours des essais et de proposer une modélisation permettant d'alimenter les logiciels de calculs pour simuler le comportement de structures utilisant ce type de matériau. En première approche, le comportement du matériau est considéré comme isotrope dans le plan mais hétérogène. On s'intéresse par la suite à des éprouvettes planes sollicitées dans leur plan.

Les travaux présentés sont basés sur l'« Equilibrium Gap Method » (Claire et al, 04). Cette méthode, contrairement à d'autres approches (Bonnet et al, 03) comme celles proposées par (Molimard et al, 05) (Grédiac et al, 02), permet d'identifier des cartes de propriétés élastiques. Elle permet également de suivre l'apparition et le développement de l'endommagement au cours d'un essai mécanique. Cette méthode, déclinée pour des matériaux isotropes, conduit à la résolution d'un système d'équations linéaires où les inconnues sont les modules d'élasticité et les données les champs de déplacements. Dans l'approche proposée ici, l'écriture des équations traduisant l'équilibre est réalisée à l'aide d'une approche différences finies. Les données du problème sont, outre le chargement, le champ des déplacements mesurés à la surface du spécimen. Les mesures de champs sont exploitées pour former une grille permettant de délimiter des éléments et de définir des nœuds. Comme dans (Claire et al, 04), les inconnues du problème sont les caractéristiques élastiques locales, et on suppose dans un premier temps que le module d'Young est constant par élément.

Pour chaque éprouvette, on définit un maillage uniforme dont la taille caractéristique est  $h$ . Le module de l'élément  $K_{i,j}$  (élément du maillage situé à la ligne  $i$  et à la colonne  $j$ ) est alors noté  $E_{i,j}$ . Le coefficient de poisson  $\nu$  est supposé constant. Les nœuds autour de l'élément  $K_{i,j}$  sont numérotés comme indiqué sur la figure 5-a. La composante du déplacement suivant l'axe horizontal (resp. vertical) est notée par la suite  $u$  (resp.  $v$ ). Pour chaque élément  $K_{i,j}$ , on écrit d'abord l'équilibre sur les frontières de l'élément au niveau d'un nœud milieu à l'aide d'une discrétisation par différences finies centrées d'ordre 2 (Fig. 5-b). L'équation (1) correspond par exemple au saut de contrainte normale entre les éléments  $K_{i-1,j}$  et  $K_{i,j}$ . Les éléments aux bords de la grille font l'objet d'un traitement particulier. L'ensemble des équations forme un système linéaire surdéterminé où les inconnues correspondent aux modules  $E_{i,j}$  de tous les éléments considérés. Ce système est résolu par l'utilisation d'un algorithme d'optimisation basé sur une méthode de gradient conjugué, dans Matlab<sup>®</sup>. L'ensemble des modules d'Young est obtenu à une constante multiplicative près. Cette constante est en pratique déterminée grâce à la mesure de l'effort de traction.



Figure 5. a) Numérotation des nœuds de l'élément  $K_{i,j}$  ; b) Ecriture de l'équilibre aux frontières et au centre de l'élément.

a) Classification of  $K_{i,j}$  element nodes; b) equilibrium on the boundaries and on the centre of an element.

$$-\frac{E_{i,j}(u_{i+1/2,j} - u_{i-1/2,j})}{(-1+v^2)h} - \frac{E_{i,j}v(v_{i,j+1/2} - v_{i,j-1/2})}{(-1+v^2)h} + \frac{E_{i-1,j}(u_{i-1/2,j} - u_{i-3/2,j})}{(-1+v^2)h} + \frac{E_{i-1,j}v(v_{i-1,j+1/2} - v_{i-1,j-1/2})}{(-1+v^2)h} = 0 \quad (1)$$

Comme dans (Claire et al, 04), la technique est testée à partir de champs cinématiques issus de simulations par E.F. Diverses géométries d'éprouvettes et de configurations de répartition de modules sont testées (Fig. 6-a et 6-b). Les déplacements nodaux obtenus sont alors utilisés en entrée de la méthode d'identification proposée. On compare enfin les champs de propriétés mécaniques ainsi identifiés à ceux imposés dans l'approche par E.F. Un bon accord est observé, y compris dans le cas d'éprouvettes « normalisées ». On note toutefois la présence d'effets de bords, ainsi qu'une moindre sensibilité dans le cas de faibles différences de modules. Ces points sont à améliorer. La question de l'influence du type de champ cinématique, et donc de la forme de l'éprouvette, est en cours d'étude.

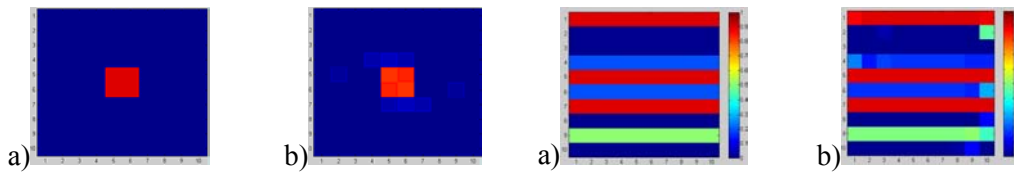


Figure 6. Exemples de cartes de répartition des modules élastiques : a) imposées dans l'approche par Eléments Finis ; b) identifiées (échelle de 0 à 1).

*Examples of elastic moduli maps a) imposed in a Finite Element model; b) identified (range from 0 to 1).*

### 3. APPLICATION AUX ESSAIS DE TRACTION SUR HEXMC®

La technique d'identification décrite ci-dessus est appliquée aux champs de déplacements issus des mesures de champs effectuées durant les essais de traction sur éprouvettes en HexMC®. Les champs de déplacements mesurés par stéréocorrélation d'images sont utilisés comme données d'entrée de la méthode. Une carte d'hétérogénéités du matériau est ainsi établie pour chaque incrément de charge. On observe ainsi des motifs similaires jusqu'à un stade avancé de chargement. Ceci confirme la présence d'hétérogénéités (Fig. 7-a) dès le début du chargement. Les modules initiaux s'éloignent localement de plus de 30% de la valeur moyenne ( $\bar{E}=29,8$  GPa,  $\sigma(E)=5.6$  GPa) (Fig. 7-b). À partir d'un certain stade de chargement, des chutes locales de modules apparaissent. Cet endommagement se développe en différents points de l'éprouvette, et notamment sur la zone où se produira la rupture (Fig. 7a et 7b).

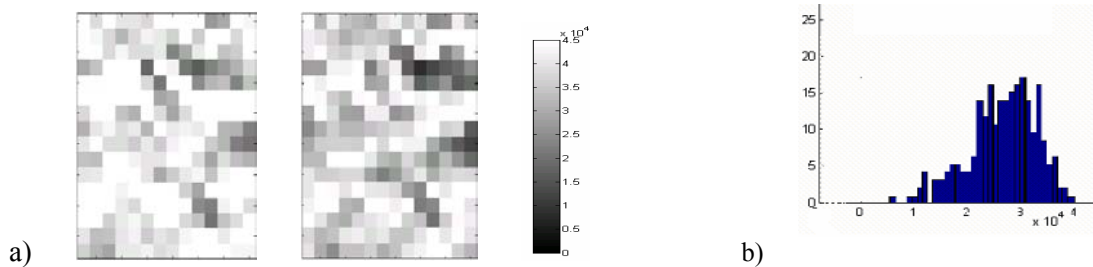


Figure 7. a) contrastes de modules identifiés à partir des champs de déplacement en début d'essai (à gauche), à 75% de la charge à rupture (à droite); b) histogramme de distribution des modules identifiés en début d'essai.

*a) Variability of Young modulus for two steps of loading: at low stress (left), at 75% of the ultimate stress (right); b) Distribution of the young modulus at low stress.*

Pour un pas de temps donné, le champ de modules d'Young identifié est intégré élément par élément dans le code Eléments Finis. Sur les deux bords non libres de l'éprouvette, les conditions aux limites imposées sont issues des mesures de champs. La figure 8 permet de comparer les iso déplacements (dans la direction de traction) issus des mesures de champs (Fig. 8a), d'un calcul avec C.L. issues des MdC mais supposant un matériau homogène (Fig. 8b) et le champ de déplacements calculé par éléments finis en prenant en compte la carte de modules identifiés (Fig. 8c). On note un meilleur accord dans le cas où la carte de modules identifiés est utilisée.

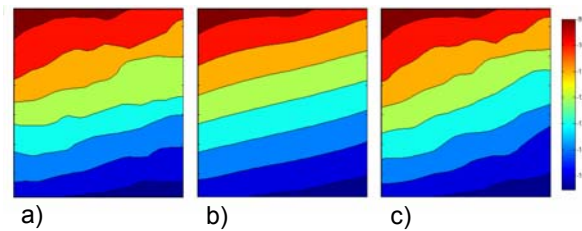


Figure 8. Iso déplacements dans la direction de traction: a) mesurés par corrélation d'images; b) calculés par E.F. avec un matériau homogène; c) calculés par E.F. en utilisant le champ de module identifié.

*Iso displacements with respect to the loading direction: a) measured by digital image correlation; b) computed by F.E. assuming an homogeneous material; c) computed by F.E. taking into account the identified moduli map.*

Des mesures par ultrason sont réalisées sur les deux parties de l'éprouvette rompue. Peu de corrélations entre les champs de modules identifiés et les contrastes US perçus sont notées. L'exception concerne les zones fortement dégradées. Un endommagement important est identifié dans une zone (Fig. 9-b) où une forte atténuation du signal US transmis est mesurée (Fig. 9-c). Une analyse micrographique d'un échantillon prélevé dans cette région devrait permettre d'identifier le type d'endommagement présent.

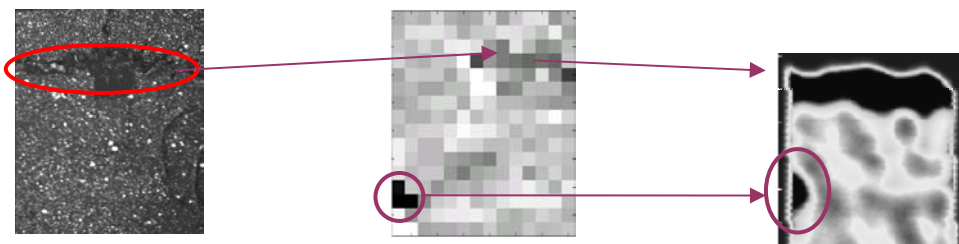


Figure 9. a) Localisation de la zone rompue; b) dégradations identifiées juste avant rupture; c) C-scan (en amplitude) de la partie inférieure de l'éprouvette après rupture.

*a) Location of the rupture zone; b) damage field identified just before rupture; c) C-scan (amplitude) of the inner side of the coupon.*

## CONCLUSION

Des éprouvettes planes obtenues par procédé HexMC<sup>®</sup> sont étudiées par divers procédés : CND, caractérisation physico chimique et essais mécaniques. Les mesures par ultrasons révèlent de fortes variations locales en terme de temps de vol ou d'amplitude. Les résultats des mesures de taux de fibres et des essais de traction réalisés sont dispersés. Certains essais mécaniques bénéficient d'une multi instrumentation : jauges, extensomètres et mesures de



champs par corrélation d'images numériques. Les champs de déformations obtenus sont, dès le début du chargement, très torturés. L'ensemble de ces observations confirme le caractère hétérogène du matériau étudié. Toutefois du fait de son mode de fabrication, on suppose dans un premier temps que le matériau est élastique isotrope (dans le plan de l'éprouvette) bien qu'hétérogène.

Une méthode d'identification de champs de propriétés élastiques basée sur l'« Equilibrium Gap Method » (Claire et al, 04), mais construite sur une approche de type différences finies, est présentée. Les performances de cette approche, pour l'instant limitée aux matériaux isotropes, sont d'abord illustrées par l'utilisation de données simulées.

Cette méthode est appliquée lors d'essais de traction normalisés sur les éprouvettes de HexMC. Des écarts de modules initiaux de l'ordre de 30% sont ainsi identifiés. La carte de modules identifiés (utilisée en entrée d'un code de calcul par E.F.) permet d'obtenir un champ de déplacement simulé proche du champ mesuré. Des comparaisons entre les cartes d'endommagement identifiées et les C-scan sont présentées. Une bonne corrélation n'est notée que dans deux zones dont la zone de rupture. Un lien entre les données US/physico-chimiques et les champs de propriétés mécaniques identifiés reste donc à mettre en évidence.

Remerciements : Nous tenons à remercier la société DDL-Consultants (83330 Le Beausset) et la société Hexcel Composites (01120 Dagneux) pour la fourniture de HexMC<sup>®</sup>, ainsi que le laboratoire Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement (PHASE, Toulouse) pour la mise à disposition des moyens CND.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bonnet M., Dong Bui H. et Constantinescu A., 2003. "Principes variationnels et exploitation de mesures de champs en élasticité", *Mécanique et Industries*, v. 4, Issue 6, pp. 687-697.
- Claire D., Hild F., and Roux S., 2004. "A finite element formulation to identify damage fields: the equilibrium gap method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 61, n°2, pp. 189-208.
- Chang J., Zheng C., Ni Q.Q., 2006. "The ultrasonic wave propagation in composite material and its characteristic evaluation", *Composite Structures*, v. 75, pp 451-456.
- Grédiac M., Toussaint E. and Pierron F., 2002. "Special virtual fields for the direct determination of material parameters with the virtual fields method. 1-Principle and definition", *International Journal of Solids and Structures*, v. 39, n° 10, pp. 2691-2705.
- Molimard J., Le Riche R., Vautrin A. and Lee J.R., 2005. "Identification of the Four Orthotropic Plate Stiffnesses Using a Single Open-hole Tensile Test", *Experimental Mechanics*, v. 45, n° 5, pp. 404-411.