

Essai d'adhérence d'assemblages de composites à l'aide de rampes de compression dynamique

E. BUZAUD - P.-Y. CHANAL / CEA – Gramat

E. GAY - L. BERTHE / Laboratoire procédés et ingénierie en mécanique et matériaux (CNRS), Arts et Métiers ParisTech, Paris

M. BOUSTIE / Département de physique et de mécanique des matériaux, Institut Pprime (CNRS), ENSMA, Université de Poitiers

M. ARRIGONI / Laboratoire brestois de mécanique et des systèmes (LBMS), EA 4325, ENSTA-Bretagne, Brest

La tenue des composites de type carbone/époxy et de leurs assemblages collés suscite un intérêt croissant dans le paysage industriel actuel, particulièrement dans le secteur aéronautique. L'adhérence est l'un des paramètres prépondérants de tenue aux sollicitations mécaniques, et détermine la durée de vie de la structure. Les techniques non destructives conventionnelles ne sont pas satisfaisantes pour mesurer la résistance des assemblages collés et détecter les joints faibles. En revanche, la calibration maîtrisée d'une rampe de compression dynamique à l'aide de la machine GEPI permet d'induire un endommagement plus ou moins prononcé dans le joint de colle et de caractériser ainsi les performances du procédé de collage.

Étude expérimentale du comportement dynamique de joints collés

Un assemblage collé de composites a été soumis à des essais de décollement grâce au moyen expérimental GEPI (Générateur électrique de pression intense). Ce dernier repose sur l'utilisation de profils temporels spécifiques du courant électrique pour générer des rampes de pression dans les matériaux. Le principe consiste à faire passer une forte impulsion de courant entre deux électrodes, générant ainsi un

champ magnétique intense. Leur association conduit à l'application de forces volumiques de Laplace au sein des électrodes (**figure 1a**). La décharge contrôlée du courant permet de créer une rampe de compression s'étalant sur environ 550 ns [1].

Les assemblages testés sont représentatifs d'éléments de structures utilisés dans le domaine aéronautique : ils sont composés de deux échantillons composites plans de 1,35 mm d'épaisseur, séparés par une couche de colle d'une épaisseur

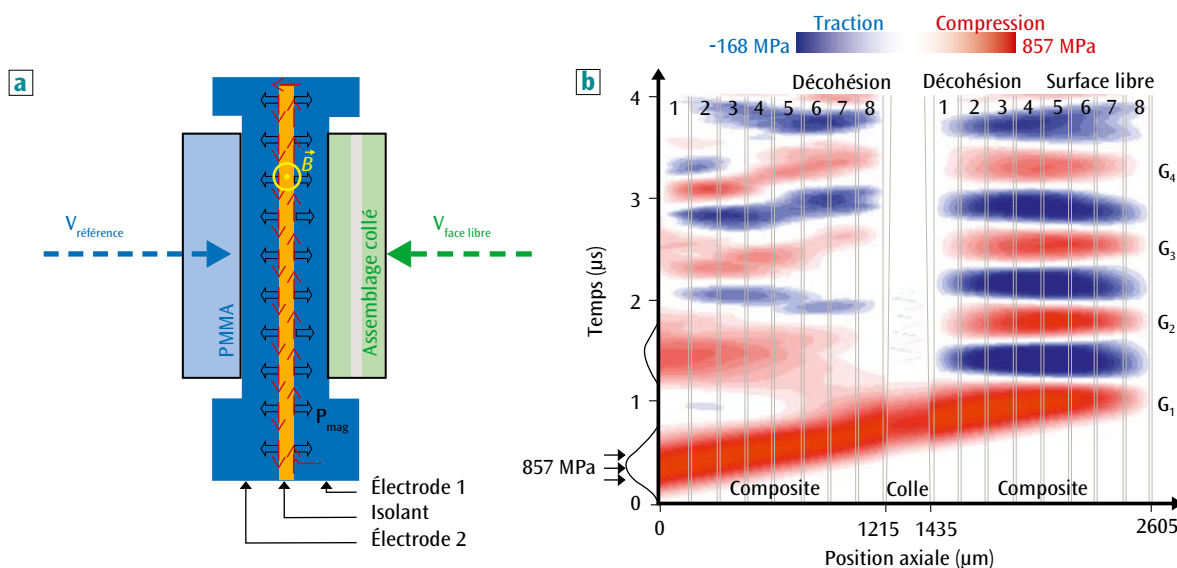


Figure 1. (a) : Schéma en coupe de la partie terminale du GEPI illustrant le principe utilisé pour la génération du chargement dynamique – (b) : Diagramme de marche de l'essai d'adhérence.

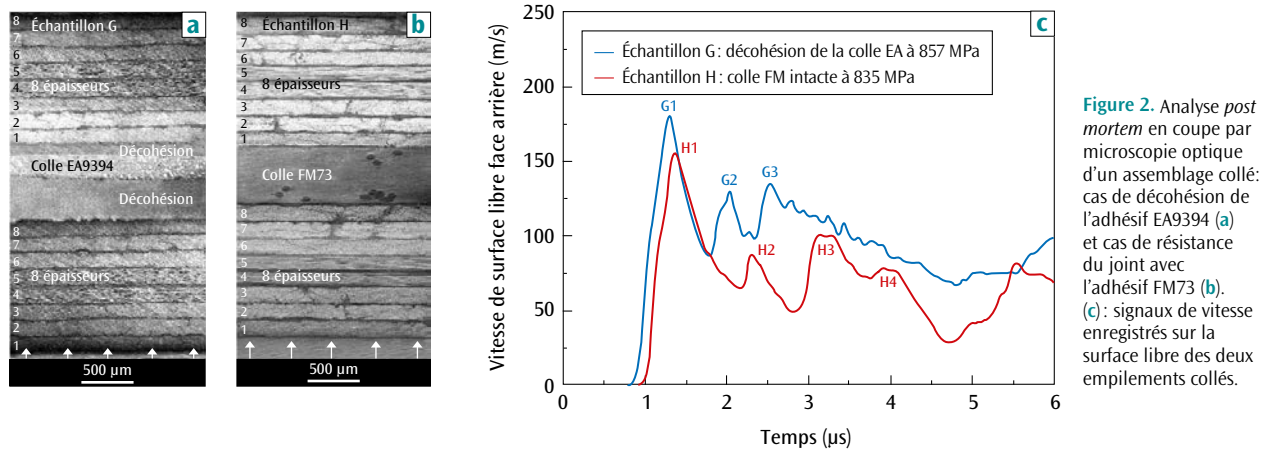


Figure 2. Analyse *post mortem* en coupe par microscopie optique d'un assemblage collé: cas de décohésion de l'adhésif EA9394 (a) et cas de résistance du joint avec l'adhésif FM73 (b). (c) : signaux de vitesse enregistrés sur la surface libre des deux empilements collés.

comprise entre 200 et 500 μm . Chaque échantillon composite est constitué d'un empilement de huit plis unidirectionnels de fibres de carbone (G40-800-24 K) renforcés par une résine époxy Cytec®. Deux types de colle ont été testés pour le joint : une colle époxy de type Hysol® EA9393 et une colle époxy/cyanamid de type Cytec® FM73 [2].

Dans les essais dits « d'adhésion », l'impulsion de compression transmise à l'empilement se propage jusqu'à la face arrière, libre de contrainte, où elle se réfléchit. Le croisement d'ondes de détente au cœur de l'échantillon active le processus de décollement (figure 1b). Une mesure de vitesse est réalisée au niveau de la face libre de l'empilement, tandis qu'une mesure témoin est effectuée sur l'électrode opposée (figure 1a) [1]. La technique de chargement électrique utilisée par GEPI permet d'éviter que l'échantillon ne subisse d'autres agressions liées au montage expérimental, comme c'est le cas pour les techniques d'impact classiques.

La récupération de l'échantillon pour une observation *post mortem* est alors possible, dans l'état où il se trouve à l'issue du chargement calibré appliqué dans le test d'adhésion.

Résultats et interprétation

Pour un chargement identique, l'empilement utilisant la colle FM73 reste intègre (figure 2b), tandis que celui utilisant la colle EA9393 subit une double décohésion de part et d'autre du joint de colle (figure 2a). Ce résultat est cohérent avec celui des essais de pelage quasi statiques réalisés par ailleurs [3].

Cette différence de réponse peut s'analyser dans le profil temporel de la vitesse mesurée en surface libre de l'empilement (figure 2c) : au cours du premier pic de vitesse et jusqu'au temps 1,8 μs , les deux empilements répondent de façon similaire, en amplitude et en temps. Le léger écart constaté résulte essentiellement de la différence d'épaisseur du joint de colle. À partir de cet instant, les réponses des deux empilements divergent progressivement : dans l'un, la période des oscillations du profil de

vitesse correspond à deux fois le temps de transit de l'onde de compression dans l'empilement, tandis que dans l'autre, cette période correspond à deux fois le temps de transit dans une épaisseur de huit plis, indiquant ainsi l'amorce d'une décohésion à l'interface joint de colle-composite.

La modélisation de l'essai utilisant la colle FM73 est conduite sous l'hypothèse d'un comportement élastique homogène de chacune des trois couches de l'empilement. Elle montre que cet empilement a résisté à une contrainte de traction de 300 MPa environ, valeur proche du seuil de rupture dynamique du composite, déterminé par des essais spécifiques sur des échantillons de composite à l'aide de la technique d'écaillage développée sur le moyen GEPI [4]. La capacité adhésive de ce joint collé est donc optimale.

Conclusion

La possibilité d'évaluer la résistance d'un joint collé à une agression mécanique dynamique calibrée à l'aide d'un générateur à haute puissance pulsée a été démontrée. Ce résultat ouvre la porte au développement d'un nouveau procédé industriel de contrôle non destructif de joints collés, capable d'isoler des défauts de fabrication jusque-là indétectables.

Références

- [1] P. L. HEREIL, F. LASSALE, G. AVRILLAUD, "GEPI: An ICE Generator for Dynamic Material Characterization and Hypervelocity Impact", *Shock Compression of Condensed Matter, AIP Conf. Proc.*, p. 1209-1212 (2003).
- [2] E. GAY, *Comportement de composites sous choc induit par laser*, Thèse de doctorat des Arts et Métiers ParisTech, 2011.
- [3] E. GAY, L. BERTHE, E. BUZAUD, M. BOUSTIE, M. ARRIGONI, "Shock adhesion test for composite bonded assembly using a high pulsed power generator", *J. Appl. Phys.*, **114**, 013502 (2013); doi: 10.1063/1.4811696.
- [4] B. ERZAR, E. BUZAUD, "Shockless spalling damage of alumina ceramic", *Eur. Phys. J. – ST*, **206**, p. 71-77 (2012).