

# Vers des interfaces collées haute performance pour les composites par l'introduction au laser d'hétérogénéités spatiales

## *Towards high performance bonded joints for composites by laser-based introduction of spatial heterogeneities*

Gilles Lubineau<sup>1</sup>, Ran Tao<sup>1</sup> and Marco Alfano<sup>2</sup>

1 : COHMAS Laboratory, Physical Sciences and Engineering Division (PSE)  
King Abdullah University of Science and Technology (KAUST)  
23955-6900, Thuwal, Saudi Arabia  
e-mail : gilles.lubineau@kaust.edu.sa and ran.tao@kaust.edu.sa

2 : Department of Mechanical, Energy and Management Engineering,  
University of Calabria,  
87036, Rende Ville (CS), Italy  
e-mail : marco.alfano@gmail.com

### Résumé

Les matériaux composites ont un rôle majeur à jouer dans la diminution de la masse des structures, en particulier dans le domaine des transports (automobile, aéronautique, etc.). Cependant, une utilisation optimale des composites passe par la mise au point de nouvelles techniques d'assemblage, reposant beaucoup plus sur le collage. Les assemblages collés s'avèrent souvent fragiles, donnant lieu à des propagations de fissures instables. Nous proposons donc une nouvelle stratégie afin de rendre de telles interfaces plus ductiles par l'introduction de nouveaux mécanismes de dissipation. Ici, une contribution non-locale est introduite en plus de l'énergie classiquement dissipée par la séparation de l'interface. Cette contribution non-locale provient de l'activation à la demande d'un mécanisme de pontage, totalement contrôlé par le traitement hétérogène des substrats à assembler. Ainsi, l'introduction bien choisie de contrastes spatiaux dans les contraintes à rupture et les tenacités d'interface permet de forcer l'apparition de ligaments dans la couche d'adhésif. Ceux-ci participent à rendre progressive la dégradation de l'interface. Ce nouveau concept permet d'envisager des conceptions très variées avec une performance bien supérieure aux interfaces classiques.

### Abstract

Composite materials have a major role to play in reducing the mass of structures, particularly in the field of transport (automotive, aeronautics, etc.). However, optimum use of composites requires the development of new assembly techniques, relying much more on adhesive bonding. Bonded assemblies often prove fragile, giving rise to unstable crack propagation. We propose here a new strategy to make such interfaces more ductile by introducing new dissipation mechanisms. Here, a non-local contribution is introduced in addition to the energy conventionally dissipated by the separation of the interface. This non-local contribution comes from the activation on demand of a bridging mechanism, totally controlled by the heterogeneous treatment of the substrates to be assembled. Thus, the well-chosen introduction of spatial contrasts in the breaking stresses and the interface toughness makes it possible to force the appearance of ligaments in the adhesive layer. These help to make the degradation of the interface progressive. This new concept makes it possible to envisage very varied designs with a performance far superior to conventional interfaces.

**Mots Clés :** collage, délaminage, tenacité, pontage, dissipation non-locale

**Keywords :** adhesive bonding, delamination, toughness, bridging, non-local dissipation

## 1. Introduction

La généralisation de structures complexes quasi-intégralement réalisées en polymère renforcé de fibres continues (FRP, *Fiber reinforced Polymers*) fait rapidement émerger le besoin de méthodes fiables et rapides pour l'assemblage et la réparation de tels matériaux. L'amélioration des techniques d'assemblage est d'autant plus nécessaire que l'utilisation des FRP sort désormais largement du cadre aéronautique pour se généraliser à des industries à larges volumes de production et faibles marges telles que l'industrie automobile et la construction. Or, les assemblages représentent encore à ce jour

une fraction majeure du coût de production. Les fixations mécaniques classiques, utilisant des rivets ou des boulons, présentent également plusieurs inconvénients techniques lorsqu'appliquées aux FRP. Elles augmentent la masse embarquée et s'accompagnent de problèmes inhérents aux concentrations de contrainte, à la rupture des fibres dues au perçage de trous et au besoin de réglage des jeux. En conséquence, d'autres techniques d'assemblage, plus performantes et moins coûteuses, sont nécessaires.

Les récents progrès réalisés dans le domaine des adhésifs structuraux et des techniques de préparation de surface permettent d'envisager le collage par adhérence comme une technologie pouvant potentiellement remplacer le rivetage et le boulonnage. Actuellement, des techniques aussi diverses que la co-polymérisation ou le collage secondaire existent, suivant l'état polymérisé ou non des pièces au moment du collage.

La préparation de la surface est alors un élément clé de la performance du collage. Les techniques classiques incluent l'utilisation d'un tissu d'arrachage, le ponçage ou le pré-nettoyage de la surface par traitement plasma ou laser. Alors que les deux premiers souffrent généralement d'une grande variabilité et dépendent fortement de l'opérateur, le pré-traitement au laser est généralement beaucoup plus facile à reproduire et permet d'obtenir des collages plus fiables. Ce traitement de surface peut être utilisé pour préparer des assemblages entre FRP/FRP [1], métal/métal ou des assemblages mixtes métal/FRP [2]. Il a été démontré qu'un tel traitement modifie à la fois la chimie de surface et la texture, contribuant à améliorer l'adhésion substrat/adhésif aussi bien du point de vue chimique que mécanique.

Mais le prétraitement au laser est également intéressant car il peut être facilement utilisé pour traiter les interfaces suivant des motifs géométriques prédéfinis et ainsi introduire une hétérogénéité contrôlée. Dans cette situation, les propriétés à rupture de l'interface (contrainte maximale, ténacité) ne sont pas uniformes et obéissent à une organisation spatiale prédéfinie. Des modèles de comportement existent déjà dans des cas simples et montrent que cette structuration de la surface augmente les propriétés effectives du collage en raison de (i) une surface de contact accrue, (ii) une multiplication des sites d'interaction physique à l'échelle micro et (iii) des mécanismes de déviation des chemins de fissure [3]. Mais très peu d'études ont examiné le potentiel d'application de ces techniques aux FRP.

Nous montrons dans ce travail comment l'introduction d'hétérogénéités très simples peut se traduire par la formation de ligaments entre les deux substrats. Ces ligaments participent à l'introduction d'un mécanisme de pontage qui augmente la ténacité effective de l'assemblage. Nous nous limitons ici à l'illustration numérique du cas très simple où un seul ligament est généré par l'introduction de deux zones de plus forte ténacité, correspondant typiquement à un traitement laser localisé. Dans une première partie, le modèle numérique utilisé est présenté. Dans un second temps, nous étudions en détails les différentes phases de formation du ligaments et comment celle-ci est reliée aux contrastes de ténacité et de contrainte à rupture entre la surface nominale et les zones traitées.

## 2. Essai virtuel de délaminage sur interface hétérogène

La simulation a été réalisée à l'aide d'un modèle DCB 2D afin d'étudier la formation et l'évolution du pontage par un ligament adhésif généré spontanément pendant la rupture de l'interface. Le modèle consiste en des substrats et une couche d'adhésif élastiques et isotropes. Deux interfaces cohésives d'épaisseurs nulles sont introduites entre la couche d'adhésif et chacun des substrats comme illustré à la Fig. 1. Les propriétés de base des interfaces cohésives sont dites *propriétés nominales*. Sur deux zones bien spécifiques (points d'ancrage du ligament, définis par leur longueur,  $b = 1\text{mm}$ , et leur séparation  $g = 2\text{mm}$ ), nous supposons que les propriétés des interfaces sont plus élevées en raison

d'un traitement approprié.

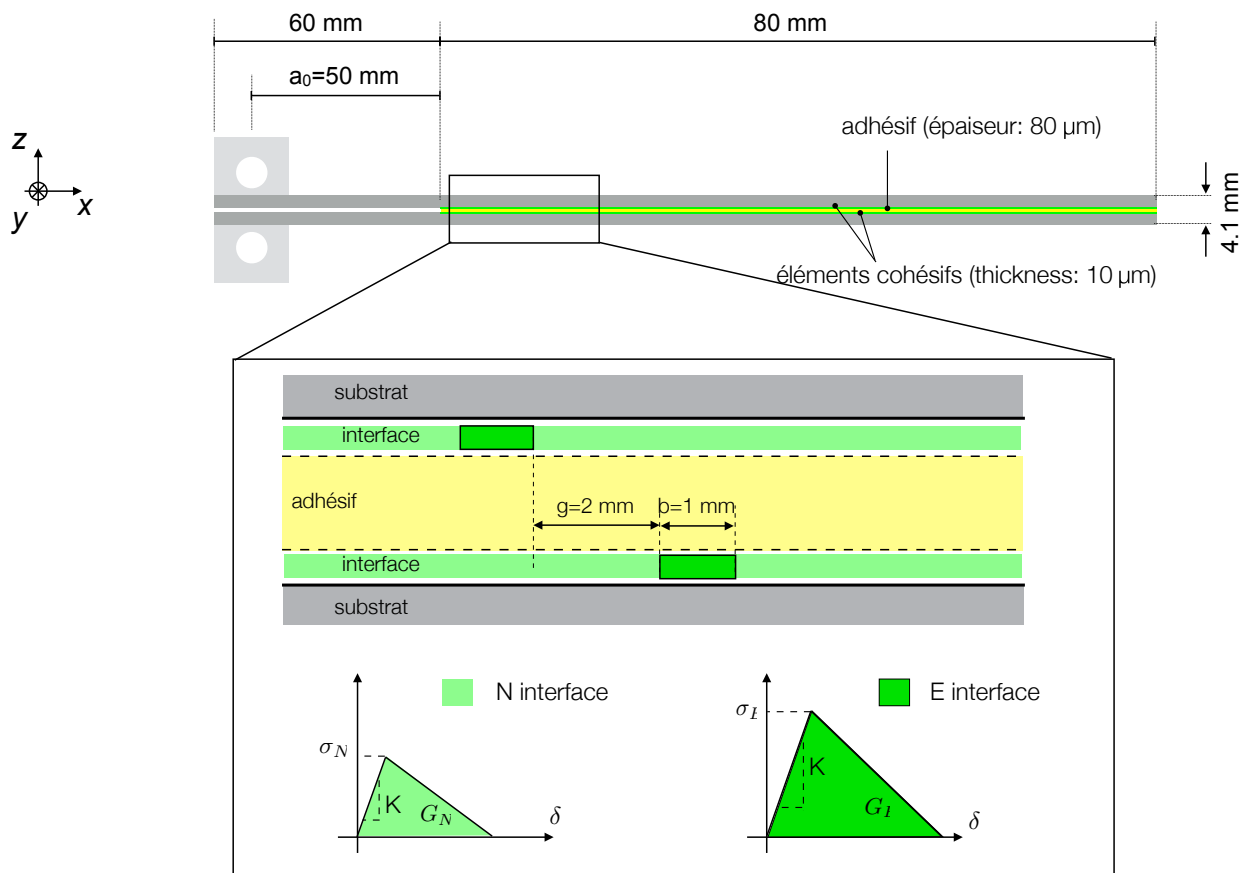


Fig. 1. Représentation schématique du modèle DCB 2D et distribution spatiale des propriétés d'interface dites "nominale" (zone N) et "élevée" (zone E).

Un modèle d'interface cohésive bi-linéaire est utilisé pour décrire les zones de propriétés nominales (zone N) et de propriétés élevées (zone E). La raideur est identique pour tous les éléments :  $K = 1.5 \times 10^9 \text{ MPa/m}$ . Les propriétés des zones E sont fixées à  $\sigma_E = 29 \text{ MPa}$  et  $G_E = 0.75 \text{ kJ/m}^2$ . En ce qui concerne les zones N, la tenacité de l'interface est fixée soit à  $G_N = 0.40 \text{ kJ/m}^2$  ou  $G_N = 0.75 \text{ kJ/m}^2$ , ces valeurs correspondant à des traitements de surface standards [1]. Plusieurs valeurs de la contrainte à rupture dans les zones N ( $\sigma_N$ ) sont étudiées afin de comprendre l'effet de différents contrastes dans les propriétés d'interface : 10%, 50%, et 100% de  $\sigma_E = 29 \text{ MPa}$ .

La figure 2 montre une réponse (force/déplacement) classique ainsi que des représentations schématiques des profils de fissure correspondants. Une fissure d'interface commence à se propager à partir de la zone N inférieure au point 1. Cette fissure est arrêtée en raison de la formation du ligament au point 2, transite vers la zone N supérieure à l'étape 3 et se propage jusqu'à la formation complète du ligament au point 4. Au point 5, le ligament commence à se détacher de l'interface inférieure en zone E. Un nouveau ligament apparaît au point 6 et transite vers l'interface inférieure en zone N au point 7. Au point 8, le ligament est complètement détaché de l'interface inférieure.

Les courbes (force/déplacement) pour différentes valeurs de contrainte  $\sigma_N$  dans les zones N et pour deux valeurs de tenacités  $G_N$  sont tracées Fig. 3. Pour les deux valeurs de tenacité,  $G_N = 0.40 \text{ kJ/m}^2$  et  $G_N = 0.75 \text{ kJ/m}^2$ ,  $\sigma_N = 2.9 \text{ MPa}$  et  $\sigma_N = 15 \text{ MPa}$  résultent dans la formation de ligaments supplémentaires après le ligament principal comme déjà illustré Fig. 2. Il est à noter que  $\sigma_N = 29 \text{ MPa}$

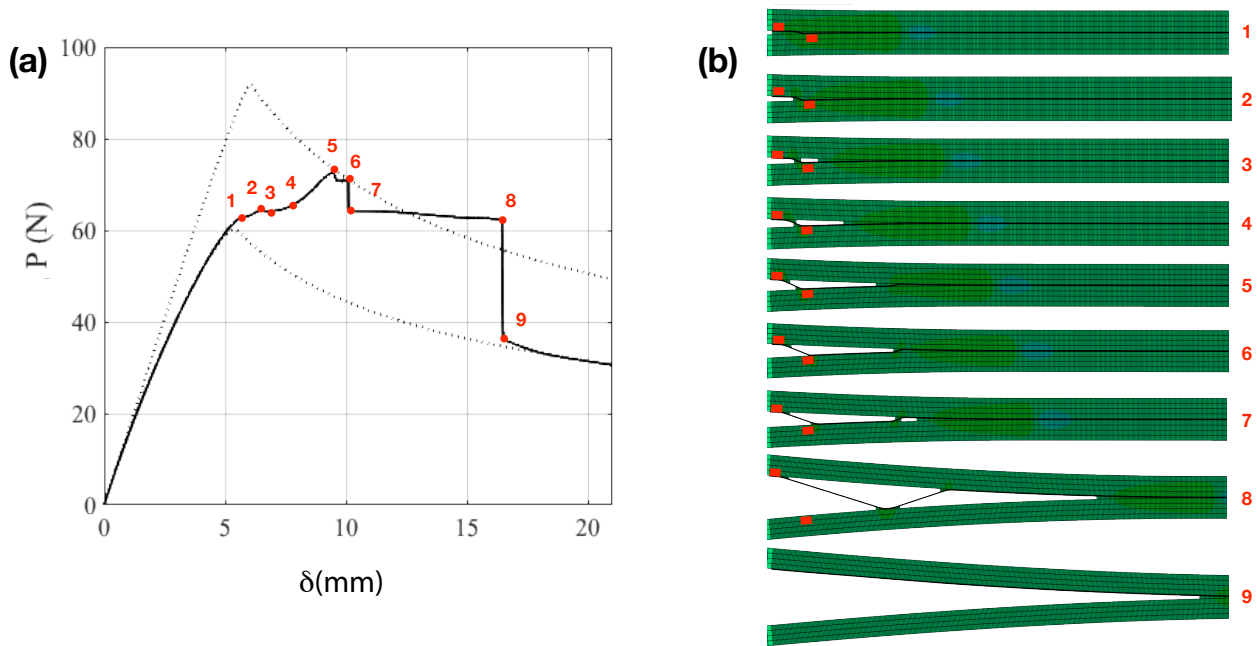


Fig. 2. (a) Réponse (force/déplacement) classique pour  $\sigma_N = 2.9\text{MPa}$  et  $G_N = 0.40\text{kJ/m}^2$ . Les lignes pointillées correspondent aux réponses d'interfaces uniformes dont les propriétés seraient les propriétés nominales (courbe inférieure) ou les propriétés élevées (courbe supérieure). (b) Profils de fissure correspondants. Les zones rouges indiquent dans chaque schéma les zones E.

ne résulte pas dans la formation de ligaments.

Dans ce qui suit, la tenacité nominale de l'interface est fixée à  $G_N = 0.40\text{kJ/m}^2$ . La tenacité macroscopique apparente pendant la délaminage est mesurée par une procédure de réduction classique telle que définie dans les standards relatifs aux essais DCB. Nous réalisons ceci pour deux configurations  $\sigma_N = 2.9\text{MPa}$ ,  $G_N = 0.40\text{kJ/m}^2$  et  $\sigma_N = 15\text{MPa}$ ,  $G_N = 0.40\text{kJ/m}^2$ . Les résultats sont tracés Fig. 4 en fonction de la longueur de fissure apparente. Les régions hachurées correspondent à l'énergie additionnelle engendrée par le pontage des ligaments d'adhésif. La part locale de la dissipation (associée donc uniquement à la séparation des éléments cohésifs) est calculée en supposant la propagation sur une interface uniquement :  $E_{local} = (\Delta a - b) \times G_N + bxG_E$ , où  $\Delta a$  est l'avance de fissure. Il est clair que l'augmentation du contraste de contrainte à rupture entre les zones N et E participe à l'augmentation de la tenacité apparente.

### 3. Conclusion

Nous avons présenté comment un traitement hétérogène adéquat des substrats permet de piloter le développement de ligaments de pontage lors de la propagation de la fissure interfaciale. Ces ligaments se traduisent par une augmentation importante de la dissipation non-locale, qui vient s'ajouter à la dissipation locale intrinsèque aux éléments cohésifs, Le résultat est donc une interface beaucoup plus progressive dans sa rupture, ce qui ouvre la voie à de nouvelles stratégies de conception pour des assemblages collés fiables et non-fragiles.

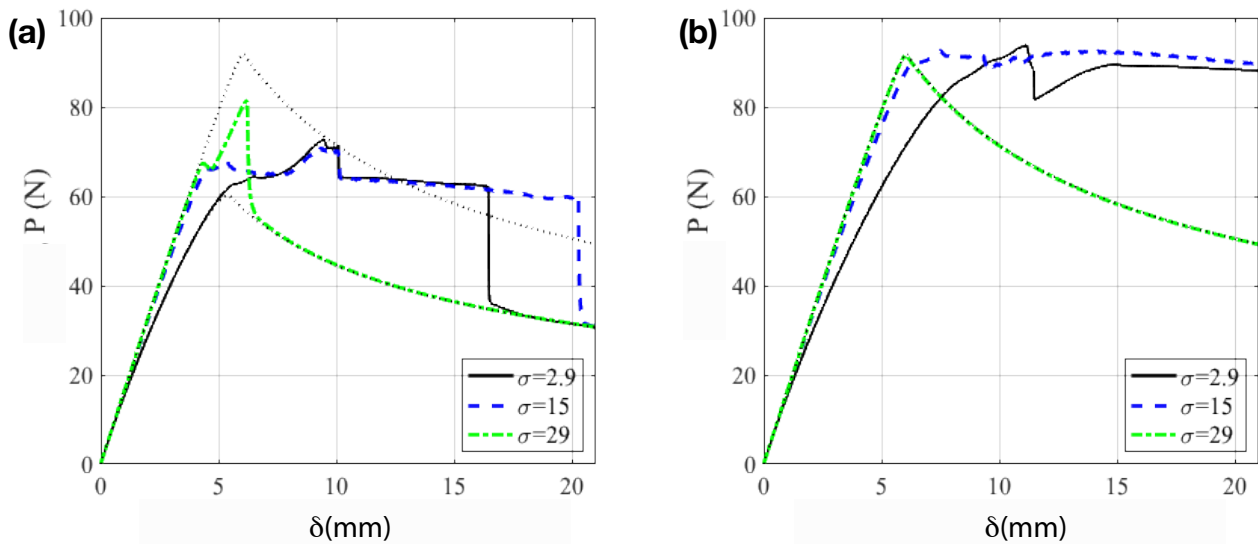


Fig. 3. (a) Réponses (force/déplacement) pour différentes valeurs de  $\sigma_N$  à valeur de tenacité  $G_N = 0.40 \text{kJ/m}^2$  fixée. (b) Réponses (force/déplacement) pour différentes valeurs de  $\sigma_N$  à valeur de tenacité  $G_N = 0.75 \text{kJ/m}^2$  fixée. Les lignes pointillées correspondent aux réponses d'interfaces uniformes dont les propriétés seraient les propriétés nominales (courbe inférieure) ou les propriétés élevées (courbe supérieure).

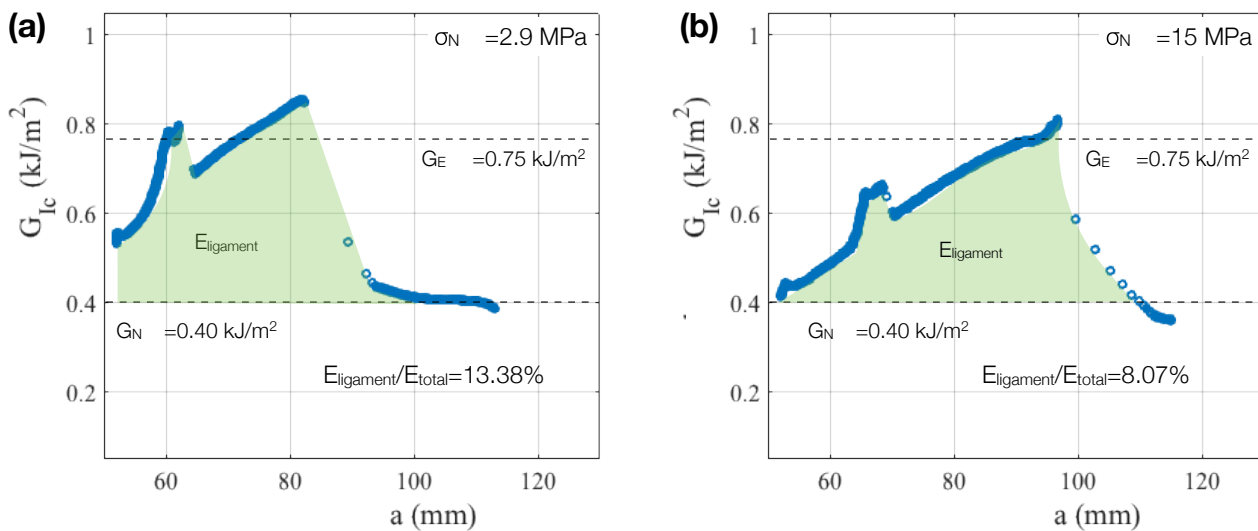


Fig. 4. (a) Courbe-R pour la configuration  $\sigma_N = 2.9 \text{MPa}$ ,  $G_N = 0.40 \text{kJ/m}^2$ . (b) Courbe-R pour la configuration  $\sigma_N = 15 \text{MPa}$ ,  $G_N = 0.40 \text{kJ/m}^2$ . Les lignes pointillées correspondent aux courbes R pour des interfaces uniformes N ou E. Les régions hachurées correspondent à l'énergie additionnelle engendrée par le pontage des ligaments d'adhésif.

**Références**

[1] R. Tao, M. Alfano, G. Lubineau « Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 109, pp. 84 – 94, 2018.  
 [2] E. Hernandez, M. Alfano, D. Pulungan, G. Lubineau « Toughness amplification in copper/epoxy joints through pulsed laser micro-machined interface heterogeneities », *Scientific Reports* Vol. 7 n° 1, pp. 16344, 2017.  
 [3] R. Tao, M. Alfano, G. Lubineau « In situ analysis of interfacial damage in adhesively bonded composite joints subjected to various surface pretreatments », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 116, pp. 216–223, 2019.