



HAL
open science

Stratégies d'amélioration de la tenue au délaminage des interfaces

Federica Daghia

► **To cite this version:**

Federica Daghia. Stratégies d'amélioration de la tenue au délaminage des interfaces. JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606813

HAL Id: hal-04606813

<https://hal.science/hal-04606813v1>

Submitted on 10 Jun 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.

Stratégies d'amélioration de la tenue au délaminage des interfaces

Strategies to improve the delamination resistance of interfaces

Federica Daghia¹

1 : LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay
Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS
4 av. des Sciences, F-91190, Gif-sur-Yvette, France
e-mail : federica.daghia@ens-paris-saclay.fr

Résumé

Les composites stratifiés et les assemblages collés présentent des zones de faiblesse où une fissure peut facilement initier et propager. Pour garantir la fiabilité de ces structures, il est donc nécessaire de maîtriser l'amorçage et la propagation des fissures interfaciales. Ce travail s'intéresse aux stratégies possibles pour améliorer la tenue au délaminage des interfaces. En particulier, il s'appuie sur des simulations à base de modèles de zones cohésives (CZM) pour donner une clé de lecture des solutions développées en littérature, et proposer des pistes de conception d'interfaces améliorées.

Abstract

Laminated composites and adhesively bonded assemblies involve weak planes in which a crack may easily initiate and propagate. In order to guarantee the reliability of such structures, it is necessary to control the initiation and propagation of interfacial cracks. This work focuses on possible strategies to improve the delamination resistance of interfaces. In particular, it takes advantage of numerical simulations based on cohesive zone models (CZM) in order to interpret the solutions developed in the literature, and to propose some ideas for the design of improved interfaces.

Mots Clés : délaminage, modèles de zone cohésive, zone d'élaboration de la fissure

Keywords : delamination, cohesive zone models, crack process zone

1. Introduction

Les structures composites stratifiées, ainsi que les assemblages collés, présentent des zones de faiblesse où une fissure peut s'amorcer et propager, avec comme conséquence possible la ruine de la structure. La recherche de solutions pour l'amélioration de la tenue au délaminage, ou à la rupture de joints collés, est donc un domaine très actif. D'une part, des modifications des zones d'interface sont proposées pour améliorer leurs propriétés à rupture, comme la création de joints hybrides incluant différents types de particules, fibres ou filets [1, 2, 3] ou l'introduction de trous, fissures sacrificielles ou texturations dans l'interface [2, 4, 5]. D'autre part, des modèles sont développés pour prédire l'amorçage et la propagation d'une fissure d'interface, comme les modèles de zone cohésive (CZM), qui existent depuis longtemps [6, 7], et gagnent une importance croissante dans les simulations numériques [8].

Dans ce papier, nous nous intéressons aux différents leviers qui peuvent être utilisés pour améliorer la tenue d'une interface. L'objectif est de maîtriser la réponse globale de la structure avec sa jonction, ce qui constitue la préoccupation des industriels. Deux aspects clés définissent la réponse structurelle idéale : une résistance initiale élevée (et donc un amorçage tardif de la fissuration, ce qui est défini ici comme la présence d'une diminution visible de la rigidité globale), ainsi qu'une propagation progressive et stable, éventuellement jusqu'à l'arrêt, d'une fissure existante. Les deux aspects sont ici explorés grâce à des simulations numériques qui décrivent l'interface comme une zone cohésive, et qui permettent d'appréhender le rôle des différents aspects du problème mécanique dans les conditions d'amorçage et propagation d'une fissure d'interface. En effet, la réponse de la structure est contrôlée par les propriétés de l'interface, mais aussi par la configuration structurelle (matériaux, géométrie,

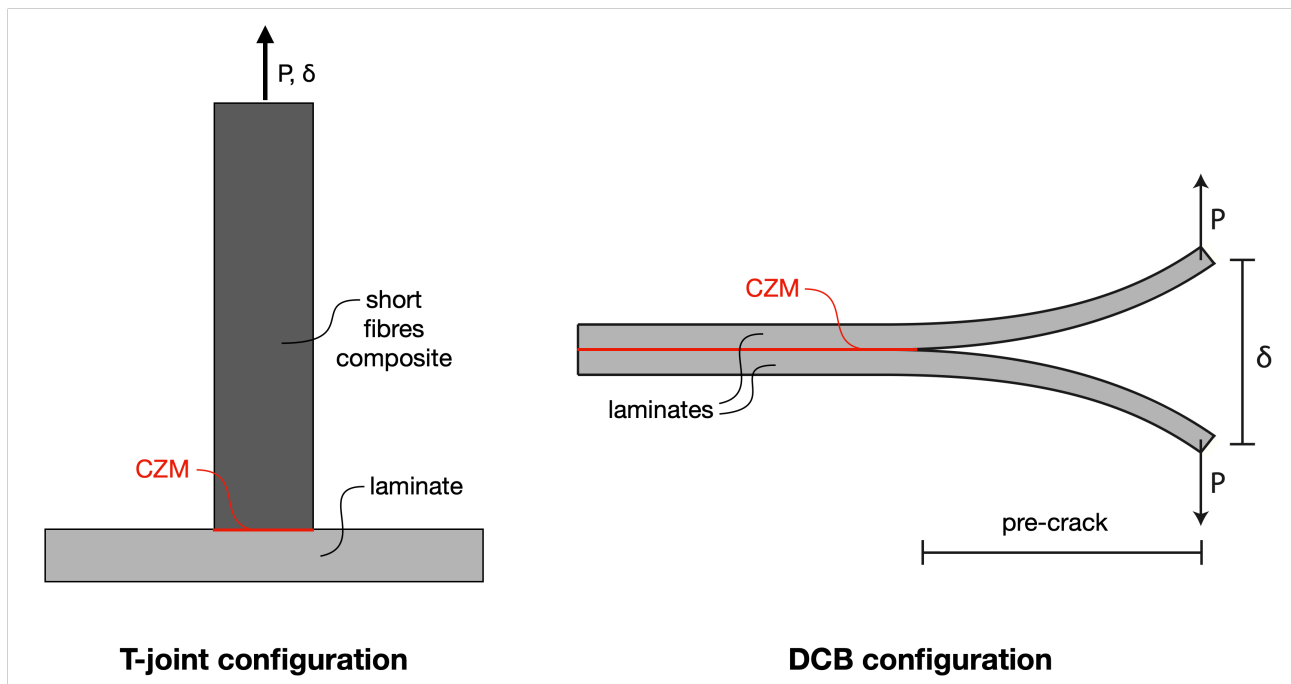


Fig. 1.: Configurations de jonctions considérées dans ce travail

chargements, conditions aux limites) qui détermine les concentrations de contraintes menant à l'amorçage, ainsi que l'énergie disponible pour la propagation de fissure. L'objectif de ce travail est de fournir des pistes pour la compréhension des différents paramètres qui contrôlent l'amorçage et la propagation de fissures d'interface, et ainsi permettre la conception de structures et d'interfaces avec un comportement amélioré.

2. Simulations numériques

Les simulations numériques présentées dans ce travail sont effectuées avec le logiciel éléments finis commercial Abaqus [9].

Deux configurations de jonctions, présentées en Figure 1, sont utilisées tout le long pour illustrer les différents aspects : la première est un joint en T entre une plaque en composite stratifié à fibres longues et une languette surinjectée en composite à fibres courtes, étudié au cours de la thèse de Xiaofei Song [10], la deuxième correspond à l'essai classique de caractérisation d'interface en mode I, le *Double Cantilever Beam* (DCB), considéré notamment en [11].

Dans les deux cas, les substrats sont considérés élastiques, avec des propriétés mécaniques précisées dans les papiers d'origine. Les interfaces sont modélisées par des éléments cohésifs triangulaires, natifs dans Abaqus, qui seront discutés plus en détail en Section 4. Pour permettre de représenter la courbe d'équilibre statique de la structure même en cas de propagation instable, une stratégie de pilotage de la simulation en termes de dissipation globale, inspirée de [12], est implantée dans un élément utilisateur.

3. Le rôle de la configuration structurelle

Même avant de prendre en considération les propriétés de la zone d'interface, nous allons nous intéresser au rôle essentiel joué par la configuration structurelle (matériaux, géométrie, chargements, conditions aux limites) sur l'amorçage et la propagation d'une fissure d'interface. En effet, la conception de la liaison a une influence au premier ordre sur le niveau de chargement qui correspond à l'amorçage de la fissure, ainsi que sur la stabilité de sa propagation. Ainsi, elle constitue le premier levier essentiel pour l'obtention d'une réponse structurelle optimale.

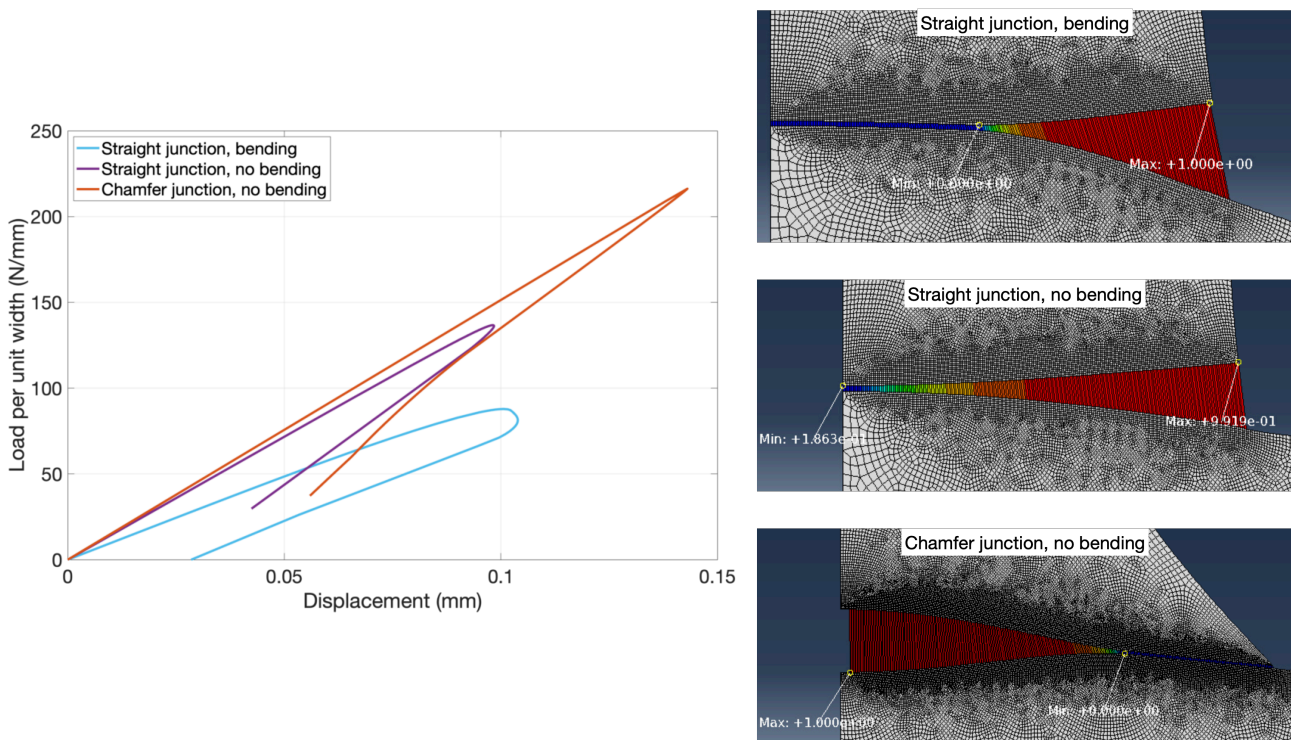


Fig. 2.: Réponse de différentes configurations pour un joint en T

3.1. Amorçage

L'amorçage d'une fissure a lieu en général en correspondance d'une concentration de contraintes, qui peut être engendrée par un défaut ou par un accident de géométrie de la structure. Selon la géométrie de la structure, les chargements et les conditions aux limites appliqués, la concentration de contraintes peut atteindre des niveaux très différents, et ainsi modifier fortement le niveau de chargement qui correspond à la création d'une fissure, pour des propriétés d'interface fixées.

À titre d'exemple, considérons le cas du joint en T, en faisant varier la condition aux limites pour autoriser, ou pas, la flexion de la plaque support, ainsi que la forme du pied de la partie surinjectée. Quelques résultats de cette étude, notamment les courbes flux d'effort vs déplacement, ainsi que la carte d'endommagement de l'interface cohésive au moment où la valeur maximale du paramètre d'endommagement est atteinte, sont illustrés en Figure 2. Ces résultats permettent de voir qu'une condition aux limites qui autorise la flexion de la plaque support (courbe bleue, image du haut) donne lieu à une réponse globale beaucoup plus souple, et qu'elle génère une concentration de contraintes beaucoup plus significative qu'une condition aux limites qui n'autorise pas la flexion (courbe violette, image du milieu). Cela engendre une diminution précoce de la rigidité globale de la structure, ainsi qu'une valeur de flux d'effort maximal plus faible pouvant être transféré par le joint avant rupture. Un choix judicieux de la forme du pied de la partie surinjectée permet également de diminuer la concentration de contraintes, et ainsi de retarder ultérieurement l'amorçage de la fissure, ainsi que d'en modifier le lieu (courbe rouge, image du bas).

3.2. Propagation

Une fois la fissure amorcée, la nature stable ou instable de sa propagation dépend du ratio entre l'énergie dissipée et celle libérée par son avancée. En particulier, l'énergie dissipée est associée à une propriété de la zone d'interface, le taux critique de restitution d'énergie, et elle sera discutée en Section 4, alors que l'énergie libérée dépend directement de la configuration structurelle.

En considérant l'exemple du joint en T, la rupture de l'interface entre les zones à fibres longues et fibres courtes engendre la libération de l'énergie élastique stockée dans la languette, ainsi que dans la

plaque support. Cette énergie est proportionnelle, par exemple, à la longueur de la languette : ainsi, plus la languette est longue, plus la propagation aura tendance à devenir instable (voir Figure 3 pour une interprétation schématique). Atteindre une propagation stable de la fissure dans cette configuration structurale signifierait être en mesure de dissiper dans l'interface toute l'énergie élastique stockée dans le reste de la structure, ce qui peut rapidement devenir hors de portée pour des propriétés d'interface atteignables dans la réalité.

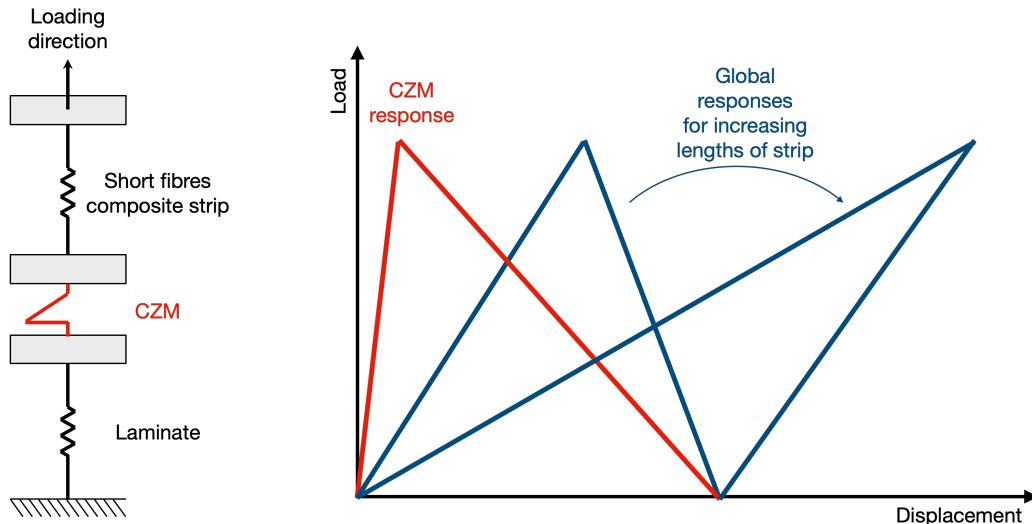


Fig. 3.: Interprétation schématique d'un joint en T et stabilité de la propagation

Une configuration plus propice à la propagation stable de la fissure est celle classiquement retenue pour l'essai *Double Cantilever Beam* (DCB), illustrée en Figure 4. Dans cette configuration, la souplesse évolue graduellement avec l'avancée de la fissure, ainsi l'énergie libérée peut être dissipée par l'interface au fur et à mesure de la propagation. La présence d'un chargement de type moment à la place de la condition classique en effort permet de stabiliser davantage la propagation, car elle élimine le rôle du bras de levier dans la définition de l'énergie élastique.

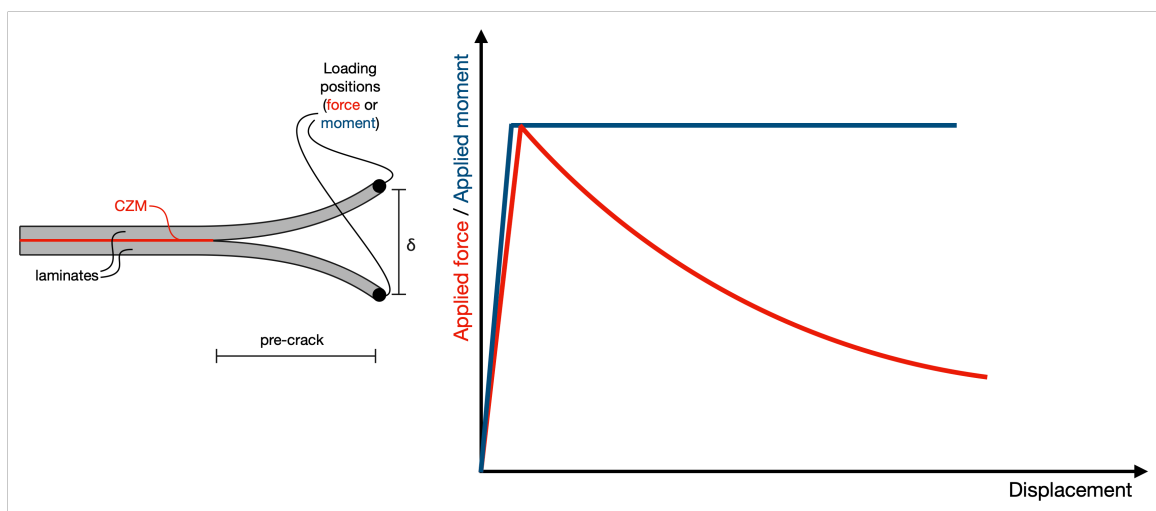


Fig. 4.: Conditions de propagation pour l'essai DCB - attention : échelles non significatives

En vue du changement de raideur de la structure engendré par la propagation de la fissure, les conditions de pilotage du chargement sont également essentielles, et une condition d'effort imposé est en général moins favorable à la stabilité de la propagation qu'une condition de déplacement imposé.

4. Le rôle des propriétés d'interface

Une fois la configuration structurelle fixée, le rôle des propriétés de l'interface peut être appréhendé facilement en considérant une modélisation de type Zone Cohésive (CZM). Il s'agit d'une loi de comportement qui relie la contrainte au saut de déplacement de part et d'autre de l'interface, et qui inclut ainsi une dimension caractéristique, c'est à dire l'épaisseur de l'interface h_i , permettant de fixer l'énergie dissipée par unité de surface créée. Les paramètres clés qui gouvernent le comportement de la CZM, illustrés en Figure 5, sont la contrainte maximale σ_{max} , qui contrôle les conditions d'amorçage local de la fissure, ainsi que l'énergie nécessaire à la propagation, ou taux critique de restitution d'énergie G_c , qui correspond à l'aire sous la courbe de comportement et contrôle les conditions de propagation.

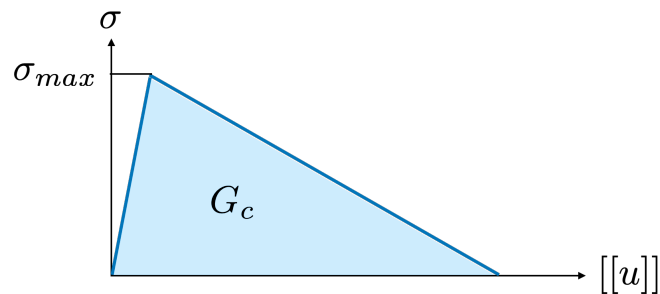


Fig. 5.: Paramètres clé de la CZM

Ces deux propriétés concourent à déterminer la longueur l_c de la *process zone*, où la fissure est en train de se développer. On a [13] :

$$l_c \propto \frac{EG_c}{\sigma_{max}^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

avec E le module d'Young du matériau autour de la fissure. La taille de cette zone par rapport aux dimensions caractéristiques de la structure détermine le caractère plus ou moins progressif de la propagation.

Pour illustrer ces propos, considérons à nouveau les deux configurations structurelles décrites en Section 2, c'est à dire le joint en T (ici avec condition aux limites en flexion et pied droit) et le DCB. Les réponses en termes de force versus déplacement de ces deux structures pour une loi CZM triangulaire, avec différentes valeurs de σ_{max} et G_c , sont illustrées en Figure 6. Même si les valeurs retenues pour ces paramètres sont différentes entre les deux études, des tendances peuvent être dégagées en considérant leur variation relative au sein de chacun des essais, ainsi que les longueurs de *process zone* en découlant.

Les courbes bleues correspondent à une situation de base, où des valeurs de σ_{max} et G_c standard pour des interfaces composites mènent à une longueur de *process zone* relativement faible devant les dimensions caractéristiques de la structure. Dans ce premier cas, l'amorçage est rapide, et la propagation essentiellement gouvernée par la mécanique linéaire élastique de la rupture. On observe en particulier un *snap-back* pour le joint en T, et pour le DCB une propagation stable à déplacement imposé, mais avec force décroissante.

Les courbes violettes sont obtenues en augmentant d'un facteur 3 la valeur de G_c , sans modifier la valeur de σ_{max} . La ténacité accrue permet d'augmenter la valeur d'effort à laquelle la réponse de l'interface devient visible sur la courbe globale, mais la longueur de *process zone* n'est pas suffisamment modifiée pour faire évoluer le type de réponse en propagation, qui reste qualitativement la même.

Les courbes rouges, finalement, sont obtenues avec la même valeur de G_c que les courbes violettes, mais en diminuant de manière significative la valeur de σ_{max} . On constate ainsi une modification importante de la réponse structurelle, associée à une longueur significativement accrue de la *process zone*.

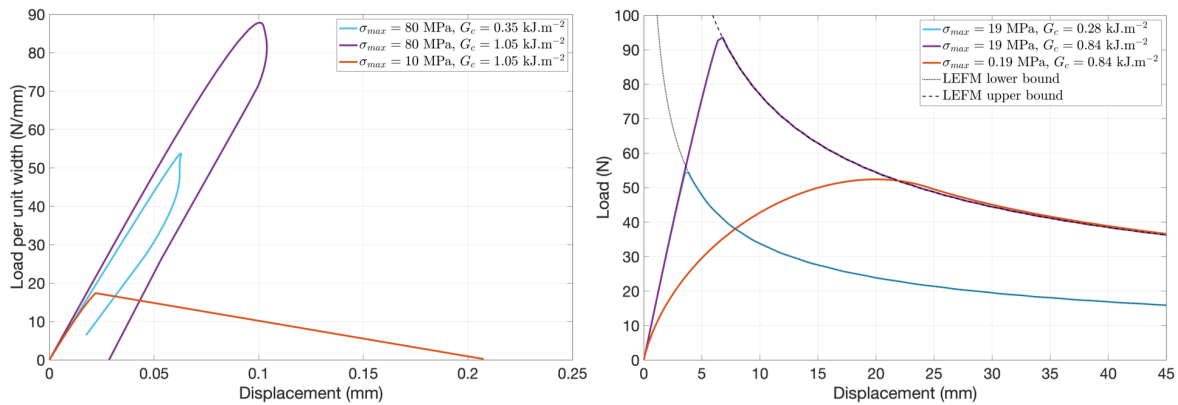


Fig. 6.: Réponse du joint en T (gauche) [10] et du DCB (droite) [11] pour différents paramètres d'interface

zone. En particulier, la réponse globale est plus stable (absence de *snap-back* pour le joint en T, force croissante ou constante sur une plus grande plage de déplacements pour la courbe DCB). Malheureusement, le prix à payer est l'amorçage très précoce de la fissuration, qui a un effet important sur la rigidité globale dès les début de l'essai.

En conclusion, les besoins vis à vis de ces propriétés sont contradictoires :

- un amorçage tardif requière une valeur élevée de σ_{max} , ce qui amène en général à une longueur cohésive l_c faible, et à une propagation de la fissure généralement rapide, gouvernée par la mécanique linéaire élastique de la rupture (et donc par G_c) ;
- une propagation progressive et stable requière une grande longueur cohésive l_c : en général, une augmentation de G_c ne suffit pas à atteindre les valeurs souhaitées, mais une diminution de σ_{max} a des conséquences néfastes sur l'amorçage.

4.1. Pistes de solution

Les exigences contradictoires vis-à-vis des propriétés d'interface, nécessaires pour permettre à la fois un amorçage tardif et une propagation progressive de la fissuration, peuvent être réconciliées à travers l'activation de différents mécanismes de dissipation à l'interface, qui présentent des longueurs cohésives différentes. En particulier :

- un premier mécanisme, ayant une valeur élevée de σ_{max} , et donc une longueur cohésive l_c faible, permet de conserver un amorçage tardif de la fissuration ;
- une fois la fissuration initiée, un deuxième mécanisme à grande longueur cohésive l_c doit s'activer et permettre de dissiper un maximum d'énergie pour des niveaux d'effort relativement faibles.

Une solution retenue dans la littérature pour obtenir ce type de réponse d'interface est d'encourager la génération de ligaments qui vont ponter la fissure, en transmettant des efforts relativement faibles sur des grandes longueurs. Cela peut arriver naturellement en cas de délaminage entre couches composites à fibres longues, ou être généré artificiellement, soit à travers l'ajout d'éléments à l'interface comme des filets [2, 3], soit par fissures sacrificielles ou texturation dans l'interface [4, 5].

Le comportement à deux mécanismes peut être schématisé par une CZM obtenue par superposition de deux lois triangulaires, comme en Figure 7. L'effet de ce type de CZM sur la réponse globale des deux configurations structurelles considérées dans ce travail est illustré en Figure 8 (courbe noire), et comparée aux réponses associées à un seul mécanisme, déjà présentées Figure 6. En particulier, on peut remarquer que le premier mécanisme, dont les paramètres d'interface correspondent à ceux de la courbe bleue, contrôle la réponse initiale de la structure dans les deux cas. Le deuxième mécanisme, qui dissipe une énergie deux fois plus importante que le premier mais avec des niveaux d'effort beaucoup plus faibles, ne joue un rôle stabilisant que dans la configuration DCB : en effet, l'énergie

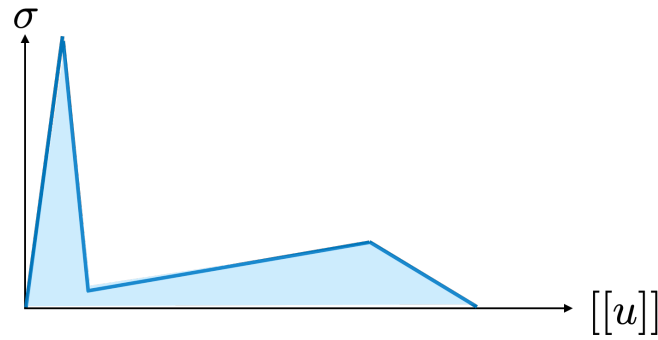


Fig. 7.: Schéma d'une CZM à deux mécanismes

libérée lors de la propagation dans la configuration du joint en T est trop importante pour être dissipée efficacement, même avec l'ajout d'un deuxième mécanisme dissipatif. La pertinence d'une solution visant à stabiliser la propagation d'une fissure doit donc nécessairement être évaluée par une simulation prenant en compte à la fois les propriétés de l'interface et la configuration structurelle visée, ce qui n'est pas systématiquement considéré en littérature.

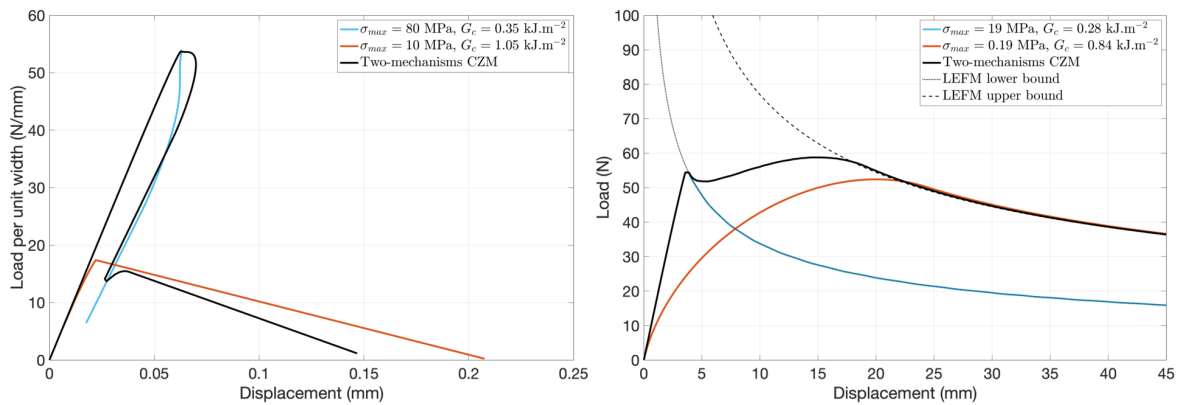


Fig. 8.: Réponse du joint en T (gauche) et du DCB (droite) [11] pour une loi cohésive à deux mécanismes

5. Le rôle de la dynamique

Si l'énergie libérée par la propagation de la fissure ne peut pas être complètement dissipée par les mécanismes à l'interface, la réponse globale de la structure devient instable. En pratique, l'énergie en excès correspond à la condition initiale d'un problème dynamique, et se transforme en énergie cinétique au cours des instants suivants la propagation.

L'activation d'une réponse dynamique en cas de propagation instable résulte en général en une amplification de la réponse de la structure par rapport aux conditions quasi-statiques. Cela peut, à son tour, engendrer une propagation plus rapide de la fissure. Il est donc important de comprendre le niveau d'amplification engendré par la réponse dynamique associée à la propagation, ainsi que les leviers permettant éventuellement de le limiter.

Des résultats préliminaires sur des systèmes discrets constitués de masses reliées par des ressorts cohésifs, inspirés de la problématique des ruptures des câbles dans les ponts [14], montrent que la réponse dynamique maximale en déplacement est toujours amplifiée d'au moins un facteur 2 par rapport à la réponse quasi-statique. De plus, la répartition des masses joue un rôle relativement peu important sur ce facteur d'amplification. Il ne semble donc pas aisé de contrôler le niveau de réponse dynamique en cas de propagation instable par une distribution astucieuse de la masse dans la structure. Ce dernier aspect est actuellement en cours d'investigation.

6. Conclusions et perspectives

La réponse globale d'une structure qui présente une zone de faiblesse où une fissure peut initier et propager dépend des propriétés locales de l'interface, mais aussi de la configuration structurale. Une réponse idéale devrait comporter un amorçage tardif de la fissuration, ainsi qu'une propagation progressive et stable d'une fissure existante. Dans ce travail, le rôle des différents aspects du problème mécanique est étudié grâce à des simulations numériques incluant des interfaces cohésives et une stratégie de pilotage en dissipation. L'importance au premier ordre de la configuration structurale, et donc de la conception de la liaison, est mise en avant. Dans les cas où la configuration structurale permet une dissipation progressive de l'énergie libérée, la stabilité de la propagation peut être améliorée par l'activation, à l'échelle de l'interface, de différents mécanismes de dissipation ayant des longueurs cohésives très différentes. Si la propagation est instable, en revanche, une réponse dynamique est activée à l'échelle de la structure. Des études sont en cours pour évaluer le rôle de la distribution de masse dans la détermination, et éventuellement le contrôle, de l'amplification de la réponse associée à la dynamique.

Remerciements

L'auteure remercie Emmanuel Baranger pour l'implantation de la stratégie de pilotage en dissipation sous Abaqus.

Références

- [1] A. J. Kinloch, A. C. Taylor « The toughening of cyanate-ester polymers », *Journal of Materials Science* Vol. 37, pp. 433–460, 2002.
- [2] K. Maloney, N. A. Fleck « Toughening strategies in adhesive joints », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 158, pp. 66–75, 2019.
- [3] A. Yudhanto, M. Almulhim, F. Kamal, R. Tao, L. Fatta, M. Alfano, G. Lubineau « Enhancement of fracture toughness in secondary bonded CFRP using hybrid thermoplastic/thermoset bondline architecture », *Composites Science and Technology* Vol. 199, pp. 108346, 2020.
- [4] R. Tao, X. Li, A. Yudhanto, M. Alfano, G. Lubineau « Laser-based interfacial patterning enables toughening of CFRP/epoxy joints through bridging of adhesive ligaments », *Composites : Part A* Vol. 139, pp. 106094, 2020.
- [5] A. Wagih, R. Tao, G. Lubineau « Bio-inspired adhesive joint with improved interlaminar fracture toughness », *Composites : Part A* Vol. 149, pp. 106530, 2021.
- [6] D. S. Dugdale « Yielding of steel sheets containing slits », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 8, pp. 100–104, 1960.
- [7] G. I. Barenblatt « The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture », *Advances in Applied Mechanics* Vol. 7, pp. 55–129, 1962.
- [8] Q. Yang, B. Cox « Cohesive models for damage evolution in laminated composites », *International Journal of Fracture* Vol. 133, pp. 107–137, 2005.
- [9] « ABAQUS/Standard Documentation » 2021.
- [10] X. Song « Characterization of overmolded thermoplastic composite joints and sizing methods for hybrid structures », Tech. Rep., Rapport de la première année de thèse, 2023.
- [11] F. Daghia, V. Fouquet, L. Mabileau « Improving the crack propagation response of layered and bonded structures through dissipation mechanisms at different length scales », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 254–255, pp. 111910, 2022.
- [12] M. A. Gutiérrez « Energy release control for numerical simulations of failure in quasi-brittle solids », *Communications in Numerical Methods in Engineering* Vol. 20, pp. 19–29, 2004.
- [13] G. Bao, Z. Suo « Remarks on crack-bridging concepts », *Applied Mechanics Reviews* Vol. 45 n° 8, pp. 355–366, 1992.
- [14] A. M. Ruiz-Teran, A. C. Aparicio « Dynamic amplification factors in cable-stayed structures », *Journal of Sound and Vibration* Vol. 300, pp. 197–216, 2007.