HAL
open science

Identification des modèles de zones cohésives en mode I pour des assemblages composites collés : état de l'art et analyse de sensibilité

Agathe Jaillon, Julien Jumel, Frederic Lachaud, Eric Paroissien

To cite this version:

Agathe Jaillon, Julien Jumel, Frederic Lachaud, Eric Paroissien. Identification des modèles de zones cohésives en mode I pour des assemblages composites collés : état de l'art et analyse de sensibilité. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02420787

HAL Id: hal-02420787

https://hal.science/hal-02420787v1

Submitted on 20 Dec 2019

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.

Identification des modèles de zones cohésives en mode I pour des assemblages composites collés : état de l'art et analyse de sensibilité

Cohesive zone model identification in mode I for bonded composites: identification methods' review and sensitivity analysis

Agathe Jaillon[1], Julien Jumel[2], Frédéric Lachaud[1], Éric Paroissien[1]

1 : Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse,
CNRS-INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, UMR 5312
3 Rue Caroline Aigle, F-31400 Toulouse
agathe.jaillon@isae.fr, frederic.lachaud@isae.fr, eric.paroissien@isae.fr

2 : I2M, Université de. Bordeaux, Arts et Métiers Paris Tech
, CNRS, I2M, UMR 5295
F-33400 Talence
julien.jumel@u-bordeaux.fr

Résumé

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer les modèles de zone cohésives en mode I. Une de ces méthodes consiste à réaliser une optimisation inverse sur les données d'essais mesurées en présupposant une forme de loi de traction-séparation. Classiquement, elle est choisie de forme bilinéaire. Cependant, en raison du développement des techniques de mesure avec notamment la corrélation d'image numérique ou le placement de jauges de mesures résistives, différents types de réponses mécaniques peuvent être obtenus. Il apparait alors possible que l'estimation des paramètres dépende de la réponse mécanique choisie. Une revue des différentes méthodes de mesures utilisées lors d'essais DCB en mode I a donc été réalisée. Cette étude a permis de mettre en évidence que les plus utilisées sont la courbe force-déplacement, l'intégrale J, les jauges (backface strain) et l'analyse de la flèche et rotation des substrats. Un modèle analytique a ensuite été mis en place afin de simuler leurs sensibilités aux paramètres du modèle de zone cohésive. Cette étude permet de mettre en évidence l'influence des paramètres de la loi de traction-séparation. Ces résultats sont ensuite nuancés par une analyse des contraintes expérimentales et théoriques de ces méthodes.

Abstract

Adhesive bonding is most of the time modelled using cohesive zone models, which are defined by traction-separation law shapes. However, the fact that TS law shape is empirically chosen rather than being measured can lead to erroneous behavior prediction when using inverse minimization. Moreover, it can be assumed that the mechanical response chosen to identify the TS law parameters might have an influence. A review of the existing measuring methods shows that most of the time, TS parameters are chosen from load-displacement curves, which is the most straightforward mechanical response to obtain. However, the development of digital image correlation (DIC) has enabled the access to more data, such as adherends' deflection and rotation along the overlap and at loading point. The latter can be directly used to obtain the integral J, which once differentiated can directly give the TS law. Adherends' deformation can also be measured using resistive strain gauges. Therefore, the different identification methods need to be sorted according to their sensitivity to the parameters. To do so, a numerical test campaign has been carried out, using an analytical model in order to evaluate the mechanical responses' sensibility to the chosen law shape parameters.

Mots Clés : DCB, Modèle de zone cohésive, sensibilité, tude comparative, Corrélation d'image numérique.
Keywords : DCB, Cohesive Zone Model, Sensibility, Comparative Study, Digital Image Correlation.

1. Introduction

Dans un contexte de transition écologique, le gain de masse est devenu une problématique prépondérante dans le secteur du transport, entrainant une augmentation de l'utilisation de matériaux

composites dont le rapport poids/performance est très intéressant. L'utilisation de ces matériaux permet d'envisager de nouvelles techniques d'assemblage afin de limiter l'utilisation de rivets et donc l'endommagement du matériau lors du perçage. Ainsi, le collage apparait comme une bonne alternative au boulonnage et au rivetage. Afin de garantir la tenue mécanique des assemblages, il est nécessaire de pouvoir modéliser le comportement de la couche adhésive. Pour ce faire, les modèles de zones cohésives (MZC) sont largement utilisés dans la littérature pour des analyses statiques comme pour des modèles plus avancés (fatigue, fluage, vieillissement) [1] [2]. En effet, le comportement du joint peut être représenté par une loi de traction-séparation (TS) correspondant aux contraintes dans l'adhésif en fonction du saut de déplacement. La forme de ces lois TS est généralement déterminée à priori en fonction du comportement attendu de l'adhésif. On retrouve notamment dans la littérature des lois de forme triangulaire pour des adhésifs fragiles et trapézoïdales pour des adhésifs ductiles. Les paramètres de la loi sont déterminés par des méthodes d'identification inverses sur des données tenues lors d'un essai DCB. Cependant, comme la forme de la loi est supposée et non mesurée, la validité des paramètres déterminés peut donc être sujette à discussion. Il a notamment été montré que la forme de la loi peut avoir une influence sur la réponse mécanique, visible notamment pour des adhésifs ayant un comportement ductile [3].

De même l'identification inverse des paramètres de la loi peut être réalisée sur différentes réponses mécaniques. Le plus classiquement la courbe de force-déplacement est utilisée en raison de sa simplicité d'obtention. Cependant, le développement des techniques de corrélation d'images a permis l'obtention d'informations supplémentaires sur le comportement de l'assemblage. Il est également possible de déterminer l'intégrale J en fonction de la rotation des substrats au point de chargement, ce qui peut permettre l'accès direct à la loi TS par dérivation en fonction de l'ouverture en pointe de fissure. Enfin, une réponse mécanique peut également être obtenue en enregistrant l'évolution de la déformation de peau des substrats au moyen de jauge d'extensométrie.

L'objectif est donc de faire un état de l'art des techniques permettant l'identification des paramètres de la loi TS pour des sollicitations en mode I sous chargement monotone. Dans un second temps une étude numérique est réalisée afin de déterminer la sensibilité des méthodes d'identification aux paramètres d'une loi de traction-séparation bilinéaire. Enfin, une analyse comparative des modèles est effectuée en termes de sensibilité, du domaine de validité de leur cadre théorique et de leur faisabilité et sensibilité expérimentale.

2. Revue des méthodes de mesures d'un essai DCB

L'étude du comportement d'assemblages collés en mode I est réalisée lors d'essai de pelage. Le plus classiquement utilisé dans la littérature est l'essai Double Cantilever Beam (DCB). Il a notamment été développé afin de pouvoir déterminer le taux de restitution d'énergie critique permettant la propagation de la fissure. Cet essai est également utilisé pour identifier ou mesurer directement les modèles de zones cohésives (MZC). Ces derniers ont été développés pour simuler le comportement des joints et des interfaces. Ils sont définis par une loi de traction-séparation (TS) qui correspond à la contrainte dans la couche adhésive en fonction du saut de déplacement en pointe de fissure. Ils donnent accès au comportement élastique de l'interface mais permettent également l'étude des phénomènes irréversibles tels que l'endommagement et la plasticité. L'étude de la non linéarité passe par l'utilisation de formes de loi TS variés. L'identification de ces MZC est donc primordiale pour l'amélioration des prévisions du comportement à rupture des assemblages.

Cependant, les prédictions de l'initiation ainsi que de la propagation de la fissure manque encore de précision car les lois de TS sont choisies empiriquement plutôt que mesurées directement lors de l'essai. En effet, les adhésifs fragiles sont généralement représentés par une loi bilinéaire, les adhésifs ductiles par une loi trapézoïdale. Il existe de nombreuses autres formes de lois telles que lois exponentielles, polynomiales ou même plus complexes. Classiquement, la forme de la loi est choisie

a priori et les paramètres sont identifiés par méthodes inverses à partir de la courbe de force-déplacement (F(Δ)) [4]. Il a pourtant été mis en évidence que la forme de la loi TS choisie a un impact sur la réponse mécanique prédite surtout lorsque l'adhésif a un comportement ductile [3] [5] [6]. C'est pourquoi de nombreux travaux s'intéressent au développement de nouvelles techniques de mesures expérimentales pour une caractérisation précises du comportement de l'adhésif. De nouvelles éprouvettes et systèmes de chargement ont été développés par exemple par Sørensen et al. Le système permet l'application d'un moment pur aux substrats et permet par la suite de déterminer directement la loi TS par une dérivation de l'intégrale J [7]. Une technique similaire a été développée par Anderson et al. qui ont en plus décidé de mesurer le déplacement en pointe de fissure par une technique interférométrique [8]. Cependant, le développement de la corrélation d'images numériques au cours de ces dernières années a permis de simplifier de tels montages en donnant accès aux déplacements, rotations et déformations beaucoup plus facilement. Cela a notamment permis le développement de méthodes inverses hybrides qui utilisent la corrélation d'images combinée à un calcul éléments finis [9] [10]. Des approches similaires ont également permis de mesurer directement la loi TS à partir de la dérivation des champs de déplacement en pointe de fissure [11]. Cependant, l'inconvénient majeur de ce type de méthodes est la nécessité d'effectuer un lourd traitement de données pour limiter l'apparition de bruit. Il existe également d'autres techniques d'analyse qui consistent à mesurer la déformation des peaux supérieures des substrats à l'aide de jauges optiques [12] ou résistives [13]. La déformation du substrat est en effet dépendante de l'état de l'adhésif se trouvant directement en dessous.

Les techniques de mesure les plus utilisées pour identifier le MZC sont la courbe de forces déplacement en raison de sa grande simplicité de mise en œuvre. La méthode énergétique utilisant l'intégrale J est également répandue dans la littérature. Les techniques d'analyse par la mesure des signaux de jauges sont moins récentes mais toujours utilisés. Enfin, l'amélioration des moyens de corrélations d'images numériques donne accès à un grand nombre de données supplémentaires tels que l'évolution de la flèche et de la rotation des substrats au cours de l'essai. Afin d'étudier la sensibilité de ces 5 méthodes au paramètres de la loi TS, un modèle analytique a été développé afin de pouvoir comparer facilement les différentes réponses mécaniques en fonction des paramètres choisis. Ce modèle analytique est basé sur la résolution de l'équilibre local des poutres, ce qui permet pour une loi TS bilinéaires l'obtention de 2 équations différentielles d'ordre 2. Celles-ci donnent accès aux champs mécaniques de l'essai (effort tranchant, moment, contraintes, déplacement) pour toutes les phases de comportement de l'adhésif, c'est-à-dire à la partie élastique, la partie adoucissante et la propagation. Comme l'illustre la Figure 1, l'éprouvette DCB choisie est définie par une longueur initiale de fissure de a=50mm, une longueur de recouvrement L=135mm, une largeur w=15mm. Les substrats et la couche adhésive ont une épaisseur respective de t=10mm et t_a=247µm. Les substrats en aluminium (E_s=70 GPa) sont modélisés par un comportement de Timoshenko.

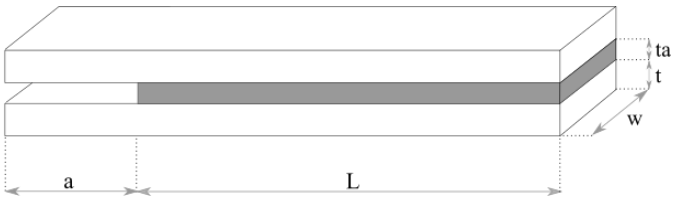


Figure 1 : Longueurs caractéristiques de l'éprouvette DCB

Pour illustrer l'influence des paramètres des MZC, 3 lois bilinéaires sont implémentées. Elles sont définies par le module effectif initial de l'adhésif E_a^*, la contrainte maximale dans l'adhésif σ_{max} et le taux de restitution d'énergie critique G_c. Les valeurs choisies sont résumés dans le Tableau 1 et les courbes associées sont données en Figure 2 : Lois de traction-séparations.

Référence	E_a^* (MPa)	σ_{max} (MPa)	G_c (N/mm)
TS 1	146	14	1.4178
TS 2	20	11	2
TS 3	300	20	1

Tableau 1 : Paramètres des lois de tractions séparations

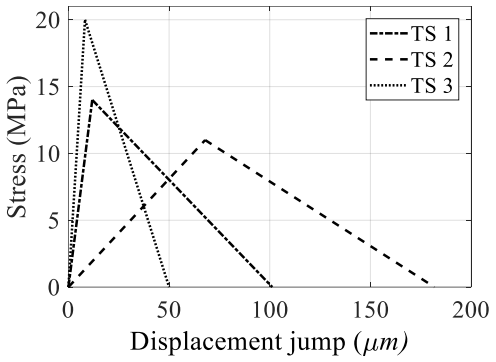


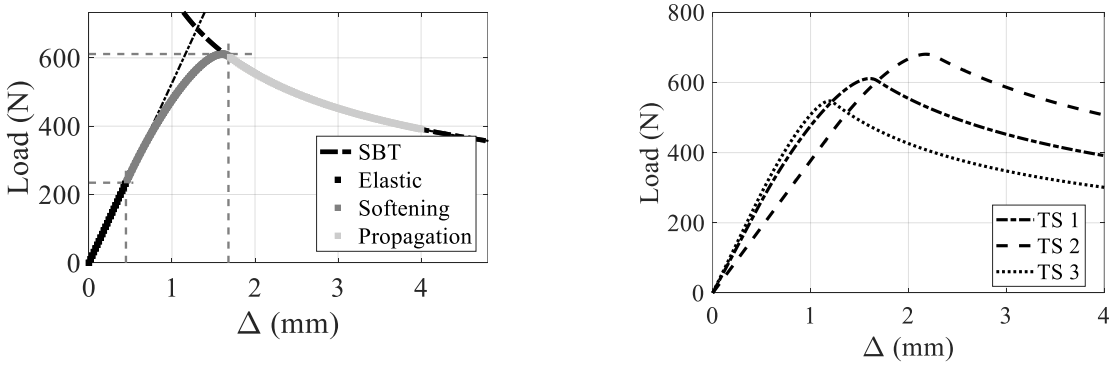
Figure 2 : Lois de traction-séparations

2.1. Force-déplacement

La réponse mécanique la plus simple et la plus directe à obtenir est la courbe de force – déplacement. En effet, il est possible d'utiliser directement les données enregistrées par la machine. Il est tout de même conseillé d'utiliser un extensomètre ou de la corrélation d'image afin de connaitre le vrai déplacement au point de chargement. Comme l'illustre la Figure 3(a) la courbe F(Δ) a un comportement différent en fonction de l'état de l'adhésif. La première partie est linéaire et correspond au comportement linéaire de l'adhésif. La seconde est non linéaire et correspond à la phase adoucissante. Enfin la dernière partie, qui est généralement la plus importante en proportion correspond à la propagation de la fissure. A partir du changement de signe de la pente il est possible de déterminer le taux de restitution d'énergie critique, G_c.et peut être obtenue analytiquement en utilisant la méthode SBT (Simple Beam Theory) dont l'effort en fonction de l'ouverture est donné par l'équation (Eq. 1. Il dépend du module d'Young et du moment quadratique des substrats, respectivement E_s et I_n.

$$P = \left(\frac{4E_s I_n}{9}\right)^{\frac{1}{4}} (wG_c)^{\frac{3}{4}} (\Delta)^{-\frac{1}{2}} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

La comparaison des courbes F(Δ) pour des lois TS différentes sur la Figure 3(b) met en évidence une forte influence de G_c.sur la propagation. Ce qui est normal puisque l'essai a été créé pour cela. Cependant, le module effectif de l'adhésif et la contrainte maximale varie dans de bien moins grandes proportions pouvant indiquer une faible sensibilité de la réponse mécanique.



(a) (b)

Figure 3 : Courbes force-déplacement : (a) mise en évidence des différentes phases de l'essai ; (b) influence de la loi TS utilisée

2.2. Intégrale J

Gunderson et al. ont proposé de déterminer l'intégrale J directement à partir des valeurs de rotation au point de chargement et de l'effort [14]. Ces travaux viennent compléter ceux de Anderson et al. [8] qui ont proposés une solution de calcul de l'intégrale J pour des substrats ayant un comportement de type Euler-Bernoulli. Cette méthode peut également être étendue à un comportement de poutre de Timoshenko. L'intégrale J peut être exprimée par l'*(Eq. 2)* où φ correspond à la rotation au point de chargement, $\kappa = \frac{5}{6}$ et S est la section des substrats.

$$J = \frac{2}{w}\left[P\varphi + \frac{P^2}{2\kappa GS}\right] \qquad \text{(Eq. 2)}$$

La détermination de l'intégrale J par cette méthode permet une mise en place expérimentale simple car elle ne nécessite que l'ajout d'inclinomètres sur les substrats. Cependant, en raison de sa définition théorique son utilisation est limitée à des adhésifs dont le comportement ne dépend pas du temps. Pour ne pas rajouter d'incertitude au calcul il est également recommandé de ne pas avoir de plastification dans les substrats.

L'évolution typique de l'intégrale J en fonction de l'ouverture au point de chargement est alors données par la Figure 4(a). Les comportements élastique et adoucissant de l'adhésif correspondent respectivement à des évolutions paraboliques de courbures inverses. La phase de propagation est quant à elle caractérisée par l'évolution constante de J qui est alors égal à G_c. C'est pourquoi, il apparait sur la Figure 4(b) une grande variation entre les différentes courbes pour la partie correspondant à la propagation de la fissure. Encore une fois, E_a^* et σ_{max} semble avoir une influence beaucoup plus limitée.

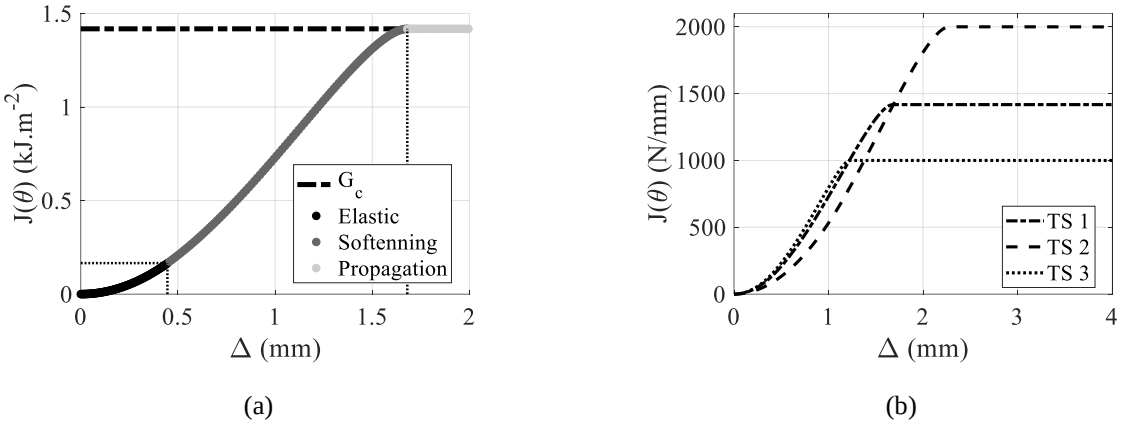


Figure 4 Evolution de l'intégrale J en fonction de l'ouverture en pointe de fissure : (a) mise en évidence des différentes phases de l'essai ; (b) influence de la loi TS utilisée

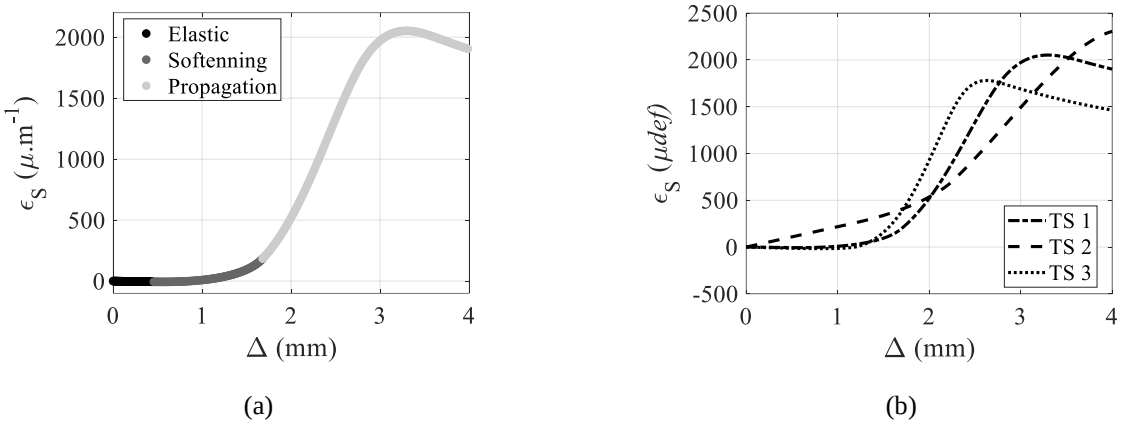
2.3. Jauges

L'analyse par Backface Strain (BFS) consiste à coller des jauges sur la peau supérieure des substrats. La mesure de la déformation dépend alors de l'état de la couche adhésive se trouvant directement en dessous. Les jauges doivent être collées au centre de la peau dans le sens de la propagation de la fissure et il a été montré par Shenoy et al. que plus elles sont petites, meilleure sera la précision du résultat [15]. Les jauges sont classiquement utilisées afin d'avoir une indication sur la position de la pointe de fissure. En effet celle-ci est localisée au niveau du maximum de la déformation. Cette dernière est obtenue analytiquement avec l'équation *(Eq. 3)* où M correspond au moment de flexion des substrats au niveau de la jauge.

$$\varepsilon_s = \frac{M}{E_s I_n}\frac{t}{2} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

L'utilisation des signaux de jauges pour identifier les MZC nécessite par contre une mise en œuvre expérimentale lourde et demandant beaucoup de rigueur. En effet, le bon positionnement et l'alignement des capteurs est primordial pour assurer la qualité des mesures.

Pour une jauge située à 35 mm de la pointe de fissure initiale, la déformation de la peau supérieure du substrat est illustrée par la Figure 5(a). Le signal de jauge permet de détecter quand le comportement de l'adhésif dépend de la loi TS avec d'abord le comportement élastique puis adoucissant. Une fois que le front de fissure a dépassé la jauge, le signal devient alors proportionnel à l'effort. Une variation de la loi TS entraine une modification de la longueur d'adhésif impactée par celle-ci et une propagation plus ou moins tardive comme l'illustre la Figure 5(b).



(a) (b)

Figure 5 : Evolution du signal d'une jauge en fonction de l'ouverture en pointe de fissure : (a) mise en évidence des différentes phases de l'essai ; (b) influence de la loi TS utilisée

2.4. Corrélation d'images numériques : flèche et rotation

La corrélation d'images numériques permet d'obtenir les champs de déplacement et de rotation tout le long de l'éprouvette pendant la totalité de l'essai. Expérimentalement les mesures sont réalisées à l'aide d'un mouchetis et de caméras. Numériquement, les champs de déplacement sont calculés directement pour toute l'éprouvette. Cependant, cette dernières est composées à plus de 50% de substrats libres, une grande partie des données calculées ne dépend donc pas du comportement de l'adhésif. La résolution le long de l'éprouvette est choisie comme proche de résultats expérimentaux qui dépendent de la longueur observée. Plus la zone est étendue moins la résolution est bonne. Il est donc choisi d'observer le recouvrement entre la pointe de fissure initiale X=-50 mm et X=-120 mm, ce qui permet d'observer la process zone dans son intégralité tout en conservant une résolution d'un point par millimètre.

Comme l'illustrent les Figure 6 (a) et (b), la CIN permet d'observer le développement de la partie adoucissante au cours de l'essai puis de l'avancement de la fissure une fois la propagation commencée. Pour plus de clarté, l'influence de la loi TS est illustrée pour Δ=1 mm sur les Figure 6 (c) et (d). Les courbes sont très similaires les unes des autres et apparaissent peu sensible aux variations des paramètres.

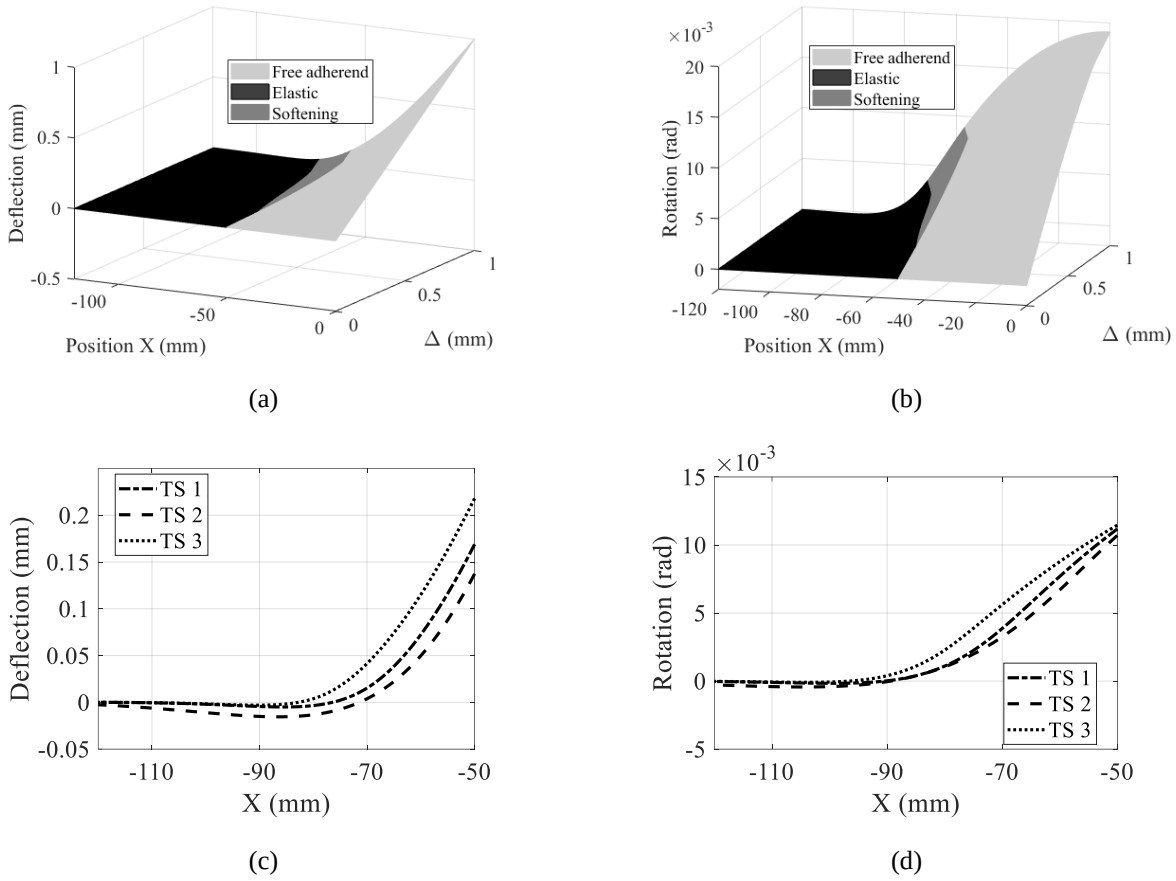


Figure 6 : Corrélation d'images numériques respectivement en déplacement et rotation : (a) et (b) mise en évidence des différentes phases de l'essai ; (c) et (d) influence de la loi TS utilisée

3. Analyse de sensibilité

3.1. Méthode

Une analyse de sensibilités sur les paramètres permet de déterminer plus précisément en quel point de la réponse mécanique, le ou les paramètres vont avoir un impact. S'ils ont une influence en même temps cela permet d'anticiper les couplages. Les sensibilités peuvent être obtenues à partir de fonction de sensibilités pour chaque paramètre distinctement. Ces fonctions de sensibilités, J_k, correspondent à la différentiation des données mécaniques mesurées par rapport à la variation du paramètre $a = [E_a\ , \sigma_{max}, G_c]$ [16]. Les $\hat{Y}$(ti), i={1,…,N} représentent les N données mécaniques calculées avec le modèle. Analytiquement, il est possible de calculer les fonctions de sensibilités en différentiant les réponses obtenues avec un jeu de paramètre variant de plus ou moins 5%.

$$J = [J_k(t_i)] = \frac{\partial \hat{Y}(a, t_i)}{\partial a_k} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

$$\mathrm{J}_k = \frac{\hat{Y}(1.05a_k, t_i) - \hat{Y}(0.95a_k, t_i)}{0.1a_k} \qquad k \in [1{:}\,n_p] \qquad \text{(Eq.5)}$$

3.2. Résultats

Les fonctions de sensibilités, notées F dans les Figure 7, peuvent être calculées pour chaque réponse mécanique présentées précédemment. Elles sont représentées normalisées par rapport à leur

maximum afin de pouvoir être comparées. Pour chaque réponse mécanique, elles sont représentées en fonction de l'ouverture au point de chargement et le domaine est divisée en trois phases (élastique, adoucissant et propagation). Les Figure 7 (a), (b) et (c) illustrent ces fonctions pour les méthodes de mesures autres que la corrélation d'images. Globalement, il apparait que les réponses mécaniques de F(Δ) et J(θ) sont très similaires. Pour ces réponses mécaniques le module effectif de l'adhésif a un impact fort lors de la partie élastique alors que σ_{max} et G_c n'ont aucune influence. Lorsque l'adhésif a un comportement adoucissant, l'influence de E_a tend à diminuer alors que σ_{max} augmente significativement. Juste avant le début de la propagation, l'influence de σ_{max} disparait pour ne laisser place qu'à G_c. Ce dernier semble peu corrélé avec les 2 autres paramètres puisqu'il n'apparait que lors de la propagation de la fissure. Par contre E_a et σ_{max} sont tous 2 présents dans la phase adoucissante, ce qui pourra poser des problèmes d'identifications en raison d'un couplage fort.

Les fonctions de sensibilités obtenues pour les signaux de jauges sont légèrement différentes en raison du décalage de l'apparition des phases de comportement de l'adhésif. Le 1er paramètre qui a une influence est comme précédemment le module, mais il garde une influence en parallèle de σ_{max} et G_c pendant la majorité de l'essai. G_c influence seul le comportement à partir de Δ=3.5 mm. L'analyse des signaux de jauges risque donc d'être difficile, le couplage entre tous les paramètres étant plus importants que pour les 2 autres méthodes.

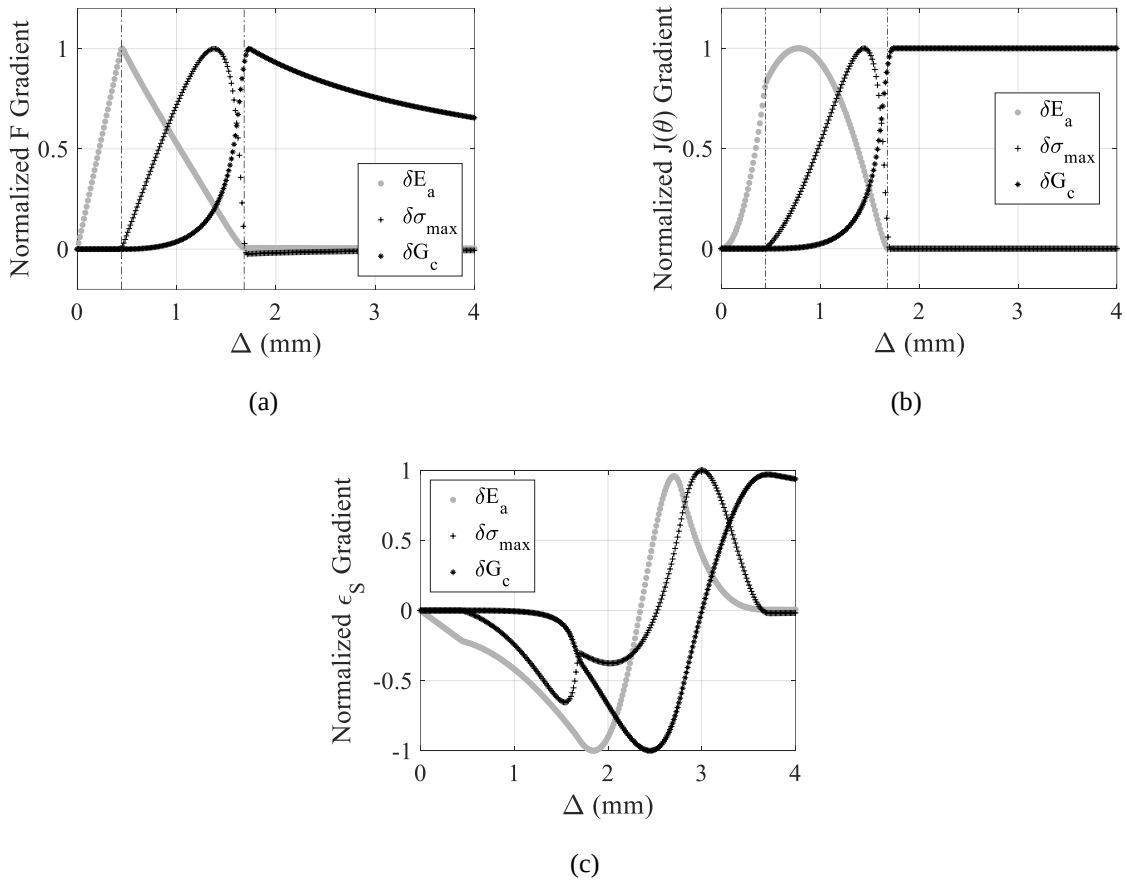


Figure 7 : Fonctions de sensibilités des paramètres : (a) Force-déplacement ; (b) Intégrale J ; (c) Jauge.

La CIN numérique permet d'avoir des fonctions de sensibilité le long du recouvrement pour chaque incrément d'effort comme l'illustre la Figure 8. Globalement, les fonctions de sensibilité en déplacement et en rotation ont des comportements très similaires par paramètre. Il apparait que le module a une influence forte tout le long de l'essai sur une majorité du recouvrement (Figure 8 (a) et

(b)). Par contre, comme cela est visible sur les Figure 8 (c) - (d) et (e) – (f), l'influence de σ_{max} et G_c n'apparait que proche de la pointe de fissure et proche de l'ouverture maximale, ce qui risque d'entrainer un fort couplage entre eux.

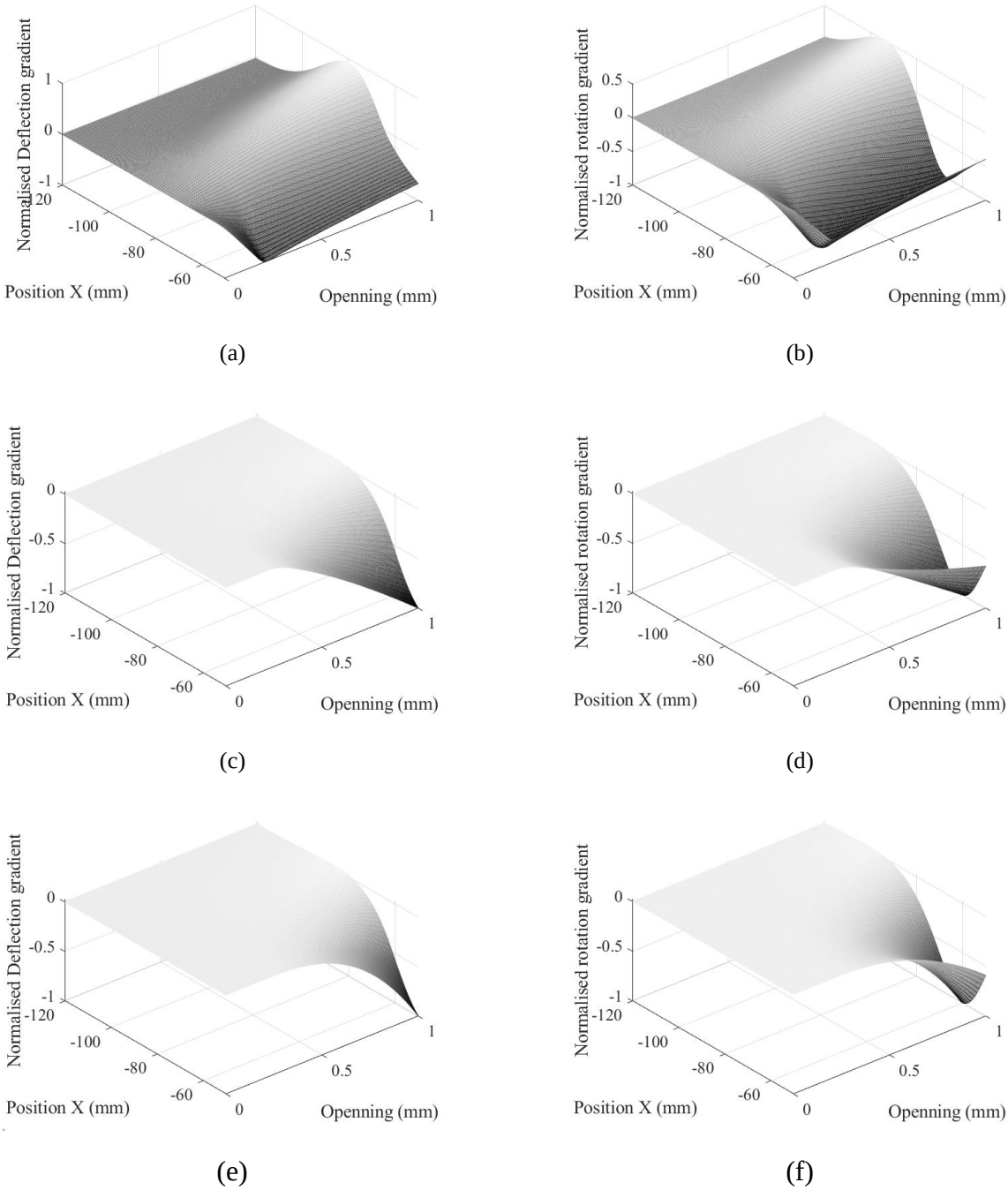


Figure 8 : Fonctions des sensibilités obtenue par CIN respectivement en déplacement et rotation : (a) et (b) Sensibilité au module ;(c) et (d) Sensibilité à la contrainte maximale ; (e) et (f) Sensibilité au taux de restitution d'énergie critique.

4. Conclusion

Dans ce travail, cinq méthodes d'analyses de l'essai DCB ont été choisies et utilisées pour analyser leurs sensibilités aux paramètres d'une loi de traction-séparation bilinéaire. Un modèle analytique a été mis en place et a permis de calculer les fonctions de sensibilités. Celles-ci apparaissent comme différentes d'une méthode à l'autre, avec des sensibilités plus prononcées pour certains paramètres et

surtout des couplages plus forts pour la méthode des jauges que pour les autres. Cette analyse de sensibilités met donc en évidence que les méthodes de mesures ne permettent pas toutes de déterminer les modèles de zones cohésives de la même façon et pose donc la question de la qualité de l'estimation des paramètres par optimisation inverse.

Remerciements

Ce travail inclus dans le projet collaboratif S3PAC (FUI 21) a été cofinancé par BPI France, la région Occitanie et la région Nouvelle-Aquitaine.

Références

[1] H. Khoramishad, A. D. Crocombe, K. B. Katnam et I. A. Ashcroft, «Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model,» *International Journal of fatigue,* vol. 32, pp. 1146-1158, 2010.

[2] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab et I. A. Ashcroft, «Modelling the environmental degradation of adhesively bonded aluminium and composite joints using a CZM approach,» *International Journal of Adhesion and Adhesives,* vol. 27, pp. 505-518, 2007.

[3] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto et F. M. da Silva and Lucas, «Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer,» *International Journal of Adhesion and Adhesives,* vol. 44, pp. 48-56, 2013.

[4] X. Han, Y. Jin, L. Da Silva, M. Costa et C. Wu, «On the effect of adhesive thickness on mode I fracture energy-an experimental and modelling study using a trapezoidal cohesive zone model,» *The Journal of Adhesion,* pp. 1-25, 2019.

[5] S. H. Song, G. H. Paulino et W. G. Buttlar, «Influence of the cohesive zone model shape parameter on asphalt concrete fracture behavior,» chez *AIP Conference Proceedings,* 2008.

[6] M. Alfano, F. Furgiuele, A. Leonardi, C. Maletta et G. H. Paulino, «Mode I fracture of adhesive joints using tailored cohesive zone models,» *International journal of fracture,* vol. 157, pp. 193-204, 2009.

[7] B. F. Sørensen, Cohesive laws for assessment of materials failure: Theory, experimental methods and application, Technical University of Denmark (DTU), 2010.

[8] T. Andersson et U. Stigh, «The stress--elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces,» *International Journal of Solids and Structures,* vol. 41, pp. 413-434, 2004.

[9] M. Alfano, G. Lubineau et G. H. Paulino, «Global sensitivity analysis in the identification of cohesive models using full-field kinematic data,» *International Journal of Solids and Structures,* vol. 55, pp. 66-78, 2015.

[10] B. Blaysat, J. P. M. Hoefnagels, G. Lubineau, M. Alfano et M. G. D. Geers, «Interface debonding characterization by image correlation integrated with double cantilever beam kinematics,» *International Journal of Solids and Structures,* vol. 55, pp. 79-91, 2015.

[11] G. Lélias, E. Paroissien, F. Lachaud et J. Morlier, «Experimental characterization of cohesive zone models for thin adhesive layers loaded in mode I, mode II, and mixed-mode I/II by the use of a direct method,» *International Journal of Solids and Structures,* vol. 158, pp. 90-115, 2019.

[12] D. Sans, J. Renart, J. Costa, N. Gascons et J. A. Mayugo, «Assessment of the influence of the crack monitoring method in interlaminar fatigue tests using fiber Bragg grating sensors,» *Composites Science and Technology,* vol. 84, pp. 44-50, 2013.

[13] J. Jumel, N. B. Salem, M. K. Budzik et M. E. R. Shanahan, «Measurement of interface cohesive stresses and strains evolutions with combined mixed mode crack propagation test and Backface Strain Monitoring measurements,» *International Journal of Solids and Structures,* vol. 52, pp. 33-44, 2015.

[14] J. D. Gunderson, J. F. Brueck et A. J. Paris, «Alternative test method for interlaminar fracture toughness of composites,» *International Journal of Fracture,* vol. 143, pp. 273-276, 2007.

[15] V. Shenoy, I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow, A. D. Crocombe et M. M. A. Wahab, «An investigation into the crack initiation and propagation behaviour of bonded single-lap joints using backface strain,» *International Journal of Adhesion and Adhesives,* vol. 29, pp. 361-371, 2009.

[16] S. Hartmann et R. R. Gilbert, «Identifiability of material parameters in solid mechanics,» *Archive of Applied Mechanics,* vol. 88, pp. 3-26, 2018.