



HAL
open science

Critère de rupture pour la prédiction du décollement - Application au cas d'un raidisseur

S. Miot, S.T. Pinho

► **To cite this version:**

S. Miot, S.T. Pinho. Critère de rupture pour la prédiction du décollement - Application au cas d'un raidisseur. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.37. hal-00597909

HAL Id: hal-00597909

<https://hal.science/hal-00597909>

Submitted on 2 Jun 2011

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.

Critère de rupture pour la prédiction du décollement - Application au cas d'un raidisseur

Failure criterion for debonding – Application to skin stiffener run-out

S. Miot¹, S.T. Pinho¹

¹ : Department of Aeronautics
Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, United Kingdom
e-mail : s.miot@imperial.ac.uk

Résumé

Dans ce papier, un critère de rupture a été développé pour prédire le décollement de sous-composants d'une structure complexe à partir d'un modèle reposant sur une définition simplifiée de la géométrie des pièces et du comportement des matériaux. Le critère est basé sur une estimation du taux de restitution d'énergie via une approche VCCT modifiée. La méthode a été appliquée pour prédire le décollement de raidisseur d'aile d'avion. Comparées aux approches communément utilisées dans l'industrie, ce nouveau critère présente une faible dépendance au maillage et permet de repérer les zones les plus critiques de la structure.

Abstract

In this paper, a new failure criterion has been developed to predict the debonding of sub-components of a complex structure modelled with a simplified geometry of the parts and an elastic response of the material. The criterion is based on the evaluation of the energy release rate with a modified VCCT approach. The method has been applied to predict the debonding of stiffener run-out. Compared to common methods, this new criterion exhibits weak mesh dependency and allows identifying the critical areas of the structure.

Mots Clés : Mécanique de la Rupture, Critère de rupture, Décollement, Initiation de l'endommagement

Keywords : LEFM, Failure criterion, Debonding, Damage initiation

1. Introduction

Les modèles de structures complexes, tel qu'un modèle d'aile d'avion, sont difficilement exploitables pour prévoir la rupture de sous-composants de plus petite taille, comme un raidisseur. La complexité inhérente à ce type de structure limite l'utilisation d'éléments pourtant nécessaires comme un maillage fin, un comportement non linéaire du matériau, ou une modélisation de la propagation des endommagements. Les ressources en calcul ou la convergence des modèles pourraient alors être affectées. Des approches multi-échelles ont ainsi été développées afin d'identifier les zones critiques d'une structure complexe puis d'analyser plus finement le comportement mécanique de ces régions [1,2].

Dans ce papier, une approche originale a été développée pour identifier les zones potentiellement critiques d'une structure. Le développement et la validation ont été réalisés en utilisant comme cas test, un modèle d'aile d'avion. La structure globale est basée sur un modèle simplifié d'une aile d'avion contenant les éléments principaux, notamment les raidisseurs. Le mode de dégradation le plus pertinent est dans ce cas, le décollement des raidisseurs, particulièrement fragile à leur extrémité. L'approche développée ici est basée sur la méthode VCCT [3,4] et permet d'identifier les raidisseurs les plus critiques. L'initiation du décollement est prédite par le taux de restitution

d'énergie, évalué à partir des valeurs des forces et des déplacements appliqués aux nœuds en contact sans qu'aucun mécanisme d'endommagement n'ait besoin d'être modélisé.

Dans une première partie, le cas d'étude et ses contraintes sont présentés. Le critère de rupture, basé sur l'approche VCCT modifiée, est ensuite décrit puis appliqué au cas du raidisseur. Une étude de la dépendance au maillage est alors présentée. Discussion et conclusion clôturent ce papier.

2. Modélisation des éléments de l'aile : hypothèses et contraintes

2.1 Modèle du raidisseur

Le modèle de l'aile est conçu à une échelle globale. L'ensemble des éléments de la structure ne peut être représenté. Seuls les éléments présentant un intérêt pour l'étude sont modélisés mais le modèle reste grossier et de nombreux détails sont absents. Dans ces conditions, prédire la rupture d'un sous-composant est une tâche délicate car la précision de la prédiction est bien évidemment liée à la qualité du modèle. Un exemple de modélisation simplifiée d'une aile est présenté en Figure 1 et repose sur :

- une géométrie approximative des sous-composants, pas de représentation précise des rayons de courbure, pas de trou ou autre singularité
- un maillage très grossier y compris dans les zones à forte concentration de contrainte
- un comportement élastique linéaire, aucune modélisation des mécanismes d'endommagement ou des déformations anélastiques.

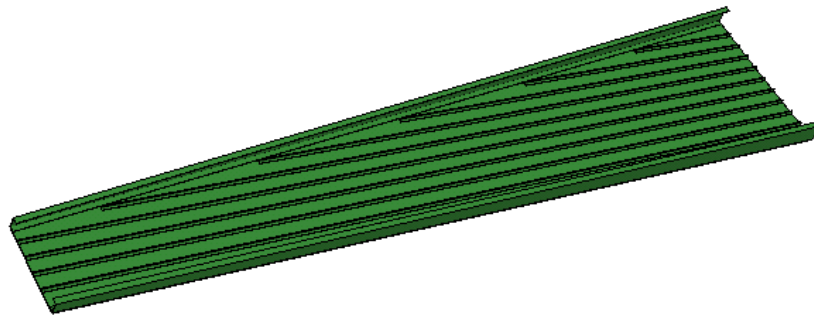


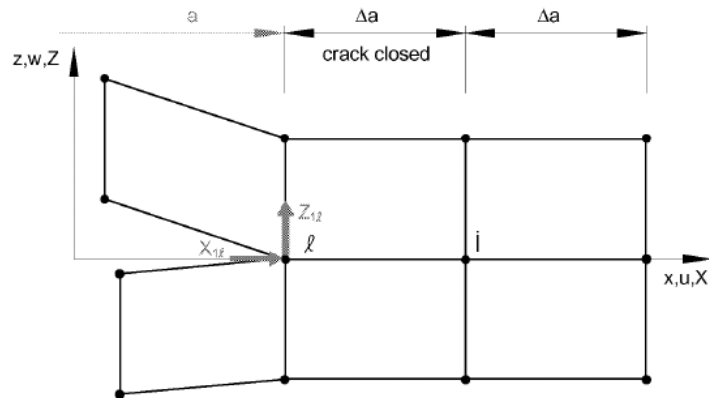
Fig. 1. Modèle simplifié d'une aile d'avion

La Mécanique de la Rupture est, dans de telles conditions, un outil particulièrement intéressant car elle repose sur une définition du comportement du matériau parfaitement élastique. Une approche couramment utilisée est la méthode nommée *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT) qui permet d'évaluer des taux de restitution d'énergie, qui, comparés aux valeurs critiques pour le matériau, sont de bon indicateurs pour prédire l'initiation d'une fissure.

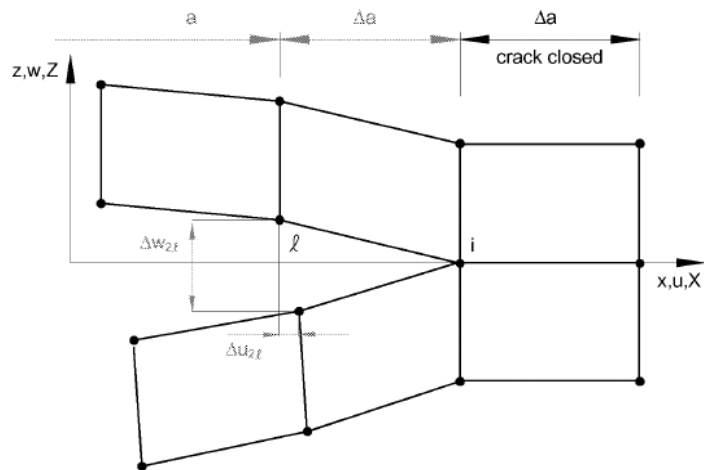
2.2 *Virtual Crack Closure Technique*

La méthode *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT) repose sur l'hypothèse que l'énergie libérée lors de l'ouverture d'une fissure de longueur Δa est équivalente à celle nécessaire pour fermer cette même fissure [3]. L'application de cette méthode requière ainsi deux modèles. Une illustration dans

un cas 2D est présentée en Figure 2. Le premier modèle permet d'évaluer les efforts maintenant la fissure fermée. Le second modèle, représentant la fissure ouverte permet d'estimer les déplacements relatifs des deux lèvres de la fissure.



Première étape : fissure fermée



Seconde étape : fissure ouverte

Fig. 2. Les deux étapes de la méthode VCCT (2D) [3]

Les taux de restitution d'énergie en mode I (G_I) et II (G_{II}) sont ainsi calculés :

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} Z_{1\ell} \Delta w_{2\ell} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} X_{1\ell} \Delta u_{2\ell} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec $Z_{1\ell}$ et $X_{1\ell}$, les forces de contacts appliquées au nœud ℓ , et $\Delta w_{2\ell}$ et $\Delta u_{2\ell}$, les déplacements des nœuds ℓ et ℓ' dus à l'ouverture de la fissure.

3. Développement de l'approche VCCT modifiée

L'objectif de l'étude présentée dans ce papier est la mise en place d'un critère permettant l'identification des zones critiques d'une structure complexe. Dans ces conditions, la méthode VCCT présente deux inconvénients majeurs : deux modèles sont nécessaires et une fissure initiale doit être modélisée. La Figure 3 illustre l'application de la méthode VCCT au cas du raidisseur. A l'échelle globale de la structure, l'utilisation de la méthode VCCT impliquerait une modélisation en deux étapes pour chacun des raidisseurs, une première étape sans fissure et une seconde étape avec une modélisation d'un décollement initial, ce qui n'est pas envisageable.

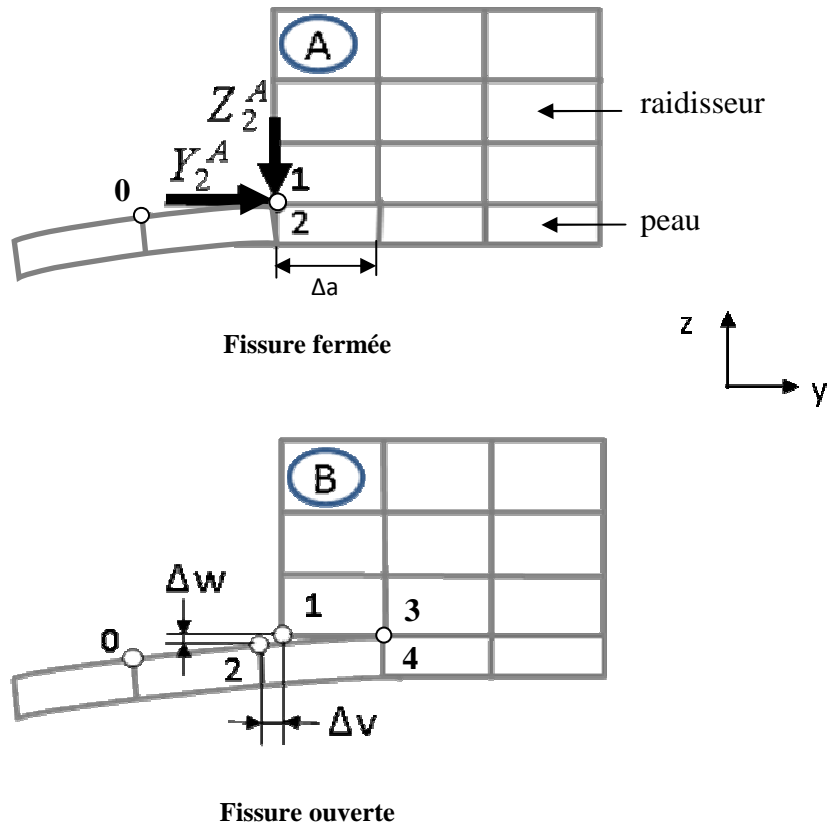


Fig. 3. Méthode VCCT appliquée au raidisseur

Une adaptation de la méthode VCCT a alors été étudiée pour prédire la rupture d'une structure par décollement d'un ou plusieurs sous-composants. Une nouvelle approche a été développée [5] et présente l'intérêt majeur de supprimer la modélisation de la fissure initiale. L'approche ne comporte ainsi qu'une seule étape et utilise uniquement le modèle à fissure fermée (Fig.3). Cette simplification repose sur trois hypothèses.

1. La propagation de la fissure d'une longueur Δa a un effet négligeable sur l'état du contact

Ceci signifie que le contact à l'état A entre les nœuds 1 et 2 (Fig.3) est équivalent à l'état B entre les nœuds 3 et 4. Ainsi, on peut écrire :

$$v_2^B = v_0^A \quad \text{et} \quad w_2^B = w_0^A \quad (\text{Eq. 3})$$

2. Le raidisseur est supposé extrêmement rigide

Cette hypothèse a été définie par rapport à la fonctionnalité propre du raidisseur. On en déduit donc que les déplacements des nœuds du raidisseur sont très faiblement influencés par l'ouverture de la fissure et on peut écrire :

$$v_1^B = v_1^A \quad \text{et} \quad w_1^B = w_1^A \quad (\text{Eq. 4})$$

3. La rigidité du contact est nettement supérieure à la rigidité du matériau

On définit ainsi les déplacements des nœuds de la peau par rapport aux nœuds du raidisseur. Cette hypothèse a été introduite pour simplifier l'implémentation du critère en post-traitement des résultats d'une analyse par la Méthode des Eléments Finis. Cependant, l'utilisation des données relatives au raidisseur peut être envisagée.

On peut ainsi écrire :

$$v_2^A - v_1^A \ll \Delta v \quad \text{et} \quad w_2^A - w_1^A \ll \Delta w \quad (\text{Eq. 5})$$

On en déduit :

$$v_1^A = v_2^A \quad \text{et} \quad w_1^A = w_2^A \quad (\text{Eq. 6})$$

Les taux de restitution d'énergie sont finalement estimés par :

$$G_I = -\frac{1}{2a} Z_2^A (w_0^A - w_2^A) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$G_I = -\frac{1}{2a} Y_2^A (v_0^A - v_2^A) \quad (\text{Eq. 8})$$

Auxquels s'ajoute, dans un cas 3D, le composant en mode III :

$$G_{III} = -\frac{1}{2a} X_2^A (u_0^A - u_2^A) \quad (\text{Eq. 9})$$

Le taux de restitution d'énergie global G_T est défini comme la somme des composants des trois modes :

$$G_T = G_I + G_{II} + G_{III}$$

4. Prédiction du décollement d'un raidisseur

4.1 Cas d'un chargement de flexion

Le nouveau critère défini pour identifier les éléments critiques d'une structure, c'est-à-dire les pièces présentant une forte probabilité de décollement, a été appliqué au cas du raidisseur. Afin de limiter la quantité de données à exploiter, le modèle a été réduit à l'analyse du sous-composant

(extrémité du raidisseur + peau). L'évaluation du taux de restitution d'énergie par l'approche VCCT modifiée a été comparée aux prédictions obtenues par :

- l'application de la méthode VCCT classique
- l'estimation à partir de la variation d'énergie interne du modèle due à l'ouverture de la fissure [6]

Le cas d'un chargement de flexion a été analysé, correspondant principalement à un mode d'ouverture de la fissure. Les résultats sont présentés en Figure 4.

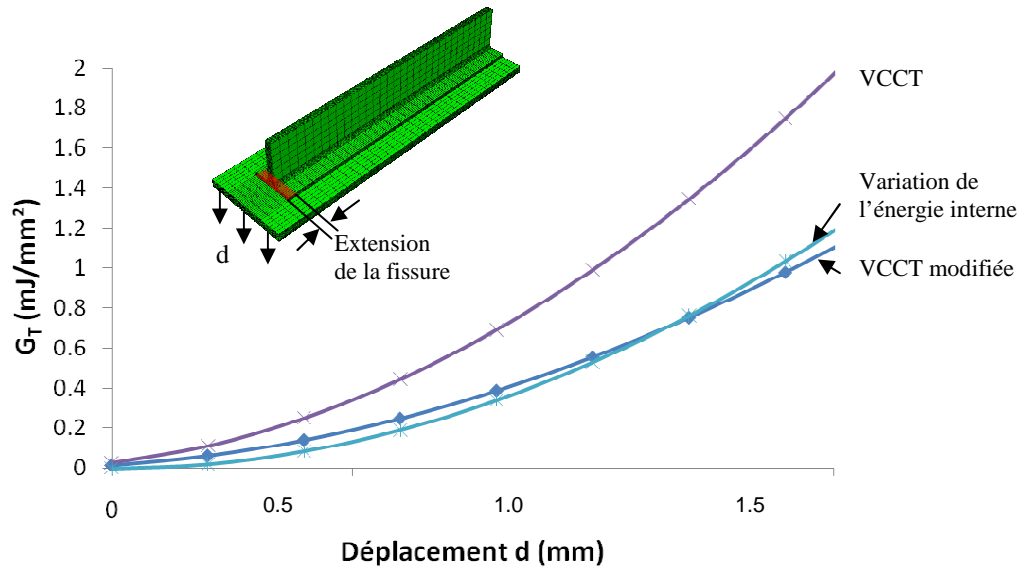


Fig. 4: Evaluation du taux de restitution d'énergie avec l'approche VCCT modifiée dans le cas d'un chargement de flexion – Comparaison avec la méthode VCCT classique et l'estimation par rapport à la variation d'énergie interne

4.2 Cas d'un chargement de traction

Une étude similaire a été réalisée sur le sous-composant raidisseur-peau soumis à un chargement de traction (Fig.5), correspondant à un mode mixte avec une forte composante du mode II.

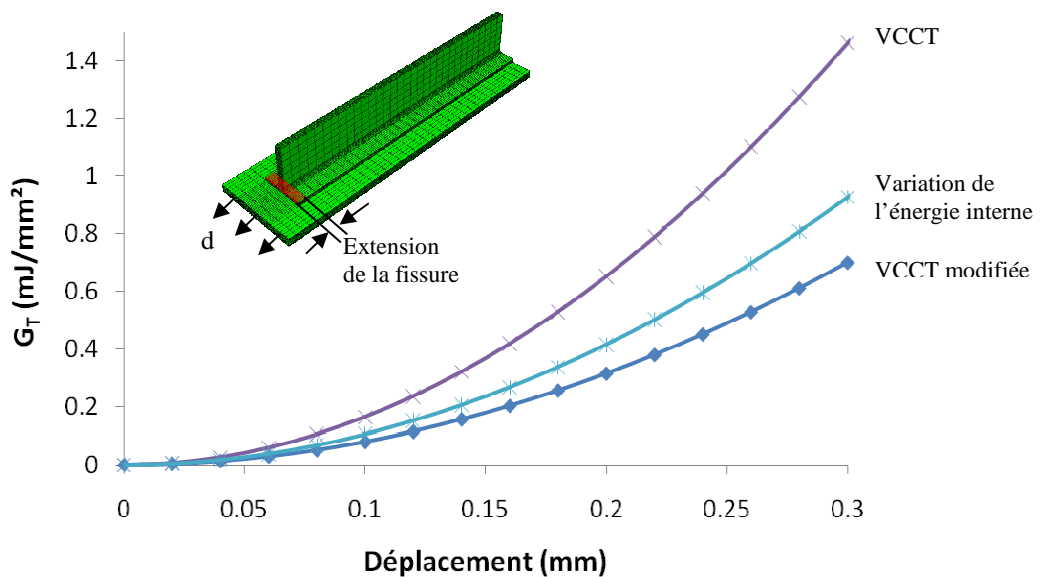


Fig. 5: Evaluation du taux de restitution d'énergie avec l'approche VCCT modifiée dans le cas d'un chargement de traction – Comparaison avec la méthode VCCT classique et l'estimation par rapport à la variation d'énergie interne

5. Etude de la dépendance au maillage

5.1 Comparaison par rapport à un critère en contrainte

Un critère en contrainte, reposant sur les valeurs des contraintes de contact, a été défini pour prédire l'initiation du décollement. La courbe traction/séparation tracée en Figure 6 illustre le comportement de l'adhésif. L'endommagement de l'interface apparaît lorsque la contrainte atteint la valeur maximale pour t_n (Point A).

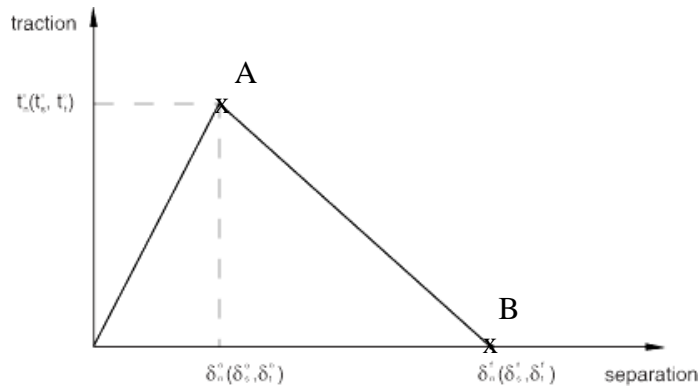


Fig. 6: Réponse typique d'une interface modélisée par contact cohésif

Un critère quadratique basé sur la valeur des contraintes de traction normale et de cisaillement a alors été retenu [7] et s'écrit :

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1$$

Avec t_n^0 , t_s^0 et t_t^0 , les contraintes maximales et t_n , t_s et t_t les contraintes appliquées dans les directions normale et de cisaillement.

5.2 Comparaison par rapport à un critère en endommagement

Un critère en endommagement permet une prédiction plus précise de l'initiation du décollement puisqu'il décrit le moment où l'adhésion est totalement rompue (point B en Fig. 6). Cependant, il nécessite de modéliser le comportement endommageable de l'adhésif et ne satisfait donc pas aux exigences précédemment définies. Il est présenté ici et appliqué au raidisseur afin de comparer la qualité des prédictions et la dépendance au maillage par rapport au critère basé sur l'approche VCCT modifiée.

5.3 Résultats

Les différents critères ont été appliqués au cas du raidisseur dans le but de prédire l'initiation du décollement. Deux modes de chargement ont été étudiés : un cas de flexion (cf. Fig.7) et un cas de traction (cf. Fig.8). Dans les deux cas, le chargement est défini par un déplacement appliqué sur la peau. Les résultats ont été normés afin de mettre en évidence la dépendance au maillage. Pour

chaque approche, la valeur du déplacement appliqué lorsqu'apparaît l'initiation du décollement est divisée par la valeur obtenue pour le maillage le plus fin.

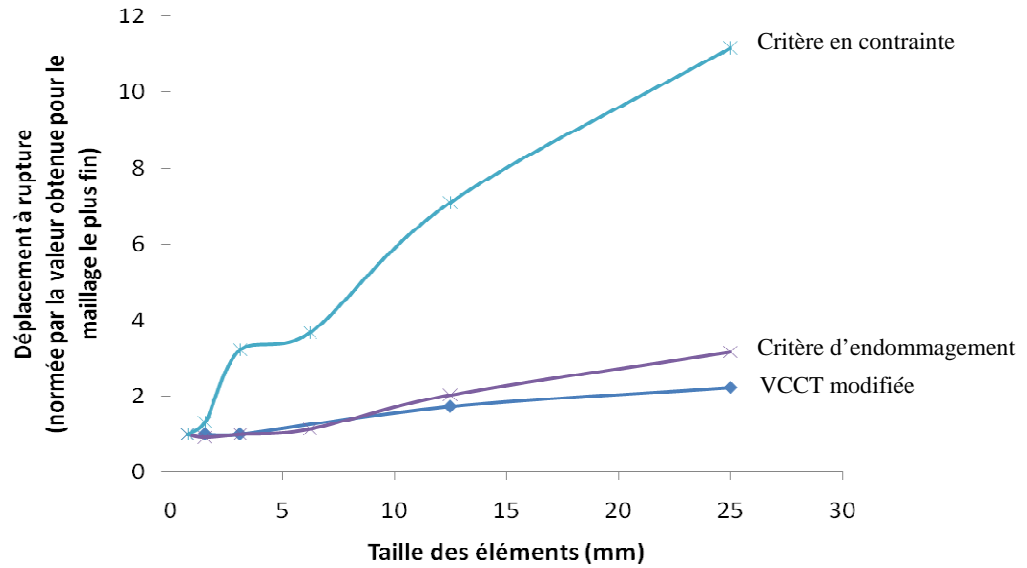


Fig. 7: Dépendance au maillage de la prédiction de la rupture – Cas d'un chargement de flexion

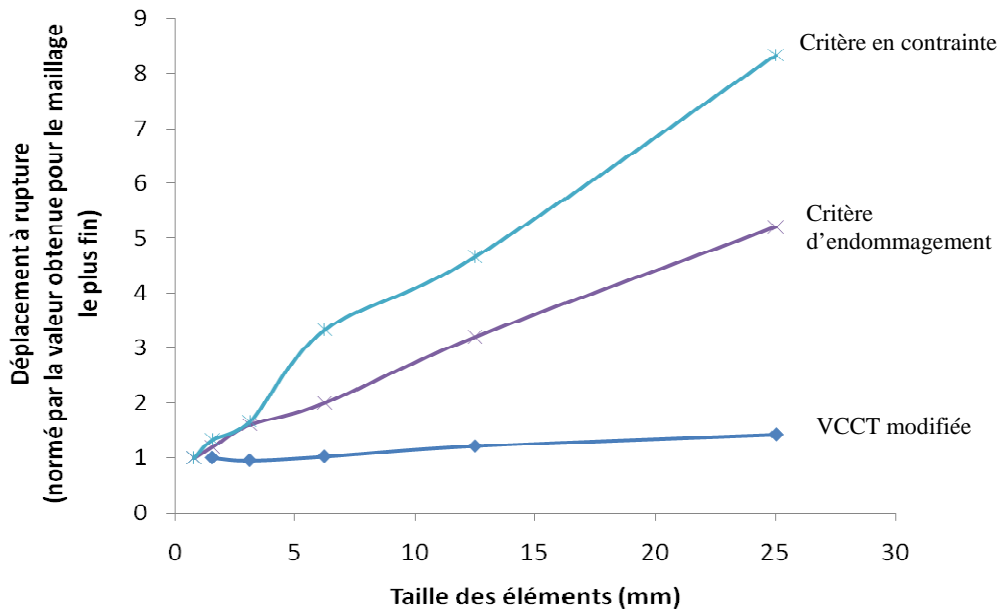


Fig. 8: Dépendance au maillage de la prédiction de la rupture – Cas d'un chargement de traction

6. Discussion

Une nouvelle approche basée sur la méthode VCCT a été développée avec de répondre aux exigences liées à l'étude de structure complexe telle qu'une aile d'avion. L'approche consiste à évaluer le taux de restitution d'énergie total dans le but de prédire l'initiation du décollement des éléments de la structure. Une comparaison avec la méthode VCCT classique et une approche basée sur la variation d'énergie interne du modèle (section 4) a mis en évidence la pertinence de cette nouvelle approche. Les résultats des prédictions pour deux cas de chargements, traction et flexion, se sont révélés très proches des prédictions fournies par les deux autres méthodes. Les contraintes liées à l'étude de grande structure ayant pour objectif principal de réduire les temps d'analyse peuvent ainsi être respectées avec l'approche VCCT modifiée par comparaison au deux autres approches qui imposent une étude en deux étapes et la modélisation d'une fissure initiale.

La dépendance au maillage de l'approche VCCT modifiée a été étudiée et comparée à des approches couramment utilisées, l'une basée sur un critère en contrainte, la seconde basée sur un critère en endommagement. Les résultats de l'étude montre que l'approche VCCT modifiée est la méthode la moins dépendante au maillage ce qui s'avère être un argument important puisque la méthode est développée pour être appliquée sur des maillages très grossiers. Les approches en contrainte ou en endommagement requièrent un raffinement du maillage afin de fournir des prédictions précises, ce qui ne peut être envisagé à l'échelle globale de la structure.

7. Conclusion

Un critère de rupture permettant de prédire l'initiation du décollement des sous-composants d'une structure a été développé. L'objectif est d'identifier les éléments critiques d'une structure, c'est-à-dire, les composants ayant la plus forte probabilité de se décoller. Le nouveau critère est basé sur une approche VCCT modifiée et repose sur l'estimation du taux de restitution d'énergie sans pour autant imposer la modélisation d'une fissure initiale. Un seul modèle est nécessaire et aucun décollement initial n'est requis, contrairement aux approches plus communément utilisées comme la méthode VCCT classique.

La nouvelle approche a été appliquée avec succès dans le cas d'une étude du décollement d'un raidisseur d'aile d'avion pour différents modes de chargement. Le critère a ainsi permis d'identifier l'initiation du décollement du sous-composant. Son application ne se réduit cependant pas au décollement mais peut également s'adapter à la prédiction de l'initiation du délaminage, c'est-à-dire, du décollement entre les plis d'un stratifié.

Ainsi, le critère permet d'identifier les zones critiques, pouvant être soumises à un décollement (ou délaminage) à l'échelle globale de la structure ce qui correspond à la première étape d'une analyse multi-échelle. La seconde étape consiste à étudier de façon plus précise l'initiation et la propagation des endommagements à l'échelle du composant. Dans cet objectif, une approche est en cours de développement et repose sur la modélisation des endommagements inter et intra-laminaire par l'utilisation combinée de contacts cohésifs, des critères de rupture LarC05 [8], d'une formulation diffuse de la fissuration [9] et/ou de la méthode des éléments finis étendus (X-FEM) [10].

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la société Airbus pour son support financier via le projet *abc*, *Analysis of Bonded Composites*.

Références

- [1] J.D Whitcomb, Iterative Global/Local Finite Element Analysis, *Computers & Structures* 1991, 40(4), pp 1027-1031.
- [2] K. Srirengan, J.D. Whitcomb and C. Chapman, Modal technique for three-dimensional global/local stress analysis of plain weave composites, *Composite Structure*, 1997, 39(1-2), pp. 145-156.
- [3] R. Krueger, The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and Applications, ICASE Report No. 2002-10, Hampton, Virginia.
- [4] R. Krueger, Minguet P.J., Analysis of composite skin-stiffener debond specimens using a shell/3D modeling technique, *Composite Structures*, 2007, 81, pp. 41-59
- [5] S. Miot, ST. Pinho, Failure criterion to predict the debonding initiation of skin-stiffener run-out, Submitted for publication, 2011
- [6] S. Psarras, ST. Pinho and BG. Falzon, Investigation of stiffener run-out failure, 14th European Conference on Composite Materials, 2010, Budapest, Hungary.
- [7] Benzeggagh ML. and Kenane M. Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus. *Composites Science and Technology* 1996;56:439-449.
- [8] Pinho ST., Darvizeh R., Robinson P. and al., Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites, Submitted for publication, 2010
- [9] Pinho ST, Iannucci L, Robinson P, Physically based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking. Part II: FE implementation, *Composites Part A*, 2006, 37, pp.766-777
- [10] Moës N., Dolbow J. and Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Engrg.* 1999;46(1):131-150.