

Validation sur différents cas tests industriels d'une méthode simplifiée d'analyse de la tenue de structures perforées = Validation on different industrial test cases of a simplified method for strength analysis of perforated structures

Frédéric Laurin, Nicolas Carrère, Jean-François Maire, Stéphane Mahdi

▶ **To cite this version:**

Frédéric Laurin, Nicolas Carrère, Jean-François Maire, Stéphane Mahdi. Validation sur différents cas tests industriels d'une méthode simplifiée d'analyse de la tenue de structures perforées = Validation on different industrial test cases of a simplified method for strength analysis of perforated structures. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00388075

HAL Id: hal-00388075
https://hal.science/hal-00388075

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Manuscrit auteur, publié dans "JNC 16, Toulouse : France (2009)"

Validation sur différents cas tests industriels d'une méthode simplifiée d'analyse de la tenue de structures perforées

Validation on different industrial test cases of a simplified method for strength analysis of perforated structures

F. Laurin [1], N. Carrère[1], J.-F. Maire[1] et S. Mahdi[2]

1 : ONERA/DMSC
ONERA 29 avenue de la division Leclerc, 92322 Châtillon Cedex France
e-mail : laurin@onera.fr, carrere@onera.fr, maire@onera.fr

2 : AIRBUS/EDASMT
AIRBUS France, 316, route de Bayonne - 31060 Toulouse Cedex 9
e-mail : stephane.mahdi@airbus.com

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

Résumé

En raison de leurs caractéristiques spécifiques élevées, les matériaux composites, et tout particulièrement les stratifiés d'unidirectionnels Carbone/Epoxy, sont de plus en plus largement employés pour la réalisation de structures primaires, telles que le caisson central. Toutefois, la tenue de structures composites peut être considérablement réduite par l'ajout de singularités géométriques, telles que les perforations ou les entailles. De par leurs caractères semi-empiriques, les méthodes d'analyse structurale de plaques perforées nécessite l'établissement de valeurs de calculs massivement recalées sur les données expérimentales, ce qui constitue un facteur limitant pour un dimensionnement optimal. Une méthode simplifiée d'analyse de la tenue de plaques perforées, répondant aux contraintes de précision et de coûts de calcul spécifiées par un bureau d'étude, est présentée. Les prévisions de l'approche proposée sont comparées à une large base expérimentale présentant différentes configurations de perforations, de nombreux empilements et différents matériaux Carbone/Epoxy.

Abstract

The use of unidirectional carbon fibre-reinforced composites in the design of primary structures, such as the centre wing box, has spread increasingly over the past few years. However, composite structures can be weakened by the introduction of geometrical singularities, such as holes or notches. The semi-empirical aspect of the current open-hole failure approaches requires the allowable to be systematically fitted against specific test results. This point constitutes a strong limitation for an optimal design. A simplified strength analysis method for perforated plates, insuring the requirements of precision and time of computation of the design office, is presented. The predictions of the proposed approach are compared with a large experimental data basis, with different configurations of perforations, with different stacking sequences and on different Carbon/Epoxy materials.

Mots Clés : Rupture, Endommagement, Multiéchelle, Plaques trouées.
Keywords : Failure, Damage, Multiscale, Open hole plates.

1 Introduction

Afin de répondre aux besoins des compagnies aéronautiques, pour la réalisation d'appareils plus légers et moins polluants, les prochaines générations d'avions civils intégreront de nombreuses structures primaires en matériaux composites stratifiés d'unidirectionnels (UD), telles que le caisson central, le fuselage ou les ailes. La réalisation de ce type de structure, jouant un rôle clé dans la tenue de l'avion, nécessite un haut niveau de confiance dans les méthodes de dimensionnement.

D'un point de vue académique, de nombreuses méthodes d'analyse de la rupture de plaques perforées ont été proposées dans la littérature, basées sur des lois d'endommagement pour décrire la fissuration des plis, associées à des éléments de zone cohésive pour décrire le délaminage [1], ou utilisant des éléments de zone cohésive pour décrire l'apparition des fissures les plus probables [2] (plan et hors-plan), ou maillant explicitement toutes les fissures possibles [3] et se basant sur la mécanique linéaire de la rupture. Toutefois,

ces approches avancées sont relativement complexes à mettre en œuvre dans un bureau d'étude et les coûts de calculs associés à ces méthodes restent très élevés pour traiter des structures aéronautiques.

D'un point de vue industriel, des méthodes simplifiées d'analyse de la tenue de structures perforées, telles que la méthode du point stress [4], sont couramment utilisées. Toutefois, dû au caractère semi-empirique des approches de la rupture considérées, le calcul de pièces aéronautiques nécessite l'établissement de valeurs de calculs massivement recalées sur les données expérimentales disponibles.

L'objectif de cette étude consiste à proposer une méthode d'analyse de la tenue de structures perforées, basée sur des approches plus physiques, mais répondant aux contraintes industrielles, à savoir présentant des coûts de calculs réduits et étant relativement simple à mettre en œuvre (aussi bien en terme d'identification que d'utilisation et d'exploitation).

Cette méthode simplifiée d'analyse de la tenue de structures perforées, présentée dans la section 2, peut se décomposer en trois points majeurs, à savoir (i) la détermination des flux d'efforts au sein de la plaque trouée, (ii) la détermination du comportement et de la rupture des différents plis constituant le stratifié et (iii) la prévision de la ruine finale de la structure.

Dans la section 3, les prévisions de cette méthode d'analyse de la ruine de structures perforées sont comparées avec des résultats d'essais de traction uniaxiale sur plaques perforées, présentant différents empilements, différents rayons de perforation, différents rapports largeur de plaque sur rayon du trou, avec des résultats d'essais de traction hors-axes et d'essais de compression uniaxiale. Ces comparaisons sont également effectuées sur d'autres matériaux Carbone/Epoxy de différentes générations.

2 Méthode d'analyse de la tenue de plaques perforées

2.1 Détermination analytique des efforts membranaires

L'estimation des flux d'efforts au sein des éprouvettes perforées est effectuée par une méthode analytique [5]. Ce modèle, initialement développé pour les matériaux métalliques, permet d'obtenir une solution exacte des flux d'efforts pour des plaques orthotropes de dimensions infinies soumises à des efforts membranaires plans et éventuellement multiaxiaux, dont le comportement matériau est supposé linéaire élastique. Par la suite, un facteur de correction empirique (eq. 1) est appliqué aux efforts estimés en tout point de la plaque perforée afin de prendre en compte les effets d'une largeur finie (w).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = C_{w/d}\left(\frac{d}{w}\right)\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}_{w=\infty} \quad \text{avec} \quad C_{w/d}\left(\frac{d}{w}\right) = \frac{2+\left(1-\frac{d}{w}\right)^3}{3\left(1-\frac{d}{w}\right)} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Les efforts membranaires prévus au sein des plaques perforées ont été comparés aux résultats de simulations par éléments finis effectuées avec le code Samcef© avec différents maillages (différentes tailles de mailles et différents types d'éléments).

La Fig. 1 montre un très bon accord entre les prévisions de la méthode analytique et les résultats des calculs par éléments finis sur l'ensemble de la plaque et le modèle analytique permet d'obtenir une bonne description du gradient de contrainte près de la perforation.

Toutefois, un écart est observé près du bord de la plaque car le modèle analytique ne prend pas en compte les effets de bord contrairement aux simulations par éléments finis. Il a donc été démontré que le domaine de validité de cette méthode est restreint au cas de plaques trouées pour lesquelles l'influence des effets de bords sur le gradient de contrainte en bord de trou est négligeable. L'approche analytique utilisée n'est donc valable que pour des plaques perforées dont le rapport largeur de plaque (w) sur diamètre du trou (d) est supérieur à 3.

Pour un rapport w/d<3, l'estimation des efforts membranaires au sein de la plaque ne peut être déterminée que par calculs éléments finis. La méthode d'analyse de la tenue de structures composites perforées a également été interfacée avec le code de calcul commercial Samcef©.

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

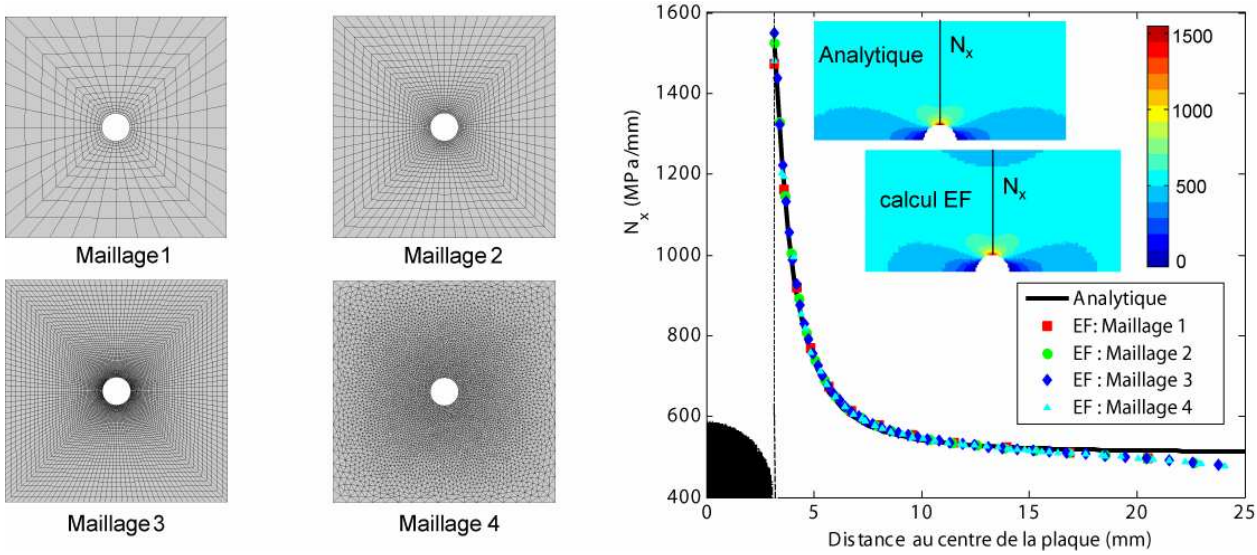


Fig. 1. Comparaisons des efforts membranaires estimés par la méthode analytique et par simulation éléments finis sur un stratifié 25/50/25 en T700/M21 soumis à un effort de traction uniaxiale.

2.2 Approche multiéchelle progressive de la rupture

La prévision du comportement local et de la rupture des différents plis au sein de la structure jusqu'à la ruine finale de l'éprouvette est assurée, en post-traitement, par une approche multiéchelle progressive de la rupture [6]. L'approche multiéchelle de la rupture considère le pli unidirectionnel comme entité élémentaire de modélisation, et est donc prédictive pour différentes séquences d'empilements. Cette approche peut être décomposée en quatre étapes :

Afin de prévoir la rupture d'un pli au sein du stratifié, il est nécessaire de décrire de façon satisfaisante les contraintes et déformations au sein des plis. Une loi de comportement non linéaire thermo-viscoélastique est utilisée à l'échelle du pli (eq. 2).

$$\sigma = C^0 : (\varepsilon - \varepsilon^{th} - \varepsilon^{ve} - \varepsilon^{nl}) \qquad \text{(eq. 2)}$$

où σ est la contrainte mésoscopique, C^0 la rigidité élastique initiale, ε la déformation totale, ε^{th} la déformation thermique (afin de prendre en compte les contraintes résiduelles de cuisson, essentielles pour une prévision correcte du premier pli rompu), ε^{ve} la déformation visqueuse [7] (afin de prévoir correctement la ruine de stratifiés de type $[\pm\theta^\circ]_s$ ou de stratifiés fortement désorientés tel que le 10/80/10) et ε^{nl} la déformation élastique non linéaire représentant la non linéarité sens fibre en traction [8] (rigidification du comportement observée pour les matériaux de nouvelle génération contenant des nodules thermoplastiques tel que le T700/M21 ou le T800/M21) et en compression [9] (assouplissement du comportement observé usuellement sur les matériaux Carbone/Epoxy).

La prévision de la rupture du pli au sein du stratifié est effectuée à partir d'un critère de rupture, basé sur les hypothèses de Hashin [10], distinguant les modes de ruine fibre (eq. 3) et interfibre (eq. 4) et modélisant séparément les mécanismes de rupture en traction et en compression au sein de chacun des modes.

$$f_1^+ = \frac{\sigma_{11}}{X_t(d_2)} = 1 \text{ si } \sigma_{11} \geq 0 \quad \text{et} \quad f_1^- = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_c^f(1-p\sigma_{22})}\right)^2 = 1 \text{ si } \sigma_{11} < 0 \qquad \text{(eq. 3)}$$

$$f_2^+ = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_c(1-p\sigma_{22})}\right)^2 = 1 \text{ si } \sigma_{22} \geq 0 \quad \text{et} \quad f_2^- = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_c(1-p\sigma_{22})}\right)^2 = 1 \text{ si } \sigma_{22} < 0 \qquad \text{(eq. 4)}$$

où X_t et X_c sont respectivement les résistances longitudinales de traction et de compression, Y_t et Y_c les résistances transverses de traction et de compression, S_c la résistance de cisaillement plan et S_c^f la résistance de cisaillement plan du mode fibre.

Les deux améliorations du critère de rupture fibre, par rapport au critère de Hashin, sont (i) l'introduction d'un couplage entre l'endommagement matriciel (noté d_2) et la résistance longitudinale en traction (permettant d'obtenir des prévisions de la rupture conservatives pour des chargements complexes) et (ii) l'introduction d'un couplage entre le cisaillement plan et la rupture en compression, observé expérimentalement [11]. La principale amélioration du critère de rupture interfibre est la prise en compte du renforcement de la résistance du matériau sous un chargement de compression transverse et de cisaillement plan (par l'introduction du paramètre p).

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

Une fois le pli rompu, ses propriétés mécaniques sont dégradées progressivement en utilisant un modèle de dégradation basé sur les lois d'endommagement développées à l'Onera [12]. La souplesse élastique initiale S^0 est augmentée (eq. 5) par deux termes représentant respectivement les dégradations en mode fibre (d_1H_1) et en mode interfibre (d_2H_2). Pour chaque mode de ruine, on distingue la cinétique de dégradation (d_i) et les effets des ruptures de plis (H_i).

$$S = S^0 + d_1 H_1 + d_2 H_2 \qquad \text{(eq. 5)}$$

Enfin, pour une plaque lisse, la rupture du stratifié est supposée due à la première rupture de pli en mode fibre ou en compression transverse. Dans le cas des empilements utilisés dans cette étude et contenant principalement des plis à 0°, ±45° et 90°, la ruptu re finale est toujours due à une rupture de pli en mode fibre.

Cette approche multiéchelle de la rupture peut être identifiée à partir des essais sur plis UD et stratifiés effectués dans le cadre de campagne d'essais au niveau coupons. Les prévisions de l'approche multiéchelle de la rupture pour des stratifiés en T700/M21, présentant différentes stratifications (notées X/Y/Z avec X% de plis à 0°, Y% de plis à ±45° et Z% de plis à 90°) et soumis à un effort de traction uniaxiale, sont comparées avec succès aux résultats d'essais disponibles (seules les valeurs moyennes des résultats expérimentaux sont reportées sur la Fig. 2).

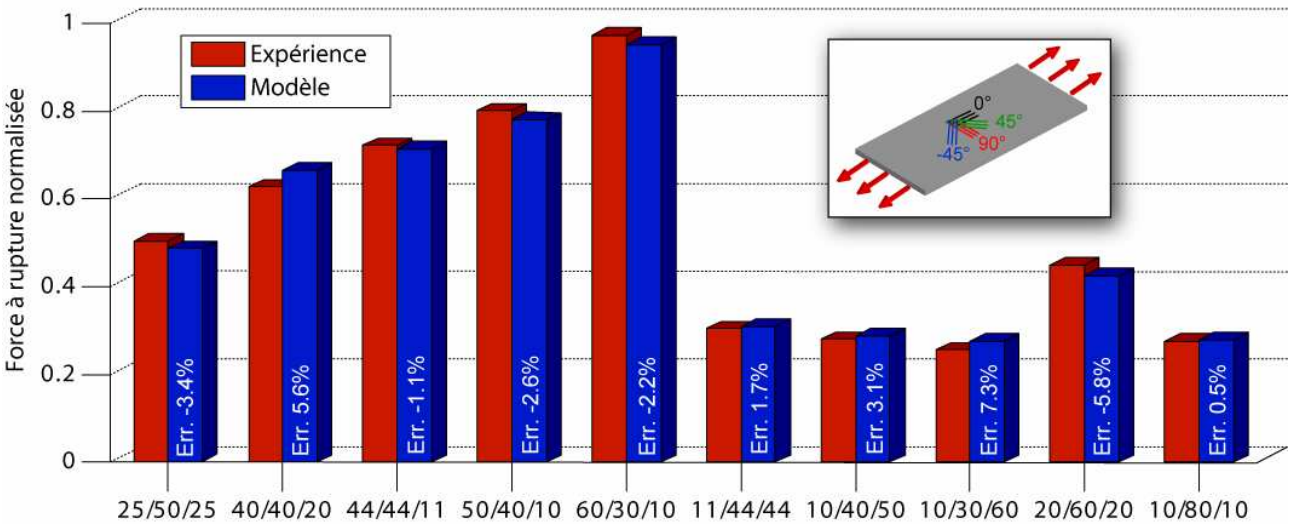


Fig. 2. Comparaisons essais/calculs sur des plaques lisses en T700/M21 présentant différents empilements soumis à un effort de traction uniaxiale.

2.3 Méthode du volume caractéristique de rupture

Assimiler la ruine finale de plaques perforées à la rupture du premier pli en mode fibre conduit à des prévisions extrêmement conservatives (facteur 2 à 3) en raison de la surcontrainte en bord de trou. Une méthode de volume caractéristique de rupture, basée sur les travaux de Hochard [13] pour les matériaux tissés, est appliquée au cas des plaques trouées stratifiées d'UDs et consiste à utiliser dans le critère de rupture fibre (f_1^+ ou f_1^-) une contrainte moyennée $\overline{\sigma}$ sur un volume défini (Ω) par une longueur interne l_0 (voir Fig. 3a). Une étude de convergence portant sur le nombre minimum de points d'intégration (voir Fig. 3b) a montré qu'à partir d'une vingtaine de points, la force à rupture prévue était indépendante du nombre de points considérés. Par la suite, l'ensemble des calculs sera effectué avec 19 points d'intégration.

La longueur interne (l_0) est indépendante de la séquence d'empilement mais est fonction du rayon de perforation (r) comme proposé par Withney [4] (voir eq. 6).

$$l_0 = \rho\sqrt{r} \qquad \text{(eq. 6)}$$

Un seul essai à rupture sur plaque stratifiée perforée est nécessaire pour identifier le paramètre ρ (eq. 6).

L'ensemble de la méthode d'analyse de la tenue de structures perforées, à savoir la méthode analytique de détermination des flux au sein de la plaque trouée, l'approche multiéchelle de la rupture pour la prévision du comportement local et de la rupture des plis au sein du stratifié et la méthode de volume caractéristique de rupture pour prévoir la ruine finale de l'éprouvette perforée, a été implémenté sous Matlab© et le temps de calcul sur un ordinateur portable est d'environ 2 minutes. Cette approche simple à mettre en œuvre et présentant un coût de calcul réduit répond aux différentes contraintes industrielles imposées par les bureaux d'étude.

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

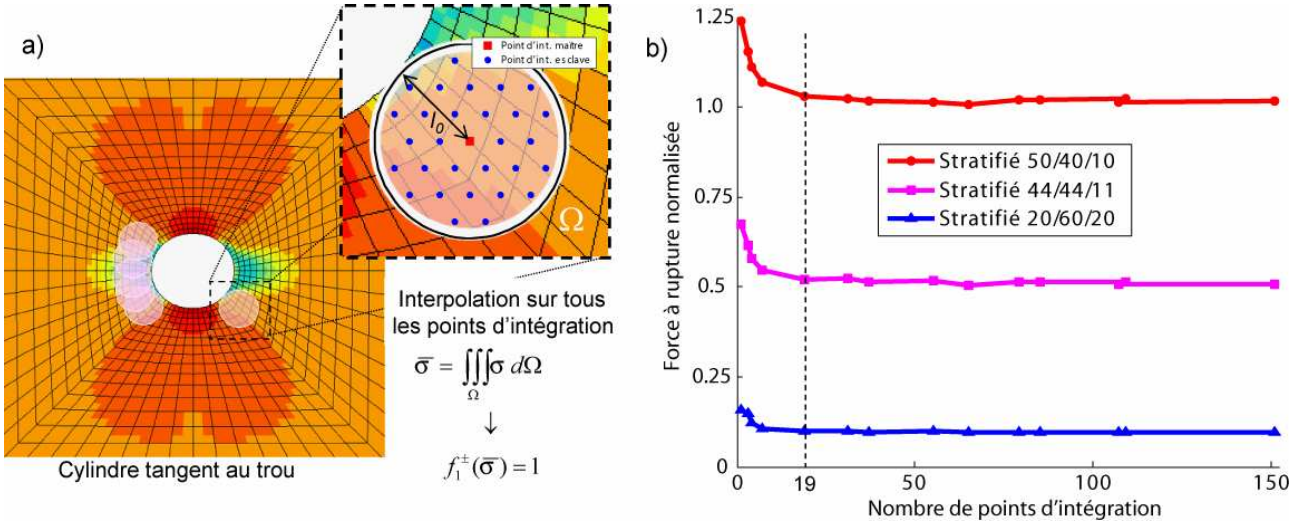


Fig. 3. a) Principe de la méthode de volume de rupture caractéristique et b) détermination du nombre de points d'intégration pour prévoir la ruine de plaques perforées.

3 Comparaison essais/calculs sur plaques stratifiées perforées

Bien que le dimensionnement de structures aéronautiques nécessite l'utilisation de valeurs de calcul prenant en compte la dispersion matériau (valeurs A ou B) afin d'assurer les niveaux de sécurité requis, les valeurs moyennes des rigidités et résistances sont utilisées dans cet article car l'objectif de cette étude consiste à évaluer les capacités prédictives de l'approche simplifiée d'analyse de la tenue de structures composites perforées à partir de comparaisons sur une large base d'essais expérimentale. Uniquement les valeurs moyennes des résultats expérimentaux sont reportées sur les différentes figures présentées dans cette section.

3.1 Essais de traction sur plaques trouées présentant différents empilements

La Fig. 4 présente la comparaison des forces à rupture prévues par l'approche proposée sur des plaques perforées en T700/M21, présentant différents empilements et soumises à un effort de traction uniaxiale, avec les résultats d'essais disponibles. Pour l'ensemble des plaques perforées testées, le diamètre de perforation est de 6.35 mm et le rapport largeur de plaque sur diamètre de trou est de 5. La longueur interne a été identifiée sur la plaque perforée stratifié d'empilement 50/40/10. Les prévisions du modèle sont en très bon accord avec les données expérimentales pour tous les empilements testés.

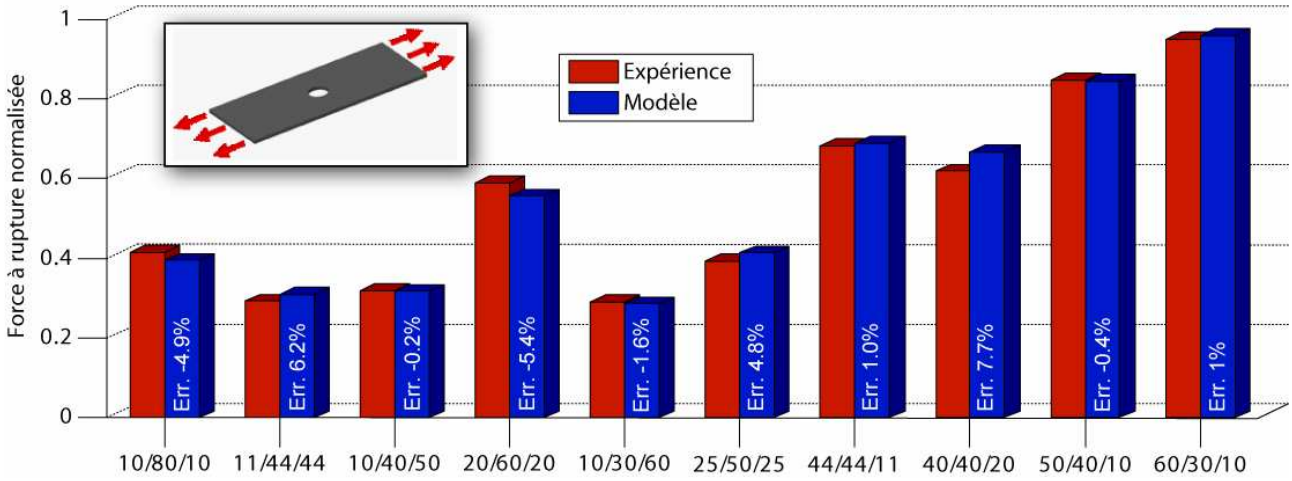


Fig. 4. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T700/M21 présentant différents empilements soumis à un effort de traction uniaxiale.

Cette comparaison a également été effectuée sur d'autres matériaux Carbone/Epoxy comme l'IMS/977-2 ou encore le T800/M21 (matériau haut module) et est reportée sur la Fig. 5. La longueur interne des deux

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

matériaux a été identifiée sur les plaques perforées d'empilement 40/40/20. Les prévisions sont à nouveau en bon accord avec les données expérimentales.

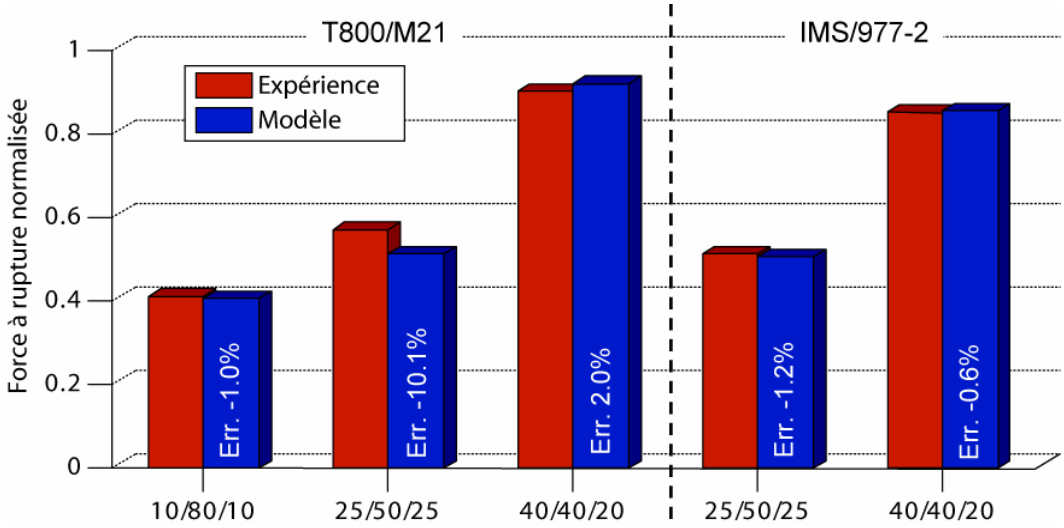


Fig. 5. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T800/M21 et IMS/977-2 présentant différents empilements soumis à un effort de traction uniaxiale.

3.2 Essais de traction sur plaques trouées présentant différents rayons de perforation

La Fig. 6 présente la comparaison des contraintes macroscopiques à rupture prévues par l'approche proposée sur des plaques perforées en T700/M21, présentant différents diamètres de perforation et soumises à un effort de traction uniaxiale, avec les résultats d'essais disponibles. Pour l'ensemble des plaques perforées testées, le rapport largeur de plaque sur diamètre de trou (w/d) est fixé à 5. La variation de diamètre de perforation induit une modification importante du gradient de contrainte en bord de trou. L'augmentation du diamètre de perforation entraîne une diminution de la contrainte macroscopique à rupture (définie comme la force divisée par la section), résultat expérimental également obtenu par Wisnom [14].

L'introduction de la dépendance de la longueur interne au rayon de perforation permet d'obtenir des prévisions en bon accord avec les données expérimentales ou raisonnablement conservatives, notamment pour l'empilement 60/30/10.

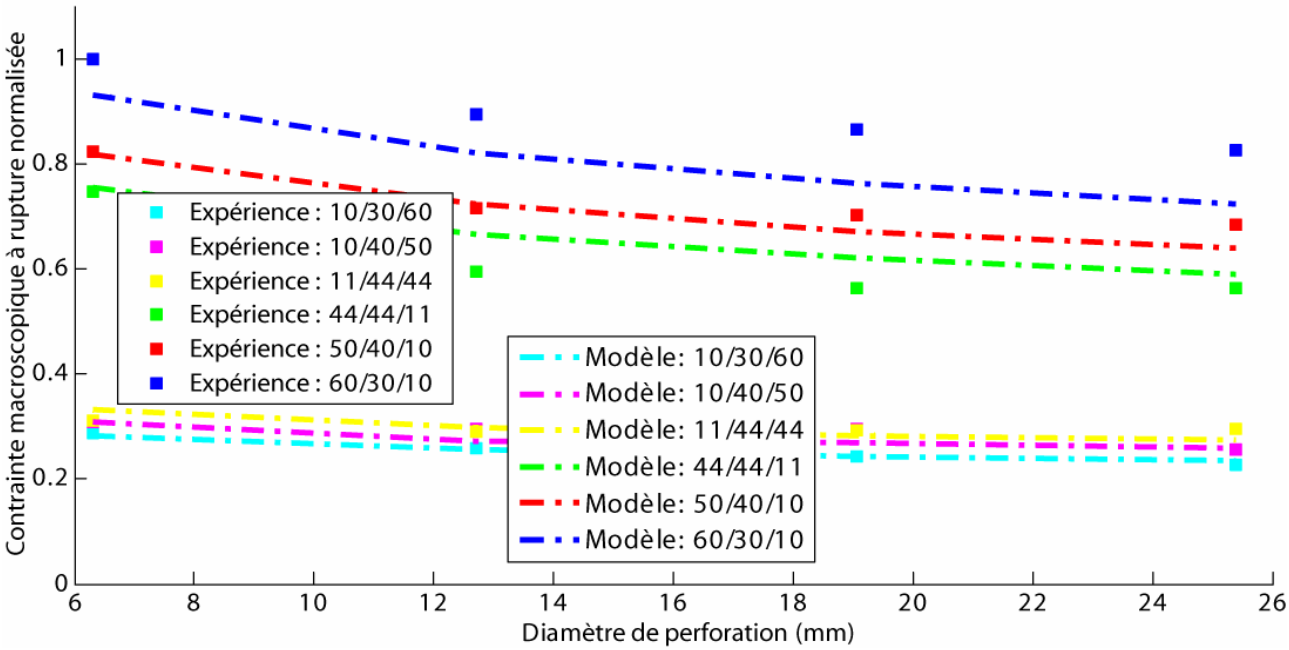


Fig. 6. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T700/M21 présentant différents diamètres de perforations soumises à un effort de traction uniaxiale.

De plus, l'augmentation du diamètre de perforation induit une diminution de la contrainte macroscopique nette (définie comme la force divisée par la section nette, i.e. le diamètre du trou est retranché à la largeur

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

de la plaque). De plus, la contrainte macroscopique à rupture nette obtenue est très inférieure à la contrainte macroscopique à rupture mesurée sur plaque lisse (20% d'écart en moyenne). La méthode empirique considérant que la contrainte macroscopique nette est indépendante du diamètre du trou conduit à surestimer de façon notable la ruine des éprouvettes perforées testées.

3.3 Essais de traction sur plaques trouées présentant différents rapports w/d

La Fig. 7 présente la comparaison des contraintes macroscopiques à rupture prévues par l'approche proposée sur des plaques perforées en T700/M21, présentant différents rapports largeur de plaque sur diamètre de trou (w/d) et soumises à un effort de traction uniaxiale, avec les essais disponibles. Pour l'ensemble des plaques perforées testées, le diamètre de trou est fixé à 6.35 mm. Le diamètre de perforation étant constant, le gradient de contrainte en bord de trou reste inchangé. La contrainte macroscopique à rupture prévue à partir d'un rapport w/d=5 est par conséquent quasiment constante. En revanche, pour les rapports w/d<4, la largeur de la plaque étant restreinte, l'influence des effets de bord sur le gradient de contrainte devient non négligeable et induit une diminution de la contrainte macroscopique à rupture.

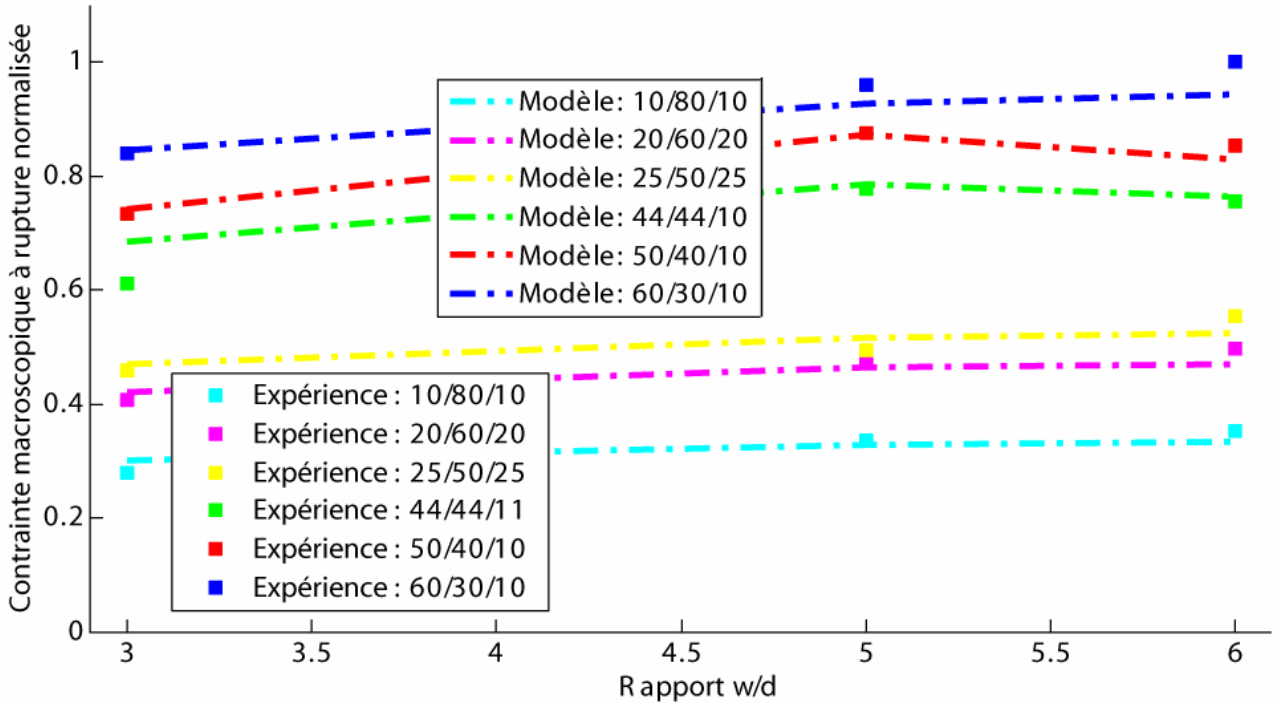


Fig. 7. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T700/M21 présentant différents rapports largeur de plaques sur diamètres de perforations soumises à un effort de traction uniaxiale.

Les prévisions du modèle sont en bon accord avec les données expérimentales, toutefois pour les faibles rapports w/d, l'approche tend à surestimer la rupture car la méthode analytique [5], permettant de déterminer les flux d'efforts au sein de la plaque perforée, ne prend pas en compte l'influence des effets de bord comme mentionné précédemment.

3.4 Essais de traction hors-axe sur plaques perforées

La Fig. 8 présente la comparaison des forces à rupture prévues par le modèle proposé sur des plaques perforées en T700/M21, présentant différentes séquences d'empilement et soumises à des efforts de traction uniaxiale hors-axes, avec les résultats d'essais disponibles.

Ce type d'essai hors-axe permet d'obtenir des champs de contraintes multiaxiaux plus complexes dans la périphérie de la perforation avec un dispositif expérimental simple et le faciès de rupture de la plaque évolue avec l'angle du chargement. Les prévisions du modèle sont en bon accord avec les données expérimentales pour l'ensemble des angles de traction hors-axes.

Pour le stratifié 50/40/10, la rupture des plis à 0° en mode fibre induit la ruine de l'éprouvette pour les angles de traction à 0° et 10°, ce qui explique le renforcement apparent de la tenue de l'éprouvette pour les faibles angles. En revanche, la ruine de la structure perforée d'empilement 60/30/10 pour un angle de traction de 10° correspond à la rupture des plis à 45° en mode fibre, ce qui explique la diminution rapide de la tenue de l'éprouvette. L'approche proposée permet de reproduire de façon satisfaisante les tendances observées.

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

Toutefois, le modèle tend à surestimer les forces à rupture pour les angles, compris entre 15° et 35°, pour lesquels le cisaillement plan créé en bord de trou est maximal dans les plis les plus chargés dans le sens fibre.

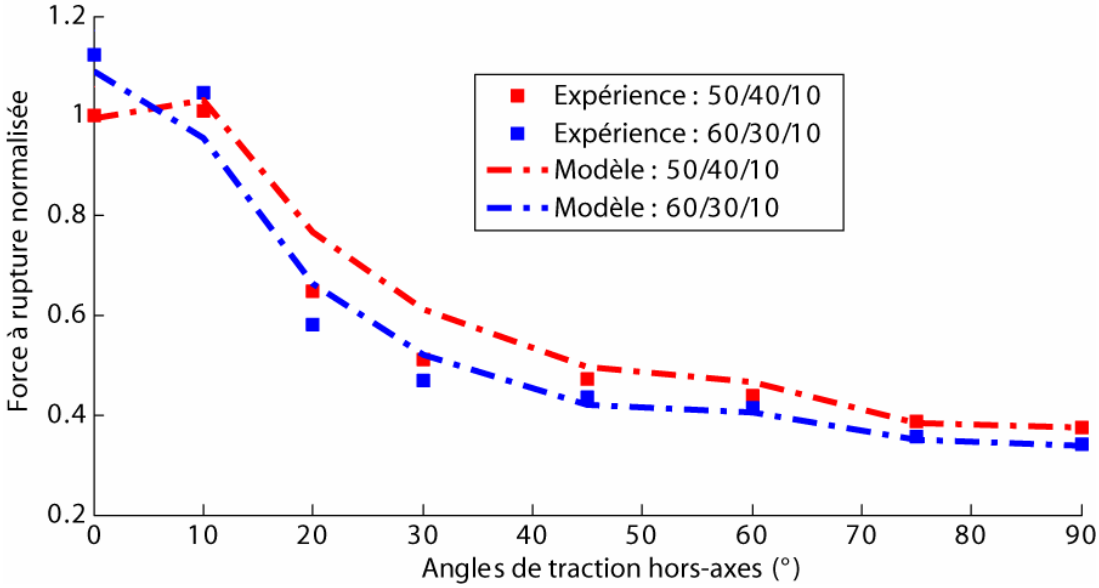


Fig. 8. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T700/M21 présentant différents empilements soumises à des efforts de traction uniaxiale hors-axe.

3.5 Essais de compression sur plaques trouées présentant différents empilements

La Fig. 9 présente la comparaison des forces à rupture prévues par l'approche proposée sur des plaques perforées en T700/M21, présentant différents empilements et soumises à un effort de compression uniaxiale, avec les résultats d'essais disponibles. Pour l'ensemble des plaques perforées testées, le diamètre de trou est de 6.35 mm, le rapport largeur de plaque sur diamètre de trou est fixé à w/d=5 et la longueur de la zone utile est égale à la largeur de l'éprouvette. La longueur interne est identifiée sur le stratifié 50/40/10 et est différente de celle identifiée en traction. Les prévisions sont en bon accord avec les données expérimentales pour les stratifiés orientés (du quasi-isotrope 25/50/25 au fortement orienté 60/30/10). Toutefois, le modèle proposé sous-estime les forces à rupture pour les stratifiés désorientés (environ de 20%).

L'influence du délaminage sur la tenue d'éprouvettes perforées sollicitées en compression est bien plus importante que pour des chargements de traction. La non prise en compte de ce mécanisme de ruine dans le modèle proposé peut expliquer les écarts observés.

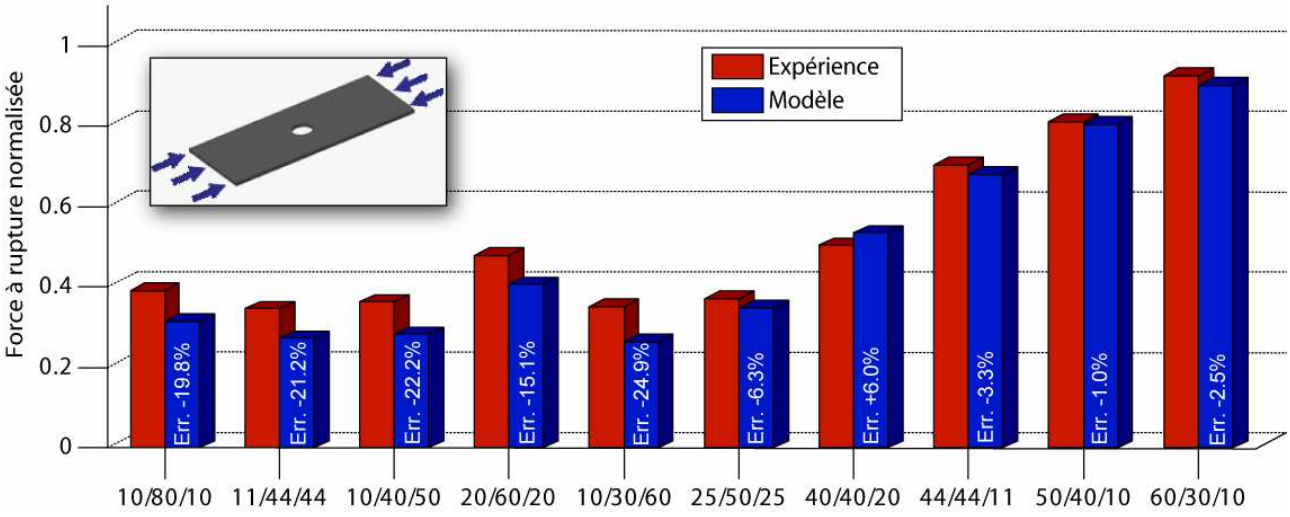


Fig. 9. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T700/M21 présentant différents empilements soumis à un effort de compression uniaxiale.

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

Cette comparaison a également été effectuée sur d'autres matériaux Carbone/Epoxy comme l'IMS/977-2 ou encore le T800/M21 et est reportée sur la Fig. 10. La longueur interne des deux matériaux a été identifiée sur les plaques perforées d'empilement 40/40/20. Les prévisions sont en bon accord avec les données expérimentales pour les stratifiés orientés mais sous-estiment la tenue de plaques perforées présentant un empilement désorienté, tel que le stratifié 10/80/10 en T800/M21.

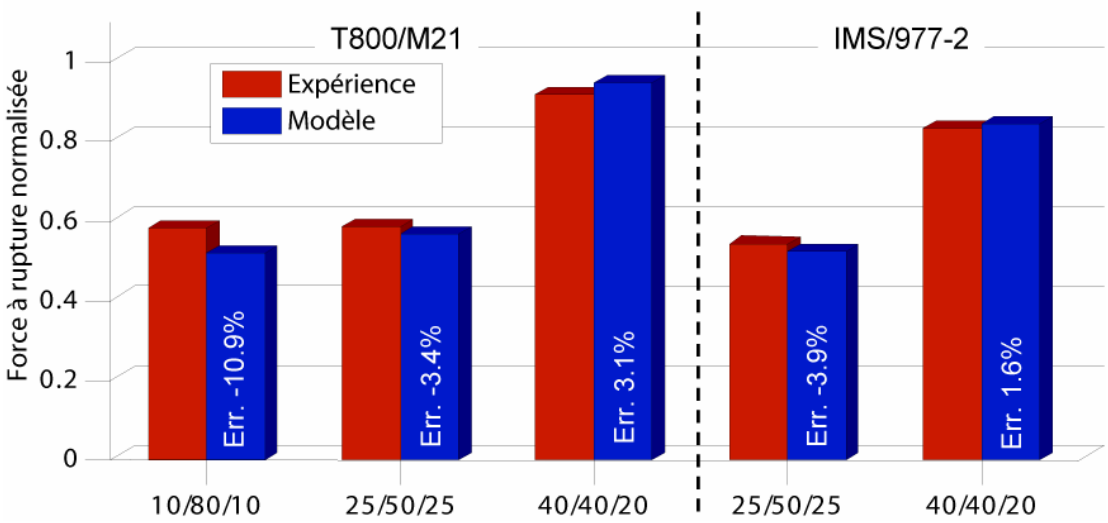


Fig. 10. Comparaisons essais/calculs sur des plaques perforées en T800/M21 et IMS/977-2 présentant différents empilements soumis à un effort de compression uniaxiale.

Par conséquent, des essais supplémentaires sur éprouvettes perforées présentant des empilements désorientés sollicitées en compression devraient être effectués pour améliorer la compréhension des mécanismes de ruine intervenant pour des sollicitations de compression.

4 Conclusions

Une méthode simplifiée d'analyse de la tenue de structures composites perforées a été proposée et peut être décomposée en trois étapes principales: (i) la détermination des flux d'efforts au sein de la plaque trouée par une méthode analytique dont la validité a été démontrée par des comparaisons avec des simulations par éléments finis sur différents cas tests représentatifs de configurations aéronautiques, (ii) la détermination du comportement et de la rupture des différents plis constituant le stratifié par une approche multiéchelle progressive de la rupture dont les prévisions de rupture finale de plaques lisses ont été comparées avec succès aux résultats d'essais disponibles, et (iii) la prévision de la ruine finale de structures perforées par une méthode de volume caractéristique de la rupture consistant à utiliser dans le critère de rupture fibre des contraintes moyennées dans un certain volume. Cette approche a été implémentée dans Matlab© et répond aux contraintes imposées par les bureaux d'étude, concernant la simplicité d'utilisation (identification et analyse des résultats) et des coûts de calcul réduits.

L'estimation des capacités prédictives de cette approche a été effectuée au travers de comparaisons avec une large base expérimentale.

Il a été démontré que la longueur interne utilisée dans la méthode de volume caractéristique de rupture était indépendante de l'empilement considéré au travers de comparaisons avec des stratifiés présentant des séquences d'empilements différentes et représentatives de celles utilisées dans les structures aéronautiques et ce, pour différents matériaux Carbone/Epoxy.

Toutefois, pour décrire de façon satisfaisante l'influence du diamètre du trou sur la tenue de structures perforées, la longueur interne doit être fonction du diamètre de perforation. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les données expérimentales ou raisonnablement conservatifs.

La variation du rapport largeur de plaque sur diamètre de perforation ne modifiant pas le gradient de contrainte aux alentours du trou, la contrainte macroscopique à rupture reste quasiment constante pour des rapports w/d>4. Toutefois, pour de faibles rapports, l'influence des effets de bord sur le gradient de contrainte en bord de trou devient non négligeable et explique que l'approche proposée surestime la ruine des éprouvettes perforées de faibles largeurs.

Enfin, la prévision de la ruine de plaques perforées sollicitées en compression est plus complexe. Pour les plaques perforées présentant des empilements orientés, la méthode proposée permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Il convient de noter que la longueur interne identifiée est différente en traction et en compression. Néanmoins, pour des empilements désorientés, les forces à rupture prévues sous-estiment la

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009

résistance du matériau et ce, pour tous les matériaux testés. La prise en compte du délaminage sur la tenue de structures sous sollicitation de compression pourra probablement améliorer les résultats.

Toutefois, le domaine de validité de l'approche proposée doit être précisé en appliquant la méthode au cas de plaques perforées présentant des empilements non conventionnels, ou soumises à des chargements plans et hors plan multiaxiaux.

Références

[1] P.P. Camanho, P. Maimi et C.G. Davila. "Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics". *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 13, pp. 2715-2727, 2007.

[2] S.R. Hallett, W.G. Jiang, B. Khan et M.R. Wisnom. "Modelling the interaction between matrix cracks and delamination damage in scaled quasi-isotropic specimens". *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 1, pp. 90-89, 2008.

[3] D. Violeau, P. Ladevèze et G. Lubineau. "Micromodel-based simulations for laminated composites". *Composites Science and Technology*, en ligne.

[4] J.M. Whitney et R.J. Nuismer. "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations". Journal of Composite Materials, Vol. 8, No. 3, pp. 253-265, 1974.

[5] S. C. Tan, "Stress concentrations in laminated composites". *USA Technomic publishing compagny Inc.*, 1994.

[6] F. Laurin, N. Carrere et J.-F. Maire. "A multiscale progressive failure approach for composite laminates based on thermodynamical viscoelastic and damage". *Composites Part A*, Vol. 38, No. 1, pp. 198-209, 2007.

[7] J.-F. Maire. "Etude théorique et expérimentale du comportement de matériaux composites en contraintes planes"*. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté*, 1992.

[8] T. Ishikawa, M. Matsushima et Y. Hayashi. "Hardening non linear behaviour in longitudinal tension of unidirectional carbon composites". *Journal of Materials Science*, Vol. 20, pp. 4075-4083, 1985.

[9] T. Yokozeki, T. Ogasawara et T. Ishikawa. "Nonlinear behavior and compressive strength of unidirectional and multidirectional carbon fiber composite laminates". *Composites Part A*, Vol. 37, No. 11, pp. 2069-2079, 2006.

[10] Z. Hashin. "Failure criteria for unidirectional fiber composites". *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 329-334, 1980.

[11] E.C. Edge. "Does transverse and shear loading affect the compression strength of unidirectional CFC? A reply to Dr Hart-Smith". *Composites*, Vol. 25, No. 2, pp. 159-161, 1994.

[12] J.-F. Maire et J.-L. Chaboche. "A new formulation of continuum damage mechanics (CDM) for composite materials". *Aerospace Science and Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 247-257, 1997.

[13] C. Hochard, N. Lahellec et C. Bordreuil. "A ply scale non-local fibre rupture criterion for CFRP woven ply laminated structures". *Composite Structures*, Vol. 80, No. 3, pp. 321-326, 2007.

[14] M.R. Wisnom et S.R. Hallett. "The role of delamination in strength, failure mechanism and hole size effect in open hole tensile tests on quasi-isotropic laminates". *Composites Part A*, Vol. 40, No. 4, pp. 335-342, 2009.

hal-00388075, version 1 - 26 May 2009