



HAL
open science

Simulation d'impact et effets de l'environnement sur un composite stratifié carbone-époxy Impact simulation and environmental effects on a carbon-epoxy laminated composite

Cheng Chen, Laurent Michel, Frederic Lachaud, Christine Espinosa

► To cite this version:

Cheng Chen, Laurent Michel, Frederic Lachaud, Christine Espinosa. Simulation d'impact et effets de l'environnement sur un composite stratifié carbone-époxy Impact simulation and environmental effects on a carbon-epoxy laminated composite. JNC19, Journées Nationales sur les Composites, Jun 2015, Lyon, France. hal-02052001

HAL Id: hal-02052001

<https://hal.science/hal-02052001>

Submitted on 10 Jun 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.

Simulation d'impact et effets de l'environnement sur un composite stratifié carbone-époxy

Impact simulation and environmental effects on a carbon-epoxy laminated composite

Cheng CHEN, Laurent MICHEL, Frédéric LACHAUD, Christine ESPINOSA

Université Fédérale de Toulouse, ICA (Institut Clément Ader)
ISAE SUPAERO - Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace
10, avenue Edouard Belin, BP 54032 - 31055 Toulouse Cédex 4
e-mail : laurent.michel@isae.fr

Résumé

Une étude du comportement à l'impact du matériau composite fibres de carbone-résine epoxy T800S-M21 a été menée en prenant en compte les effets de deux conditions environnementales: température et humidité. La caractérisation des propriétés mécaniques du pli élémentaire a permis de mettre en place un modèle élasto-plastique du comportement matériau rendant compte des effets observés. Il en a été de même pour le comportement au délaminage qui a été caractérisé en mode I et II. Les effets de l'environnement sur le comportement à l'impact ont alors été évalués. Le modèle matériau identifié par les essais de caractérisation a été implémenté dans le code LS-Dyna dans un modèle numérique mixant éléments cohésifs pour les délaminages interplis et éléments volumique pour les plis. Une stratégie de maillage a été adaptée afin de représenter au mieux les fissures matricielles localisées qui assurent la transition entre la propagation des délaminages entre les couches lors de l'impact. Les résultats des simulations de choc ont été comparés avec succès aux essais expérimentaux en termes de réponse globale, endommagement interne (rupture des fibre, fissures matricielles et délaminage) et indentation. La prise en compte des effets environnementaux est aussi abordée dans la simulation de l'impact.

Abstract

A study of the impact behavior of the carbon fibre/epoxy resin composite material T800S-M21 has been achieved by taking into account 2 environmental factors : temperature and humidity. Several tests have been performed to characterize the mechanical properties of elementary ply and a damage elastoplastic model able to reproduce the observed effects of environment has been proposed. Environmental effects of low velocity impact have been investigated on different laminates. A numerical model has been developed in LS-Dyna with cohesive elements for interply delaminations and volumic meshes for ply modeling. A meshing strategy has been used to best represent localized matrix intraply cracks which govern change of plane of propagation of impact delaminations. Numerical results have been compared with success to experimental results in terms of global response, internal damage: fiber failures, matrix cracking and delamination) and permanent indentation. Effect of environment has also been investigated for impact simulation.

Mots Clés: impact, vieillissement, simulation numérique, endommagement
Keywords: impact, ageing, numerical simulation, damage

1 Introduction

Les chocs à basse vitesse sont très dangereux pour les stratifiés composites, puisque des dommages internes peuvent être générés sans aucune trace de dommage visible en surface des structures [1,2]. L'approche en tolérance aux dommages préconisée par les réglementations de certification applicables aux avions civils (FAR25/CS25) impose donc de vérifier la capacité de la structure à supporter les charges en vol et au sol même en présence de défauts non détectés. Cette évaluation doit prendre en compte les divers effets environnementaux tels que l'humidité, la température,... qui entraînent une réduction des propriétés mécaniques du matériau composite. La compréhension des phénomènes d'endommagement occasionnés par l'impact et la simulation numérique des impacts fait l'objet d'une nombreuse littérature [3-5]. Mais l'investigation des effets de l'environnement: humidité et température sur le comportement à l'impact de stratifiés reste relativement peu explorée [6,7]. Les travaux menés ici ont pour objet de caractériser l'effet de ces conditions environnementales sur le comportement du T800S/M21, de développer un modèle numérique d'impact permettant de reproduire les principaux mécanismes d'endommagement générés par l'impact et d'inclure dans les simulations les effets de l'environnement à partir des données matériaux identifiées par essais élémentaires.

2 Méthodes expérimentales

Dans cette étude trois conditions de vieillissement humide ont été choisies pour les matériaux étudiés: état non vieilli, état vieilli dans un environnement humide à 65% d'humidité relative et état vieilli sous 90% d'humidité relative. Les vieillissements accélérés ont été menés sous enceinte climatique jusqu'à saturation et ont conduit à des taux massique d'absorption de 0.7% et 1.22% pour les conditionnements VH 65% et VH 90% respectivement. Deux températures sont utilisées pour les essais mécaniques d'impact et de caractérisation: 20°C (température ambiante) et 80°C.

Caractérisation du matériau

Cette caractérisation se focalise sur les propriétés mécaniques susceptibles d'être fortement influencées par les effets de l'environnement.

Propriétés du pli: la caractérisation mécanique des propriétés du pli, comprenant les caractéristiques élastiques (E, ν), les résistances à rupture et le comportement non linéaire de cisaillement, est effectué pour différentes conditions environnementales. Les propriétés dominées principalement par le comportement fibre sont étudiées par des essais de compression d'éprouvettes 0°. Les essais de traction effectués sur des drapages 90° et $\pm 45^\circ$ sont destinés à étudier les propriétés dominées par la matrice dans la direction transversale et en cisaillement. Les éprouvettes $\pm 67,5^\circ$ sont utilisées pour l'identification du couplage d'endommagement cisaillement et traction transverse. Une observation des endommagements est effectuée pour les stratifiés $\pm 45^\circ$ et $\pm 67,5^\circ$ afin de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement de ces stratifiés.

Propriétés d'interface: pour les propriétés inter-plis, deux types d'essais sont effectués pour mesurer le taux de restitution d'énergie en mode I et mode II. Pour le mode d'ouverture (mode I), des éprouvettes de type Double Cantilever Beam (DCB) sont préparées. Pour le mode de cisaillement plan (mode II), des éprouvettes de type End Notch Flexure (ENF) sont fabriquées.

Comportement à l'impact basse vitesse

La réponse structurale du matériau T800S/M21 sous choc à basse vitesse est étudiée sur trois types de stratifiés comme indiqué (Tab. 1).

Nom	Stratifié	épaisseur
QI	(90 ₂ /45 ₂ /0 ₂ / - 45 ₂) _S	4mm
FO	(0 ₂ /45 ₂ /90/ - 45 ₂ /0) _S	4mm
IM	(-45/45/0/90/0 ₂ / - 45/45/0) _S	4.5mm

Tab. 1. Plaques stratifiées pour les essais de choc à basse vitesse.

Dispositifs d'essai

Les essais de traction/compression, continus ou cyclés, sont effectués avec une machine d'essai conventionnelle équipée d'un four réglé en température et à une vitesse de chargement de 0,5 ou 1mm/min. Les mesures de déformation sont effectuées avec des jauges de déformation, et/ou par un extensomètre optique. Les essais de choc à faible vitesse sont effectués sur des plaques stratifiés 150mm × 100mm positionnées dans un dispositif de tour de chute disponible à l'ICA, conformément aux préconisations de la norme ASTM-D7136. Les évolutions de la force de contact et de déplacement vertical du centre de plaque sont enregistrées à une fréquence d'acquisition de 1MHz. L'énergie d'impact est égale à l'énergie cinétique de l'impacteur pendant la chute libre sous l'effet de la gravité.

3 Caractérisation du matériau

Propriétés du pli élémentaire

Compression 0°: le comportement de compression sens fibre est linéaire et reste inchangé quelles que soient les conditions de vieillissement et de température. Le module de compression E_{11} ne semble pas être sensible ni au vieillissement humide ni à la température. On observe une réduction de la contrainte à rupture avec l'augmentation d'eau absorbée (Fig. 1.). Une température élevée intensifie

cette dégradation due à l'humidité. Pour la condition la plus sévère, la réduction de contrainte de rupture peut aller jusqu'à 30%.

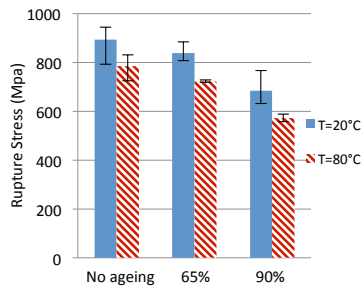


Fig. 1. Contrainte de rupture en compression 0°

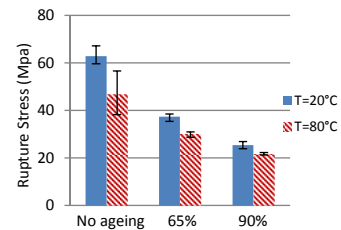


Fig. 2. Contrainte de rupture en traction 90°

Traction 90°: Le module élastique sens travers est légèrement réduit par le vieillissement humide. En revanche, une température d'essai élevée introduit un effet plus prononcé que le vieillissement humide. La contrainte de rupture est très sensible aux différentes conditions environnementales, Fig. 2. Pour une combinaison de vieillissement humide et température élevée, la contrainte de rupture est réduite de 70% par rapport au résultat sans vieillissement et à température ambiante.

Traction ±45°: les comportements contrainte-déformation pour diverses conditions environnementales sont présentés et comparés Fig. 3. Les modules élastiques de cisaillement sont mesurés et présentés Fig. 4. La déformation significative observée (Fig. 3.) est en partie associée à une rotation de fibres et un ré-alignement selon l'axe long. Les contraintes et les déformation du pli sont donc calculées en prenant en compte les effets de rotation de fibre. On observe dans ces courbes contrainte-déformation de cisaillement: un comportement linéaire élastique jusqu'à une certaine limite, puis une zone de transition qui dégrade légèrement le module élastique et finalement un plateau lorsque la contrainte de saturation est atteinte.

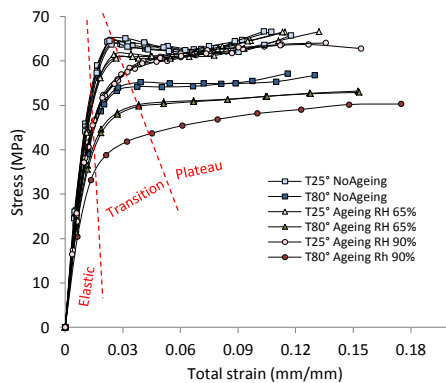


Fig. 3. σ_{12} vs. γ_{12}^{total}

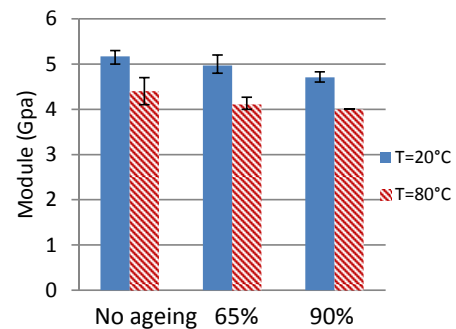


Fig. 4. Modules élastiques dans diverses conditions environnementales

Traction ±67.5°: l'essai de traction sur ±67.5° présente à la fois un chargement de cisaillement et sens travers dans le pli avec des déformations comparables pour les deux chargements. L'identification de dommage d_{12} pour les ±67.5° complète celle réalisée pour les $(\pm 45)_{2s}$.

Propriétés d'interface

Les courbes R identifiées pour le mode I montre un G_{Ic} initialement bas qui se stabilise par la suite. L'effet de vieillissement humide est assez faible sur le G_{Ic} : au maximum de 30% pour les conditions les plus défavorables. Pour le mode II une température élevée entraîne une réduction de G_{IIc} plus sévère que le vieillissement humide mais qui reste bien plus limitée que pour le mode I.

4 Essais d'impact sur stratifiés

Réponse globale de l'impact

Le comportement d'impact QI avec effet de vieillissement humide est illustré pour les énergies d'impact de 15J et 20J sur la Figure 5. La Figure 6 illustre la combinaison du vieillissement humide et de la température d'essai sur la réponse globale d'impact du stratifié QI. Pour ce qui concerne la réponse globale, la force maximale d'impact augmente progressivement avec l'énergie d'impact. Cette force d'impact maximale semble être peu affectée par le vieillissement humide, mais légèrement réduite par la température. Une combinaison de la température et du vieillissement humide ne présente pas d'effet couplé évident sur la force maximale. La durée d'impact n'est pas modifiée par l'énergie d'impact ou par les conditions environnementales imposées. L'effet le plus remarquable est que l'évolution de la force en fonction du déplacement autour de pic de force devient plus raide et que la décharge est plus rapide sous conditions environnementales.

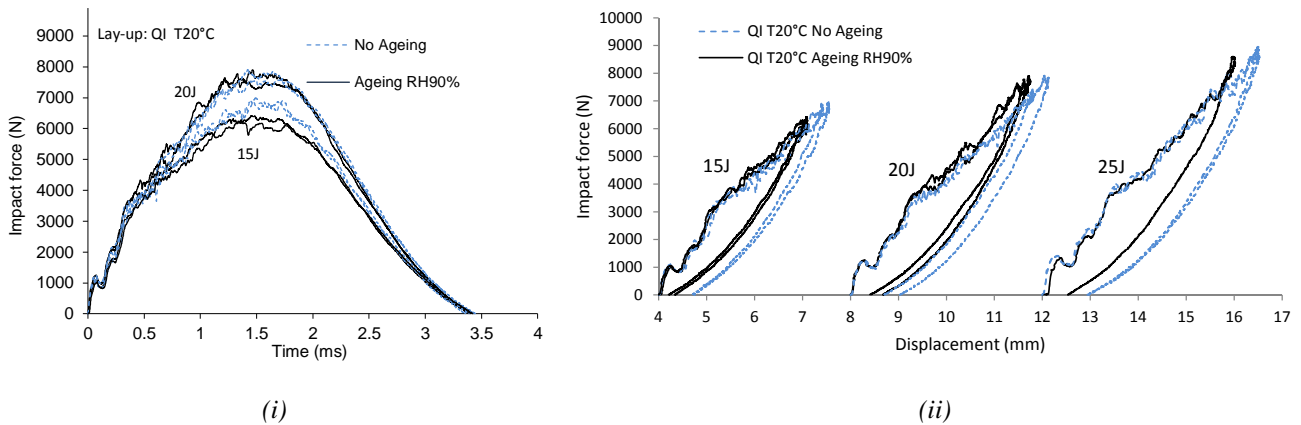


Fig. 5. Réponse d'impacts sur QI [VH90 %- T20°C] (i) F vs. t (ii) F vs. disp.

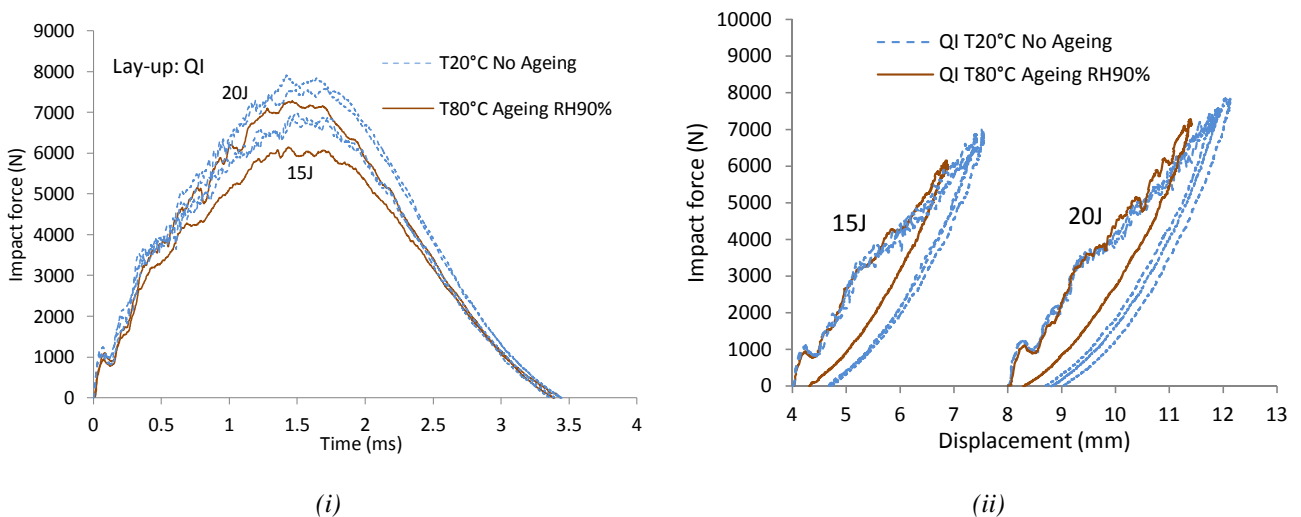


Fig. 6. (QI [T80°C- VH90 %]) (i) F vs. t (ii) F vs. disp.)

Dommmages internes

Un grand nombre de dommages peuvent être générés à l'intérieur des stratifiés par l'impact: rupture de fibre, fissuration matricielle et délaminage. Les observations par contrôle ultra-sons et radiographie aux Rayons X montrent que la taille des délaminages augmente selon l'épaisseur traversé en allant vers le fond de la plaque. L'orientation des délaminages est fortement liée au pli adjacent situé au-dessous de l'interface. La présence de nombreuses fissures matricielles est observée à l'intérieur de

la plaque. La rupture de fibres est également observée dans les plis supérieurs près de la surface impactée.

Effets des conditions environnementales

La répartition de délaminage ne semble pas être modifiée par les conditions environnementales. Cependant, la taille globale projetée des surfaces délaminées est réduite par rapport aux essais standards et ce plus fortement avec la température qu'avec le vieillissement humide. Une observation microscopique des endommagements sur un coupe transversale passant par le centre de plaque a été réalisée pour le stratifié QI pour des conditions environnementales différentes. Un effet du vieillissement humide et de la température est que la taille de la zone conique de fissurations tend à se localiser vers le centre de l'impact. Cette réduction est plus importante dans les plis proches de la surface non impactée que dans ceux qui sont proches de la surface impactée. Les délaminages situés dans les plis situés vers le fond de la plaque bénéficient d'une initiation plus proche du centre grâce aux fissures matricielles 4/5 et 5/6 qui se produisent plus près du centre à cause des effets environnementaux. Malgré une forte variabilité, une température élevée et le vieillissement humide le plus sévère entraîne une réduction de la profondeur d'indentation permanente par rapport aux conditions standard: sans VH et à température ambiante.

5 Modèle numérique du matériau

Les développements sont effectués dans le cadre de la mécanique de l'endommagement continu et notamment des modèles développés par [8,9]. Pour la modélisation des plis, la rupture du pli est simulée via le paramètre d'endommagement d et un comportement adoucissant. En complément une variable d'endommagement d_m est proposée pour représenter la réponse non linéaire de cisaillement et permettre de modéliser ce comportement progressif (cf Fig. 7). Une pseudo-plasticité est intégrée à ce modèle d'endommagement afin de tenir en compte de la déformation résiduelle observée lors des essais de cisaillement. Cette pseudo-plasticité a aussi pour objet de produire la déformée résiduelle de plaque observée après impact: i.e. l'indentation. Une loi de zone cohésive de type bilinéaire de mode mixte est utilisée pour simuler les délaminages créés aux interfaces interplis.

Modèle numérique du pli

La loi constitutive du pli 2D prenant en compte les endommagements d et d_m est écrit comme Exp. 1:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{E_1(1-d_1)}{E_1} & 1 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{E_2(1-d_2)(1-d_m)}{E_2(1-d_2)(1-d_m)} & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}(1-d_4)(1-d_m)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Endommagement pour le comportement adoucissant d : d_1 domine la rupture du pli sens fibre, d_2 and d_4 gèrent la rupture dans le sens transverse et de cisaillement. Ces paramètres d'endommagement sont associés à trois fonctions d'endommagement avec une matrice de couplage définie par Exp. 2:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - \phi_1 \\ 1 - \phi_2 \\ 1 - \phi_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

L'expression de ϕ est défini comme 3 où m est un paramètre du matériau qui domine le comportement adoucissant:

$$\phi_j = 1 - \exp\left(-\frac{1-r_j^m}{m}\right) \quad (r > 1) \quad (j = 1, 2, 4) \quad (3)$$

Trois critères de rupture sont utilisés : mode de rupture des fibres en traction (4), mode de rupture des fibres en compression (5), et mode de rupture de la matrice (6).

$$r_1^2 = \left(\frac{\langle \hat{\sigma}_{11} \rangle}{X_T} \right)^2 + \frac{\hat{\sigma}_{12}^2 + \hat{\sigma}_{13}^2}{S_{FS}^2} \quad (4)$$

$$r_2^2 = \left(\frac{\langle -\hat{\sigma}_{11} + \frac{\langle -\hat{\sigma}_{22} - \hat{\sigma}_{33} \rangle}{2} \rangle}{X_C} \right)^2 \quad (5)$$

$$r_4^2 = \left(\frac{\langle \hat{\sigma}_{22} \rangle}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\langle -\hat{\sigma}_{22} \rangle}{Y_C} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S_{12} + \langle -\hat{\sigma}_{22} \rangle \tan \theta} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{23}}{S_{23} + \langle -\hat{\sigma}_{22} \rangle \tan \theta} \right)^2 \quad (6)$$

Endommagement progressif d_m : L'évolution du dommage de cisaillement identifié lors des essais cyclés de traction des $(\pm 45)_{2S}$ sous différentes conditions environnementales est présenté Fig. 7. Quelles que soient les conditions environnementales, on observe une évolution linéaire après l'initiation du dommage. Ensuite, le dommage suit une loi de type logarithmique. L'intersection de l'évolution logarithmique et de l'axe des abscisses i.e. des contraintes noté σ_{sh} est déterminé pour chaque condition environnementale. L'endommagement d_m est basé selon le cadre défini précédemment; son évolution est fonction d'un critère r_m qui s'écrit comme Exp. 7.

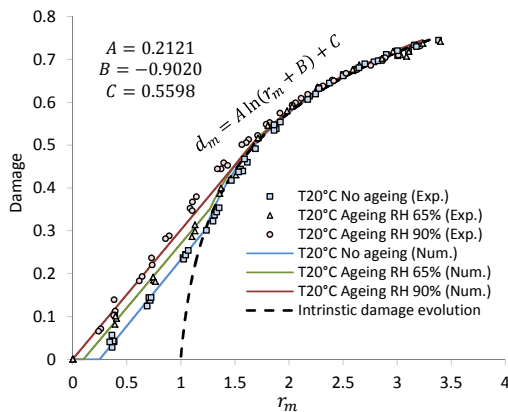
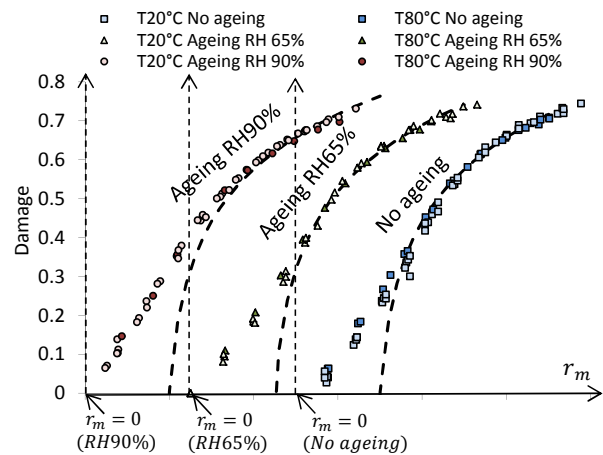
$$r_m^2 = \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{\sigma_{sh}} \right)^2 \quad (7)$$

En introduisant σ_{sh} , l'évolution de l'endommagement de cisaillement est exprimé en fonction de r_m normé par σ_{sh} qui a été identifiée par les essais $(\pm 45)_{2S}$ effectués pour la condition environnementale considérée. Pour les trois cas de conditionnement humide étudiés, il est intéressant de noter que le vieillissement humide affecte seulement la partie d'évolution linéaire après initiation. Le matériau vieilli montre une initiation d'endommagement plus précoce. Lorsque l'endommagement se développe, les trois évolutions linéaires finissent par rejoindre une loi logarithmique unique qu'elles suivent par la suite. Par conséquent, une seule expression peut être identifiée pour les différentes conditions de vieillissement à température 20°C . L'évolution du dommage n'est plus dépendante de la température lorsque il est présenté en fonction de r_m parce que les courbes de dommages entre $T = 20^\circ\text{C}$ et $T = 80^\circ\text{C}$ montrent une très bonne cohérence pour chaque condition de vieillissement humide (Fig. 8). En d'autres termes, l'effet de température sur l'évolution d'endommagement peut être associé à σ_{sh} en gardant la même loi logarithmique identifié à $T = 20^\circ\text{C}$.

d_m s'exprime désormais selon la variable r_m par la fonction définie par deux parties comme Exp 8 où r_{m0} correspond à l'initiation de l'endommagement.

$$d_m = \begin{cases} 0 & (r_{m0} > r_m > 0) \\ \max[(a_1(r_m - r_{m0}), a_2 \ln(r_m + b_2) + c_2)] & (r_m > r_{m0}) \end{cases} \quad (8)$$

Plasticité : La déformation résiduelle mesurée lors des essais de cisaillement est associable aux dommages de la matrice. Il s'agit des phénomènes complexes comprenant le frottement entre les surfaces de fissure, le blocage des débris, etc... Cette déformation résiduelle présente des caractéristiques analogues au comportement plastique. En conséquence, elle est traitée par une loi pseudo-plastique à écrouissage isotrope [10]. Les essais de traction cyclée sur $(\pm 45)_{2S}$ permettent de caractériser la

Fig. 7. d vs. r_m $T = 20^\circ\text{C}$ Fig. 8. d vs. r_m pour les 6 conditions environnementales

déformation résiduelle en fonction de la contrainte effective de cisaillement. La relation en loi puissance entre $\hat{\sigma}_{12}$ et γ_{12}^{plas} a été établie pour diverses conditions environnementales. Le comportement en cisaillement contrainte-déformation a été simulé et comparé avec succès aux résultats expérimentaux.

Modèle d'interface

La modélisation des propriétés d'interface est basée sur une loi cohésive bilinéaire en mode mixtes [10]. L'initiation de dommage est basée sur un critère en contraintes. L'extension de la fissure est définie par un critère quadratique de mode mixte normé aux taux de restitution d'énergie critique.

6 Simulation numérique de l'impact

Le modèle matériau développé dans cette étude est implémenté dans LS-Dyna en tant que loi matériau utilisateur et appliqué pour la simulation d'impact. Les propriétés des matériaux utilisés comme paramètres d'entrée sont celles obtenues à partir des essais de caractérisation [10].

Maillage du système d'impact

Le modèle élément finis du système d'impact comprend l'impacteur, la plaque stratifiée et le support métallique. Des éléments coques 3D sont utilisés pour l'impacteur. Pour le support métallique, des éléments volumiques à 8 noeuds sont utilisés. Un matériau de corps rigide est utilisé pour l'impacteur et le support métallique. Le maillage de la plaque composite stratifié est constitué d'éléments volumiques utilisés pour les plis et d'éléments cohésifs pour l'interface entre les plis adjacents qui ont des orientations de plis différentes. Les éléments volumiques des plis sont configurés de sorte que leurs bords soient alignés avec la direction des fibres du pli afin de reproduire une propagation correcte des fissures matricielles localisées que l'on observe dans les dommages d'impact. Pour les plis 0 et 90, des éléments hexaédriques sont donc utilisés avec leurs directions de bord alignées avec les dimensions de la plaque d'essai. Pour les plis 45 et -45, des éléments pentaédriques sont utilisés. Leurs surfaces supérieures et inférieures dans le plan du pli sont des triangles. Pour maintenir la connectivité de maillage avec les plis à 0 et 90, deux bords du triangle sont alignés sur les directions 0 et 90. Le troisième bord est aligné sur l'orientation du pli. Des éléments cohésifs d'épaisseur nulle sont utilisés pour l'interface entre les plis. Des éléments cohésifs triangles sont utilisés si l'un des plis adjacents est à 45 ou -45 degrés. Des conditions de contact sont imposées entre d'une part l'impacteur et le stratifié, et d'autre part le stratifié et le support. La Figure 9 montre le modèle EF de l'essai d'impact pour un stratifié du type QI.

Une étude de sensibilité de maillage a été faite afin de déterminer la taille suffisante des éléments permettant d'obtenir un résultat stabilisé en termes de réponse globale à l'impact. Le côté des éléments dans le plan de la plaque stratifiée est de 1mm, leur épaisseur correspond à l'épaisseur d'un pli élémentaire. Une zone de 80mm \times 80mm au centre de la plaque est définie pour une méthode

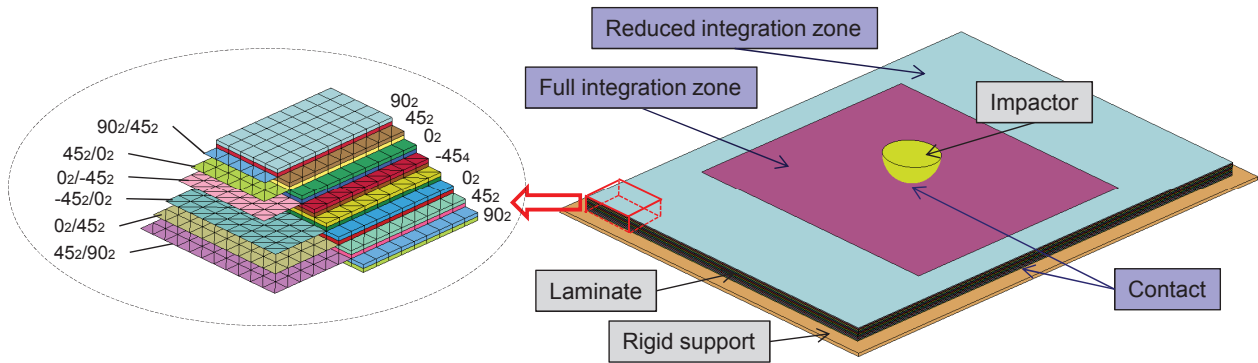


Fig. 9. Stratégie de maillage pour stratifié (QI)

d'intégration à 8 points de Gauss qui permet d'avoir une représentation plus précise des contraintes dans les plis. En dehors de cette zone, l'intégration numérique est basée sur 1 point de Gauss.

Résultats des simulations

La simulation numérique d'impact sur stratifiés QI sans vieillissement à température ambiante est tout d'abord présentée. Les propriétés des matériaux utilisés comme paramètres d'entrée dans le modèle de matériel et les paramètres numériques sont détaillées dans la thèse [10].

Réponse globale: Dans les figures 10-i and 10-ii, l'évolution de la force et du déplacement en fonction de temps, pour un impact 20J, sont présentés et comparés avec les données expérimentales. Globalement, la force est en bon accord avec les résultats expérimentaux, malgré une force maximale un peu surestimée (7%). En termes de durée du contact, les courbes simulées montrent une bonne cohérence avec les expériences. Le déplacement maximal dans la simulation est en bon accord avec les mesures. La force vs. déplacement est également cohérente entre la simulation et l'expérimentation (Fig. 10).

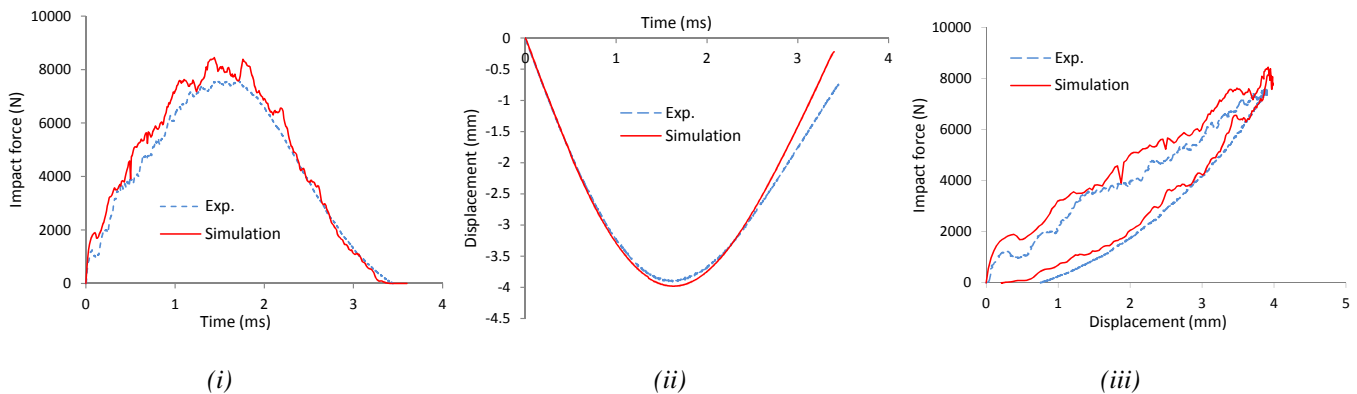


Fig. 10. Prédiction de réponse globale d'impact [Non vieilli 20°C] impacté par 20J (i) Force vs. temps (ii) Déplacement vs. temps (iii) Force vs. déplacement

Délaminages et fissures matricielles: La surface délaminée entre les plis est représentée par les éléments cohésifs dont l'endommagement a atteint $d = 1$. Les fissures matricielles sont représentées par les zones où $d_2 = 0.95$. La surface délaminée prédite pour chaque interface montre des orientations spécifiques. Elle est fortement associée à la direction du pli adjacent inférieur, Fig. 11-i. La légende de couleurs présentée Fig. 11-ii indique la coordonnée d'interface dans l'épaisseur de la plaque stratifiée. La taille de la zone délaminée augmente au fur et à mesure que l'interface se rapproche du fond de la plaque, opposée à l'impact. Ce phénomène a été identifié dans l'étude expérimentale des dommages d'impact. La figure 11-iii montre le résultat de la cartographie des délaminages obtenue par contrôle ultrason. Malgré une taille globale des délaminages légèrement surestimée, la forme et la direction des délaminages et leur répartition dans l'épaisseur sont bien prédits.

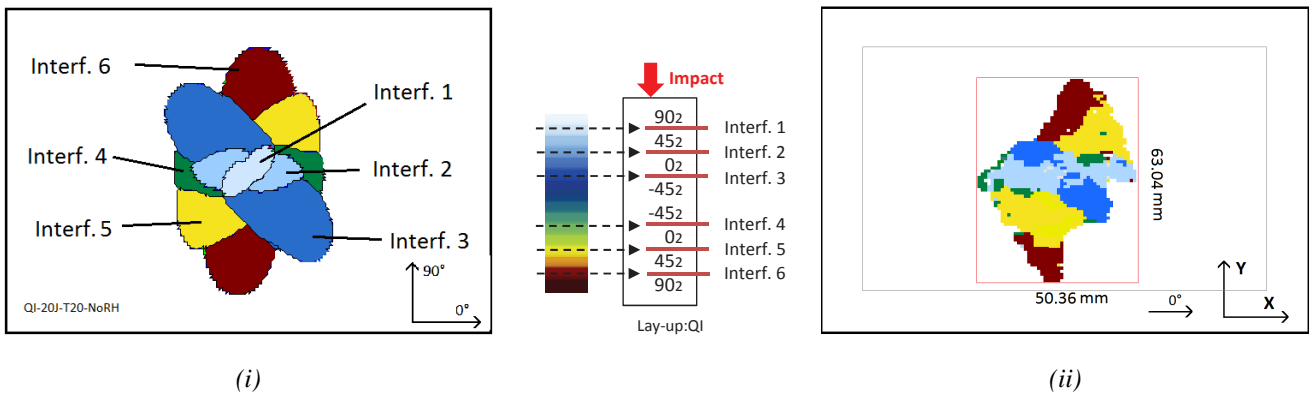


Fig. 11. Comparaison des délaminages entre num. et exp. [Non vieilli $T20^{\circ}\text{C}$] 20J (i) num. (ii) exp.

Les fissures matricielles sont superposées et représentées dans la Figure 12-i. La rupture de matrice dans les plis se produit dans des zones localisées formant des fissures matricielles bien distinctes qui sont toujours orientées dans le sens de la fibre. Cela confirme donc le choix judicieux de la stratégie de la maillage adaptée à la direction des plis. Pour comparaison le cliché radiographique d'endommagement pour un QI impacté est présenté Fig. 12-ii qui souligne le bon accord modèle/essais.



Fig. 12. Comparaison des fissures matricielles entre num. et exp. [Non vieilli $T20^{\circ}\text{C}$] 20J (i) num. (ii) exp.

Interaction entre délaminage/fissures matricielles et déformée résiduelle de la plaque: La transition de propagation des délaminages de l'interface supérieure à l'interface inférieure est dominée par les fissures matricielles. Ce mécanisme de dommage d'impact est bien représenté dans les simulations numériques. La déformée résiduelle de la plaque est obtenue grâce à l'intégration de la plasticité de cisaillement dans le modèle matériau. En conséquence, certains délaminages sont maintenus ouverts après impact, ce qui est cohérent avec les micrographies des sections de plaques impactées. De même l'indentation permanente est correctement simulée: 0.23 mm numériquement pour 0.2mm expérimentalement.

Rupture de fibres: La rupture de fibres est évaluée dans la simulation par d_1 . Elle apparaît dans les premiers plis 90° ; elle est due à une contrainte de compression dans les plis supérieurs sous flexion du stratifié. La longueur totale de cette fissure de rupture de fibre est comparable à celle observée sur l'éprouvette impactée.

La modélisation d'impact sous effets environnementaux a été réalisée pour le cas plus sévère [vieilli RH90% $T = 80^{\circ}\text{C}$]. Les propriétés du matériau utilisés sont celles issus des essais de caractérisation réalisés [10]. La prédiction d'impact pour le matériau vieilli à température élevée montre une certaine cohérence pour ce qui concerne l'évolution de la force: réduction de la force maximale. Concernant les dommages internes, la prédiction des délaminages et de la fissuration matricielle dans les plis inférieurs est moins cohérente que pour les plis supérieurs. Cela est vraisemblablement lié à une

diffusion des fissures matricielles dans les plis inférieurs qui n'arrivent pas à transférer le délaminage de l'interface supérieure à l'interface inférieure dans la modélisation numérique.

7 Conclusion

La caractérisation des propriétés mécaniques du pli élémentaire du carbone-époxy T800S-M21 a montré une forte dégradation des caractéristiques à rupture en traction sens travers et en compression sous l'effet de la température et de l'humidité. Le comportement endommagé en cisaillement caractéristique de ce matériau en est lui-aussi fortement influencé. La résistance à la propagation de délaminage en mode I est dégradée; l'abattement en mode II étant plus modeste. Un modèle élasto-plastique du comportement matériau a été mis en place avec un endommagement pour gérer la rupture des plis et un autre pour représenter le comportement non linéaire en cisaillement et prendre en compte les effets environnementaux. Leurs effets sur le comportement à l'impact se limitent à une réponse globale à l'impact légèrement modifiée et une plus faible surface délaminée projetée liée à un resserrement du cône classique du réseau des fissurations matricielles. Le modèle matériau identifié a été implémenté dans le code LS-Dyna dans un modèle numérique mixant éléments cohésifs et éléments volumique. La stratégie de maillage adoptée a permis de bien représenter les fissures matricielles localisées qui assurent la transition entre les couches lors de la propagation des délaminages d'impact. Les simulations de choc sont donc très satisfaisantes que ce soit en termes de réponse globale, d'endommagement interne (rupture des fibre, fissures matricielles et délaminage) ou d'indentation. La prise en compte des effets environnementaux dans la simulation de l'impact à partir des données identifiées lors des essais de caractérisation sur coupons élémentaires a été abordée et doit être poursuivie.

References

- [1] S. ABRATE, Impact on Composite Structures. *Cambridge university press*, 2005.
- [2] W.J. CANTWELL J. MORTON, The impact resistance - a review. *Composites*, Vol. 22, no 5, pp. 347-362, 1991.
- [3] Gao DAVIES and Z. ZHANG, Impact damage prediction in carbon composite structures. *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 16, no 1, pp. 149-170, 1995.
- [4] E-H KIM, M-S RIM, I. LEE T-K HWANG, Composite damage model based on continuum damages mechanics and low velocity impact analysis of composite laminates *Composites Structures*, Vol. 95, pp. 123-134, 2013.
- [5] F. LACHAUD, C. ESPINOSA, L. MICHEL, P. RAHME R. PIQUET, Modelling strategies for simulating delamination and matrix cracking in composite laminates. *Applied Composites Materials*, DOI: 10.1007/s10443-014-9413-4 , 2014.
- [6] Y. AOKI, K. YAMADA T. ISHIKAWA, Effects of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates. *Composites Sciences and Technology*, Vol. 68, no 6, pp. 1376-1383, 2008.
- [7] K.H. IM, C-S. CHA, S-K KIM I-Y YANG, Effects of temperature on impact damages in CFRP laminates. *Composites Part B Engineering*, Vol. 32, no 8, pp. 669-682, 2001.
- [8] A. MATZENMILLER, J. LUBLINER R.L. TAYLOR, A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. *Mechanics of Materials*, Vol. 20, no 2, pp. 125-152, 1995.
- [9] M. ILYAS, Damage modeling of carbon epoxy laminated composites submitted to impact loading. *PhD Thesis*, Université de Toulouse, ISAE 2010.
- [10] C. CHEN, Investigation of environmental effects on impact damage tolerance of composite laminates *PhD Thesis*, Université Fédérale de Toulouse, ISAE 2015.