



**HAL**  
open science

## Analyse de l'amortissement en fatigue cyclique des matériaux sandwichs endommagés par fissuration

M. Idriss, Abderrahim El Mahi, Rachid El Guerjouma

► **To cite this version:**

M. Idriss, Abderrahim El Mahi, Rachid El Guerjouma. Analyse de l'amortissement en fatigue cyclique des matériaux sandwichs endommagés par fissuration. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.150. hal-00597484

**HAL Id: hal-00597484**

**<https://hal.science/hal-00597484>**

Submitted on 1 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.

# Analyse de l'amortissement en fatigue cyclique des matériaux sandwichs endommagés par fissuration

## *Damping analysis in cyclic loading of sandwich beams with debondings*

M. Idriss, A. El Mahi et R. El Guerjouma

LAUM : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine  
LAUM UMR CNRS 6613 Av. Olivier Messiaen 72085 LE MANS cedex 9 France  
E-Mail : idriss.moustapha.Etu@univ-lemans.fr, Abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr  
rachid.el\_guerjouma@univ-lemans.fr

### Résumé

L'objet de ce présent travail est d'analyser les effets de l'endommagement de type décohésion sur le comportement en fatigue cyclique du matériau sandwich. Le matériau considéré dans cette étude est constitué de stratifiés à fibres de verre et de résine époxyde de type  $[0_2/90_2]_S$  pour les peaux et d'une mousse en PVC de masses volumiques 60 et 100  $\text{kg/m}^3$  pour l'âme. Les essais de fatigue cyclique sont menés en flexion 3-points et sont conduits en contrôlant le déplacement. Les effets de la longueur de fissure de type décohésion sur la boucle d'hystérésis et sur l'amortissement ont été étudiés pour différents nombres de cycles. L'analyse des résultats obtenus montre que les cycles d'hystérésis et l'amortissement sont sensibles à la longueur de la fissure et au nombre de cycles de fatigue.

### Abstract

The aim of this study is to analyse the damping in cyclic loading of sandwich materials with debonding. These sandwich composites consists of two thin faces composed of glass fibre and epoxy resin bonded to light weight and weaker core material. The tests were conducted in cyclic fatigue in 3-point bending with various debonding length. The effects of debonding variable length on the hysteresis loops and loss factor were studied for various numbers of cycles during cyclic fatigue tests. The results show that the hysteresis loop and damping are sensible to debonding length and cyclic numbers of fatigue.

**Mots Clés :** composite, sandwich, fatigue, cycles d'hystérésis, amortissement.

**Keywords:** composite, sandwich, cyclic fatigue, hysteresis loops, damping.

## 1. Introduction

Les matériaux composites sandwichs résultent, généralement de l'association de deux semelles ou peaux, de faibles épaisseurs, constituées de matériaux de haute résistance et haut module, d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible masse volumique. Ces structures complexes offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des domaines divers. Nous pouvons songer à des applications structurales classiques pour lesquelles il faut allier légèreté et rigidité, comme l'industrie aéronautique, ou généralement le transport. Leur résistance à la corrosion, quand les divers constituants ne sont pas métalliques, a fait des matériaux sandwichs, un matériau de choix pour la construction navale. Dans le cas où les matériaux sandwichs sont sollicités en flexion, l'endommagement se manifeste par la décohésion entre la peau et l'âme, délaminage des peaux et fissuration par cisaillement de l'âme. Les propriétés mécaniques des matériaux sandwichs peuvent être sévèrement dégradées par la présence de cet endommagement. Il peut survenir à la suite de répercussion du mouvement des vagues sur les coques des bateaux ou bien par l'influence des vibrations des ailes des avions à la rencontre d'un trou d'air dans l'espace. Il peut aussi survenir à la suite des imperfections dans le processus de fabrication [1], soit résulter des charges externes au cours de la vie d'opération, comme l'impact par des objets étrangers [2], soit encore résulter par la capacité d'absorption d'eau des âmes cellulaires [3].

Farooq et al. [4-7] ont fait une étude comparative du comportement de trois matériaux sandwichs constitués de peaux en stratifiés à fibres de verre et d'une âme en mousse PVC de différentes densités. Lors de la sollicitation en flexion de ces matériaux sandwichs, la décohésion (décollement) entre la peau et l'âme est l'un des modes d'endommagement observé par ces auteurs dans le cas des essais de fatigue. Ils ont montré que la présence de la décohésion affecte le comportement en statique et en dynamique du matériau sandwich. Samirkumar et al [8] ont étudié les effets des températures de 22°C à -60°C sur le comportement en fatigue oligocyclique en flexion des structures sandwichs. Ils ont utilisé l'amortissement comme paramètre de suivi du comportement de ces matériaux en fonction de la température et du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement. Bezazi et al. [9] ont utilisé le cycle d'hystérésis pour étudier le comportement d'une mousse polyuréthane et d'une mousse auxétique (coefficient de poisson négatif) en traction. Ces essais se sont déroulés en fatigue cyclique. Ils ont montré que l'aire intérieure du cycle d'hystérésis diminue lorsque le nombre de cycles augmente. L'analyse des résultats obtenus montre que cette aire est importante dans la mousse auxétique que la mousse polyuréthane. Hacker et al. [10] ont aussi utilisé le cycle d'hystérésis pour analyser le comportement des stratifiés en bois/époxy. Ces stratifiés ont été soumis à des essais de fatigue cyclique en traction, en compression et en chargement inverse, en contrôlant la force. Des cycles d'hystérésis ont été capturés au cours des essais. L'aire intérieure du cycle d'hystérésis augmente avec le nombre de cycles. Dharan et al. [11] ont étudié le comportement d'un stratifié à fibres de verre/époxy avec une entaille de forme circulaire au centre de l'éprouvette. Ce stratifié a été soumis à des essais de fatigue cyclique en traction, en contrôlant la force pour cinq niveaux de chargement. Les auteurs ont constaté que l'énergie dissipée décroît avec la diminution du niveau de chargement et avec l'augmentation du nombre de cycles. Zhang et al [12] ont déterminé l'amortissement à partir des essais de fatigue cyclique d'un matériau composite unidirectionnel. Ils ont montré que l'amortissement dépend du nombre de cycles.

L'objet de ce présent travail est d'analyser les effets de l'endommagement de type décohésion sur le comportement en fatigue cyclique du matériau sandwich. L'endommagement de l'éprouvette sandwich sera caractérisé par la progression d'une fissure à l'interface entre la peau et l'âme, initiée au centre de l'éprouvette. La rigidité, les cycles d'hystérésis ainsi que l'amortissement seront déterminés en fonction de la longueur de fissure au cours de la fatigue cyclique du matériau.

## 2. Matériaux

Le matériau sandwich utilisé dans le cadre de ce travail est constitué de stratifiés à fibres de verre disposés en  $[0_2/90_2]_s$  et de résine époxyde de type SR1500/SD2505 pour les peaux et de deux mousses PVC de masse volumique 60 et 100 kg/m<sup>3</sup> pour l'âme. Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre, de la résine époxyde et de deux mousses sont données respectivement dans les tableaux 1, 2 et 3.

Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )	300
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	2500
Déformation à la rupture (%)	4.8
Module de Young (GPa)	74
Module de cisaillement (GPa)	30
Coefficient de Poisson	0.25

Tab. 1. Caractéristiques des fibres de verre

Module d'Young (MPa)	2900 à 3200
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	74 to 77
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	115 to 120

Tab. 2. Caractéristiques de la résine époxyde

Propriétés	C 70.55	C 70.90
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	60	100
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	1.3	2.6
Contrainte à la rupture en compression (MPa)	0.9	2
Contrainte à la rupture en cisaillement (MPa)	0.8	1.6
Déformation à la rupture en cisaillement (%)	20	30
Module d'Young en traction (MPa)	45	80
Module d'Young en Compression (MPa)	58	110
Module de cisaillement (MPa)	22	38

Tab. 3. Caractéristiques de l'âme

La mise en œuvre du matériau sandwich est réalisée par moulage sous vide en utilisant la technique dite du sac. Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide (dépression 30 kPa) pendant 10 heures entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de démoulage. Les éprouvettes sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir de plaques 300mmx300mm selon la norme ASTM D790. Les dimensions des éprouvettes sont indiquées dans le tableau 4.

Epaisseur de l'âme $e_a$ (mm)	20
Epaisseur de la peau $e_p$ (mm)	3
Longueur L (mm)	300
Largeur b (mm)	40

Tab. 4. Dimensions de l'éprouvette sandwich

### 3. Procédure expérimentale

Les essais ont été effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle type INSTRON modèle 8801 de 100 kN de capacité, dont le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur. Ces essais ont été menés en flexion trois points avec une distance entre appuis de 250 mm. Les essais statiques ont été effectués avec une vitesse de déplacement de 5 mm/min. Les essais de fatigue ont été effectués en contrôlant le signal déplacement, la forme d'onde est sinusoïdale avec une fréquence de 5 Hz. Un déplacement moyen de 3 mm et une amplitude de 2 mm ont été imposés.

Cinq éprouvettes au moins ont été testées en statique jusqu'à la rupture. Ensuite, trois éprouvettes au moins ont été testées en fatigue jusqu'à la rupture des deux matériaux sandwichs. Enfin des éprouvettes avec une fissure de 2 cm, initiée entre l'âme et la peau à l'aide d'un fil de fer aplati, ont été testées en fatigue cyclique jusqu'à 5000 cycles. La fissure est ensuite augmentée avec un pas de 2 cm jusqu'à la rupture totale des éprouvettes (figure 1).

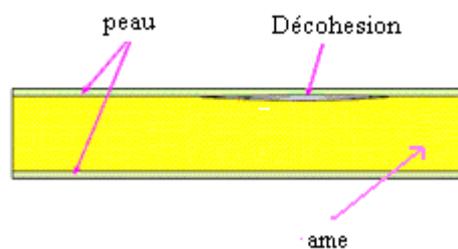


Fig. 1. Poutre sandwich avec une décohésion

## 4. Résultats

### 4.1 Résultats du matériau sandwich sain

La figure 2 représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les deux types de matériaux sandwichs. L'analyse de ces résultats montre que le comportement des deux sandwichs est d'abord linéaire suivi d'une partie non linéaire. La non linéarité du sandwich avec une âme de densité de  $60 \text{ kg/m}^3$  est beaucoup plus marquée que le sandwich avec une âme de densité de  $100 \text{ kg/m}^3$ . Nous constatons aussi que le déplacement et la charge à la limite de la partie linéaire du sandwich avec une âme de  $100 \text{ kg/m}^3$  sont supérieurs à ceux du sandwich avec une âme de  $60 \text{ kg/m}^3$  de densité.

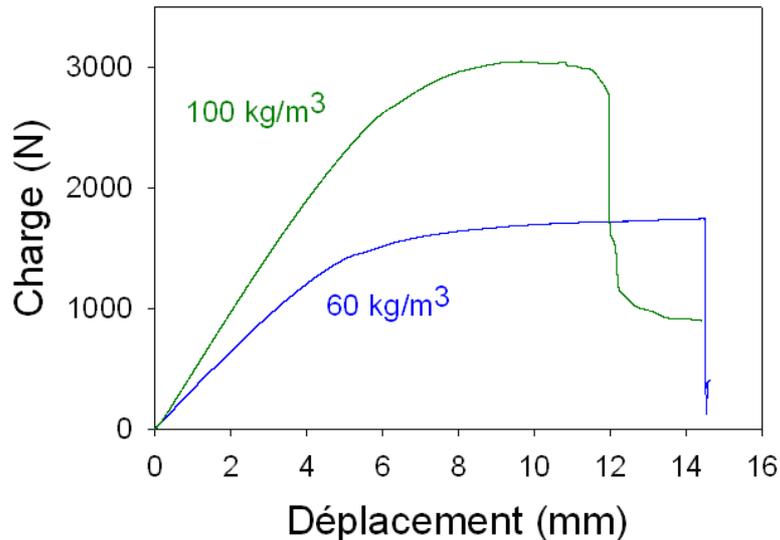


Fig.2 Courbe charge déplacement des éprouvettes sandwich avec une âme de 60 et de  $100 \text{ kg/m}^3$  de densités.

La figure 3 donne les résultats des essais de fatigue des deux matériaux sandwichs. Elle représente l'évolution de la charge maximale en fonction du nombre de cycles de fatigue. La charge maximale  $F_{\max}$  est rapportée à celle obtenue dans le premier cycle  $F_{0\max}$ .

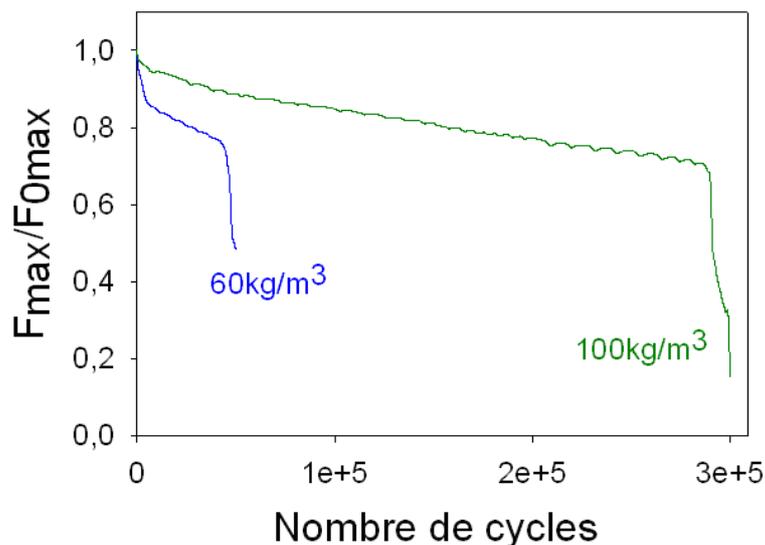


Fig.3 Evolution de la charge maximale ( $F_{\max}/F_{0\max}$ ) en fonction du nombre de cycle pour le sandwich avec une âme de densités de 60 et de  $100 \text{ kg/m}^3$

La perte de la charge jusqu'à la rupture des éprouvettes se déroule en trois phases. Dans un premier temps se manifeste une diminution brutale dès les premiers cycles, qui correspond à la dégradation des couches transverses les peaux du sandwich. La diminution devient ensuite très lente dans la deuxième phase, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette, cette phase est associée à l'initiation et la propagation de la décohésion entre la peau et l'âme en contact avec l'appui central. Cette fissure est initiée assez rapidement dans le sandwich avec une âme de masse volumique  $60 \text{ kg/m}^3$  et sa propagation se fait rapidement que dans le sandwich avec une âme de masse volumique de  $100 \text{ kg/m}^3$ . Enfin dans la troisième phase qui est très courte, la perte de charge s'accélère brutalement jusqu'à la rupture de l'éprouvette entraînée par la rupture de la peau supérieure et de l'âme. Le matériau sandwich constitué d'une âme de masse volumique de  $100 \text{ kg/m}^3$  a une bonne résistance à la fatigue en flexion trois-points.

## 4.2 Cycle d'hystérésis

Au cours des essais de fatigue, 200 points expérimentaux au moins sont enregistrés pour chaque cycle. Les cycles d'hystérésis sont ensuite obtenus à partir des données expérimentales de la charge et du déplacement en fonction du temps. A titre d'exemple, nous avons reporté dans les figures 4 et 5, l'évolution du cycle d'hystérésis en fonction de la longueur de fissure pour différents cycles et pour les deux types de sandwichs. La force maximale représentée par le pic de la courbe force-déplacement diminue avec l'augmentation de la longueur de la fissure et le nombre de cycles. La diminution de la force maximale est importante dans l'éprouvette ayant une longueur de fissure 8 cm. Cette diminution est due à la diminution de la rigidité. La réduction de la rigidité est gouvernée par la dégradation des cellules constituant l'âme du sandwich.

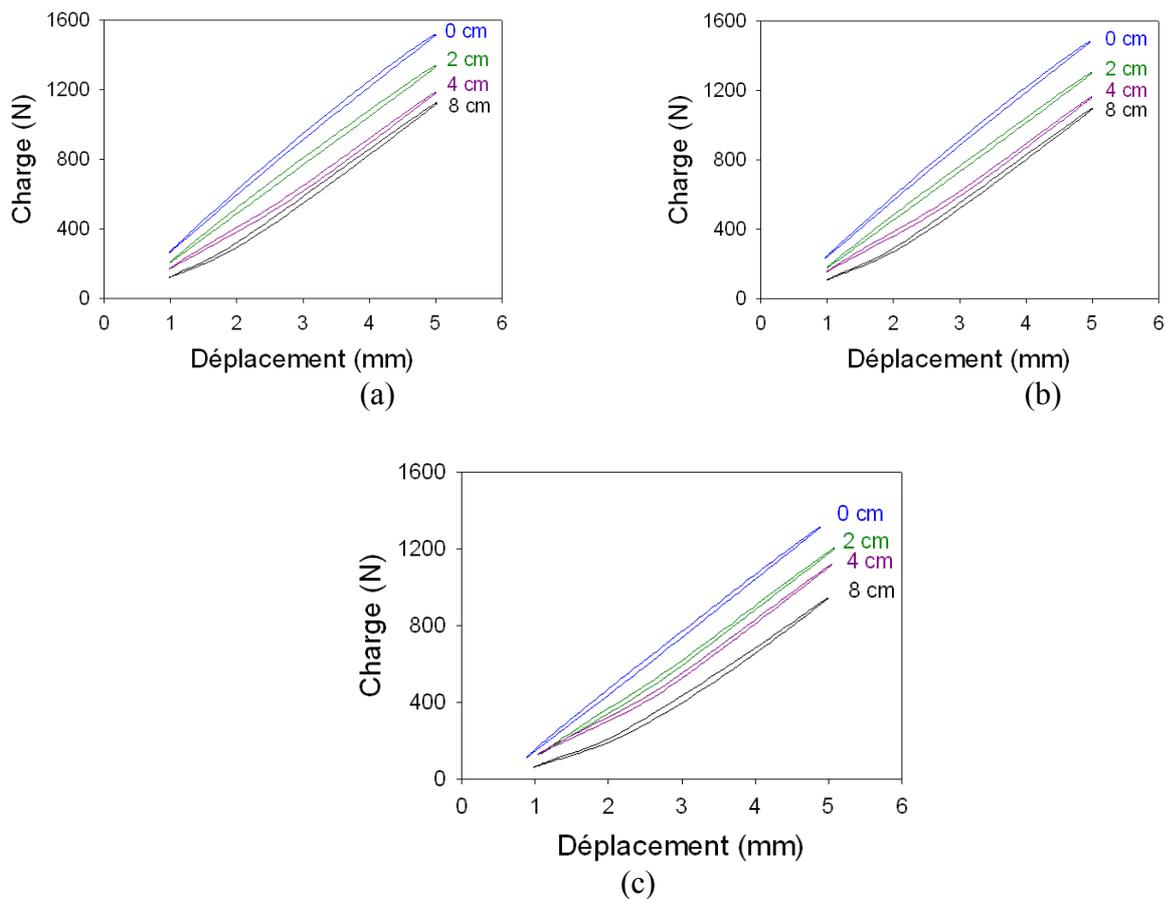


Fig.4 Cycles d'hystérésis en fonction de la longueur de fissure d'une éprouvette sandwich avec une âme de densité  $60 \text{ kg/m}^3$  pour : a) 10 cycles, b) 100 cycles et c) 5000 cycles

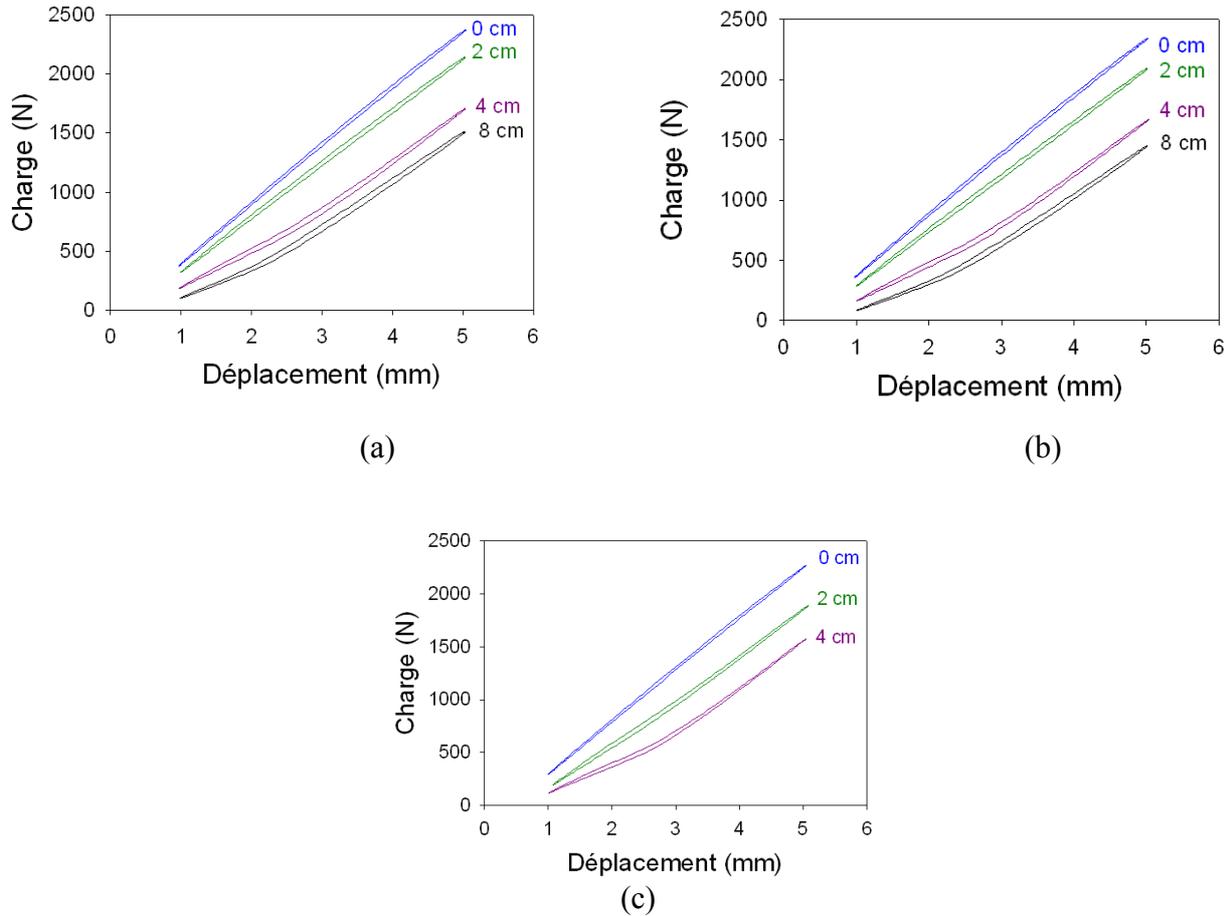


Fig.5 Cycles d'hystérésis en fonction de la longueur de fissure d'une éprouvette sandwich avec une âme de densité  $100 \text{ kg/m}^3$  pour : a) 10 cycles, b) 100 cycles et c) 5000 cycles

Tous les cycles d'hystérésis présentent une topologie quasi elliptique. La rupture est atteinte avant les 5000 cycles pour l'éprouvette sandwich ayant une longueur de fissure 8 cm (fig.5c). Avec l'augmentation de la longueur de fissure, nous observons une distorsion du cycle d'hystérésis, la distorsion devient importante à 5000 cycles (fig. 4.c et 5.c). La distorsion du cycle d'hystérésis montre que la réponse dynamique des matériaux sandwich avec une fissure lors du chargement est différente de la réponse lors du déchargement.

L'aire intérieure engendrée par ces courbes représente l'énergie dissipée au cours du cyclage. Cette énergie par unité de volume est donnée par la relation suivante :

$$E_d = \int_{\epsilon_{\min}}^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon \quad (\text{Eq. 1})$$

Les figures 6 présentent respectivement l'évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles des deux matériaux sandwichs ( $60$  et  $100 \text{ kg/m}^3$  de densités) et pour différentes longueurs de fissure (0 cm, 2cm, 4 cm et 8 cm). L'énergie dissipée diminue lorsque le nombre de cycles augmente. Cette diminution est très importante dans les premiers cycles, et devient pratiquement constante pour un nombre de cycles important. Au début du cyclage, la déformation des cellules de l'âme à l'interface peaux/âme du sandwich se fait de manière réversible, ensuite les parois des cellules commencent à s'endommager permettant ainsi l'évacuation de l'air enfermée à l'intérieur des cellules. Au bout de quelques centaines de cycles les cellules à l'interface sont complètement écrasées et l'âme à cet endroit du sandwich se comporte comme un solide non poreux. L'énergie dissipée dépend aussi de la densité de l'âme du sandwich. Pour un nombre de cycles donné, l'énergie dissipée par le sandwich avec l'âme la plus dense est plus élevée que celle du sandwich avec l'âme la moins dense. La diminution de l'énergie dissipée au début de cyclage est beaucoup

plus prononcée dans le sandwich avec l'âme la plus dense ( $100 \text{ kg/m}^3$ ). Au bout de quelques dizaines de cycles l'énergie dissipée est devenue pratiquement constante pour le sandwich avec une âme de faible densité, alors qu'elle continue à diminuer dans l'autre cas. L'écrasement des cellules à l'interface peaux/âme se fait plus facilement dans le sandwich avec âme de faible densité que celle à haute densité.

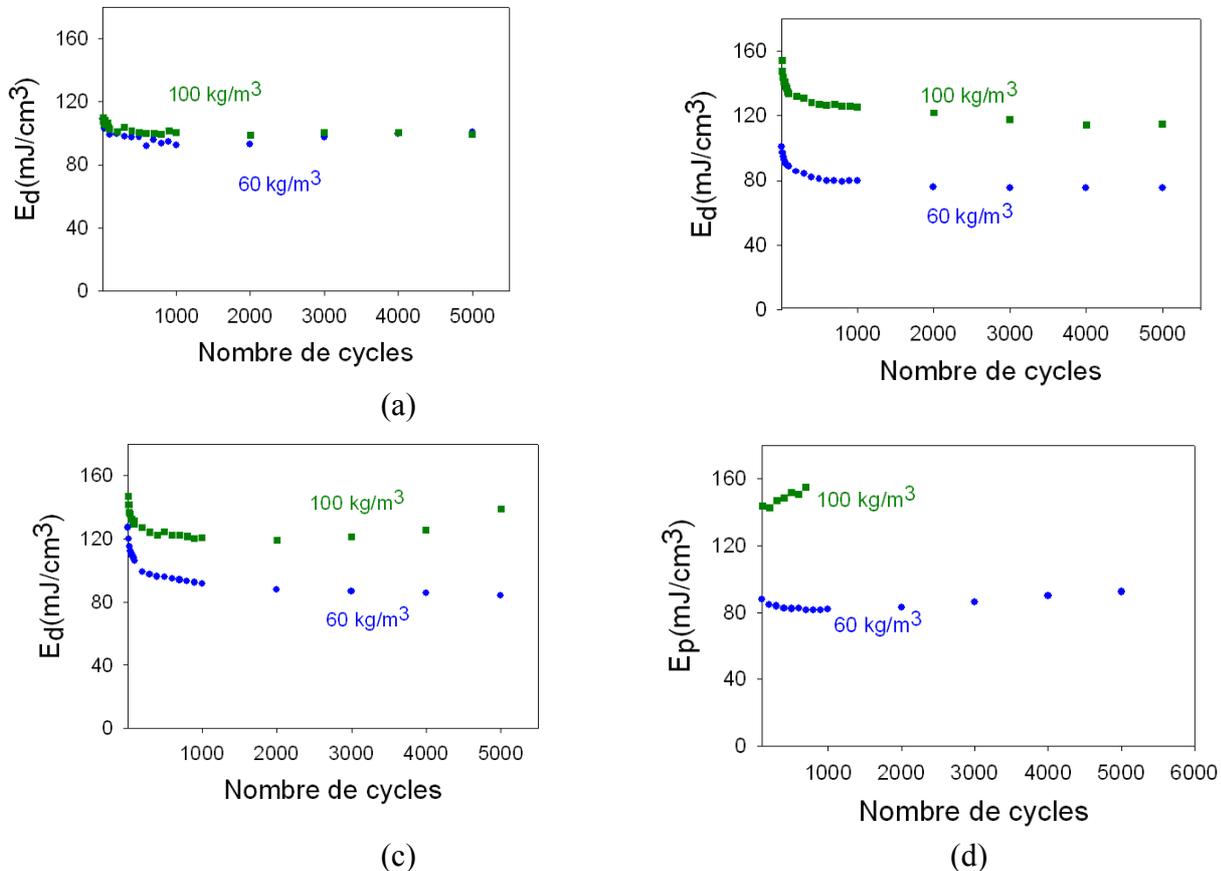


Fig.6 Energie dissipée dans les éprouvettes sandwichs (âme de densité 60 et  $100 \text{ kg/m}^3$ ) avec une longueur de fissure : a) 0 cm, b) 2 cm, c) 4 cm et d) 8 cm

### 4.3 Amortissement

L'aire sous la partie supérieure du cycle d'hystérésis représente l'énergie potentielle maximale. Pour évaluer l'amortissement (le facteur de perte), l'énergie dissipée par cycle se compare à l'énergie potentielle maximale :

$$\eta = \frac{E_d}{2\pi E_p} \quad (\text{Eq. 2})$$

Les figures 7 représentent l'évolution de l'amortissement en fonction du nombre de cycles pour plusieurs longueurs de fissures. Ce résultat montre une augmentation de l'amortissement avec l'augmentation de la longueur de fissure. Pour une longueur de fissure donnée, l'amortissement est pratiquement constant dans les premiers cycles de fatigue, la déformation des cellules de l'âme à l'interface peaux/âme du sandwich se fait de manière réversible. Lorsque le nombre de cycles de fatigue augmente, l'amortissement augmente, dans ce cas les parois des cellules commencent à s'endommager permettant ainsi l'évacuation de l'air enfermée à l'intérieur des cellules. Pour une longueur de fissure et un nombre de cycles donnés, l'amortissement dépend de la densité de l'âme du sandwich. L'amortissement du sandwich avec une âme plus dense est plus élevé que celui du sandwich avec une âme moins dense. La densité de l'âme joue un rôle important sur la propagation de fissure, la résistance ainsi que sur la durée de vie de ces matériaux. Une décohésion à l'interface peaux/âme réduit rigoureusement la résistance et la durée de vie du sandwich.

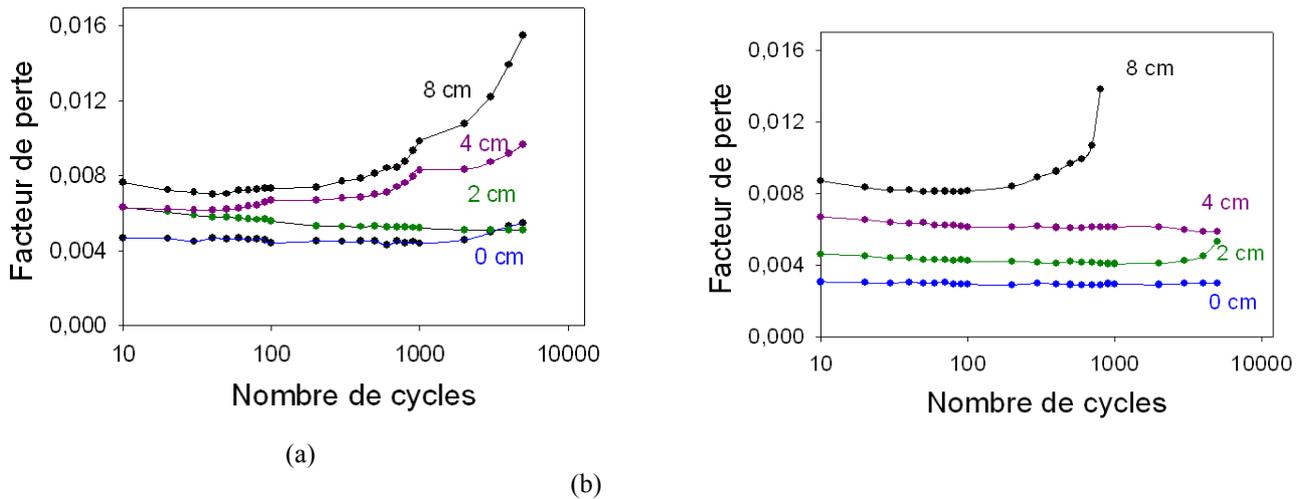


Fig.7 Evolution du facteur de perte en fonction du nombre de cycle pour différentes longueurs de fissure d'un matériau sandwich avec une âme de densité: a)  $60 \text{ kg/m}^3$  et b)  $100 \text{ kg/m}^3$

## 5. Conclusion

Le travail s'intéresse à l'étude du comportement en fatigue cyclique, en flexion 3-points de matériaux sandwichs avec une fissure de type décohésion de longueur variable entre l'âme et la peau. Les matériaux utilisés dans ce travail sont constitués de stratifiés à fibres de verre et de résine époxyde pour les peaux et d'une âme en mousse PVC de différentes densités ( $60 \text{ kg/m}^3$  et  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Une première analyse en fatigue sur des éprouvettes vierges a montré que le domaine de comportement linéaire est limité à de faibles valeurs des déformations. Dans le cas des éprouvettes endommagées par fissuration, l'énergie dissipée est calculée à partir des données expérimentales de la charge et du déplacement en fonction du temps pour différentes longueurs de fissures. L'amortissement est ensuite calculé et proposé en tant qu'indicateur d'endommagement pour le suivi de l'état de santé de l'éprouvette au cours de la fatigue. L'analyse des résultats obtenus a montré que la rigidité, les cycles d'hystérésis et l'amortissement sont sensibles à la longueur de fissure et au nombre de cycles de fatigue. Une décohésion à l'interface peaux/âme réduit rigoureusement la résistance et la durée de vie des matériaux sandwichs.

## References

- [1] D. Guedra-Degeorges, P. Thevenet, S. Maison, « Damage tolerance of sandwich structures », in: *Proceedings of Euromech 360 Colloquium, Kluwer Academic Publishers*, Saint Etienne, pp.29–36, 1977.
- [2] S. Abrate. Localized. « Impact on sandwich structures with laminated facings ». *Applied Mechanics Review*, Vol. 50, pp. 62–82, 1997.
- [3] J.E. Shafizadeh, J.C. Seferis, E.F. Chesmar, R. Geyer. « Evaluation of the in-service performance behaviour of honeycomb composite sandwich structures ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 8, pp. 661-668, 1999.
- [4] M.K. Farooq. « Comportement mécanique des composites sandwichs en statique et fatigue cyclique », *PhD thesis*, Université du Maine, Le Mans, 2003.
- [5] M.K. Farooq, A. El Mahi, S. Sahraoui, J.M. Berthelot. « Fatigue behaviour of sandwich composite materials ». *Ninth International Conference on composites Engineering, ICCE/9*, July 1-6, in San Diego, U.S.A, 2002.
- [6] M.K. Farooq, A. El Mahi, S. Sahraoui. « Evaluation of fatigue behaviour in sandwich composite materials ». *10th European Conference on Composite Materials ECCM/10*, Brugge, Belgium June 3-7, 2002.
- [7] El Mahi A., Farooq M. K., Sahraoui S., Bezazi A. «Modelling the flexural behaviour of sandwich composite materials under cyclic fatigue». *Materials and Design*, 25, 199–208, 2004.

- [8] M. Samirkumar, F. Ronald Gibson, O. Emmanuel. « The influence of subzero temperatures on fatigue behaviour of composite sandwich structures ». *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 829–838, 2009.
- [9] A. Bezazi, F. Scarpa. « Tensile fatigue of conventional and negative poisson's ration open cell PU foams ». *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp.488-494, 2009.
- [10] C. L. Hacker, M. P. Ansell. « Fatigue damage and hysteresis in wood-epoxy laminates ». *Journal of materials science*, Vol. 36, pp. 609-621, 2001.
- [11] C. K. H. Dharan, T. F. Tan. « A hysteresis-based damage parameter for notched composite laminates subjected to cyclic loading ». *Journal of Materials Science*, Vol. 42 pp. 2204-2207, 2007.
- [12] Z. Zhang, G. Hartwig. « Relation of damping and fatigue damage of unidirectional fibre composites ». *International Journal of Fatigue*, Vol. 24 pp. 713–718, 2002.