



**HAL**  
open science

## Amélioration de la méthodologie d'essai de fatigue en flexion 4 points des structures sandwich

Fahmi Alila, Jamal Fajoui, Pascal Casari, Mohamed Kchaou, Frédéric Jacquemin

► **To cite this version:**

Fahmi Alila, Jamal Fajoui, Pascal Casari, Mohamed Kchaou, Frédéric Jacquemin. Amélioration de la méthodologie d'essai de fatigue en flexion 4 points des structures sandwich. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621611

**HAL Id: hal-01621611**

**<https://hal.science/hal-01621611>**

Submitted on 23 Oct 2017

**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.

## **Amélioration de la méthodologie d'essai de fatigue en flexion 4 points des structures sandwich**

### ***Methodology improvement of 4 point bending fatigue test of sandwich structures***

**Fahmi Alila<sup>1</sup>, Jamal Fajoui<sup>1</sup>, Pascal Casari<sup>1</sup>, Mohamed Kchaou<sup>2</sup>, Frédéric Jacquemin<sup>1</sup>, Samuel Branchu<sup>1</sup>**

1 : Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM) (UMR, CNRS 6183),  
Université de Nantes, Centrale Nantes ; 58, rue Michel Ange-BP 420, 44600 Saint-Nazaire Cedex, France  
[fahmi.alila@univ-nantes.fr](mailto:fahmi.alila@univ-nantes.fr) ; [jamal.fajoui@univ-nantes.fr](mailto:jamal.fajoui@univ-nantes.fr) ; [pascal.casari@univ-nantes.fr](mailto:pascal.casari@univ-nantes.fr) ; [frederic.jacquemin@univ-nantes.fr](mailto:frederic.jacquemin@univ-nantes.fr) ;  
[samuel.branchu@univ-nantes.fr](mailto:samuel.branchu@univ-nantes.fr) ;

2 : Université de Sfax, Ecole nationale d'ingénieur de Sfax ; LASEM W3038 Sfax Tunisie ; [kchaou.mohamed@yahoo.fr](mailto:kchaou.mohamed@yahoo.fr)

### **Résumé**

L'étude porte sur la caractérisation en fatigue de structures composites sandwich. Des travaux récents ont montré qu'une amélioration d'un essai de fatigue sur mousse procurait une durée de vie dix fois supérieure. Sur les structures sandwich, le comportement en fatigue est souvent caractérisé par la norme d'essais ASTM C393 de flexion 4 points. Cette norme est discutée ici et nous proposons une nouvelle géométrie d'éprouvette de flexion 4 points permettant de limiter les effets de bord. Des essais de fatigue ont été menés sur cinq éprouvettes dont le but est d'estimer la variabilité de la durée de vie. En complément, une modélisation sous Abaqus ® avec l'utilisation d'une UMAT est développée afin de prendre en compte un champ de température décrivant l'auto échauffement de la mousse sous une sollicitation dynamique. Le modèle est amélioré par la prise en compte du gradient de densité de la mousse observé dans l'épaisseur de l'âme.

### **Abstract**

The study focus on the fatigue characterization of composite sandwich structures. Recent work has shown that improvement of a foam fatigue test provides a ten-fold improvement in durability. On sandwich structures, fatigue behavior is often characterized by the ASTM C393 4-point bending test standard. This standard is discussed here and we propose a new 4-point bending specimen geometry to limit edge effects. Fatigue tests were carried out on five test pieces, the purpose is to estimate the variability of the lifetime. In addition, a modeling under Abaqus ® with the use of a UMAT is developed in order to take into account the self heating of the foam under dynamic loading. The model is improved by taking into account the density gradient of the foam observed in the thickness of the core.

### **1. Introduction**

Les structures sandwich sont fréquemment utilisées dans la fabrication de structures complexes telles que les bateaux, les avions ou les moyens de transport terrestre [1]. En général, il existe de nombreux types de sandwich, mais l'objectif est toujours le même : placer une âme épaisse et légère entre deux peaux fines et rigides. Fondamentalement, la structure sandwich obtenue est un matériau composite à la fois léger et très résistant à la flexion. Le choix du matériau ainsi que le type de structure associé sont des paramètres très importants à prendre en compte pour la réalisation d'un sandwich [2].

Au sein d'une structure sandwich, du point de vue de la résistance des matériaux, les peaux reprennent les moments fléchissants sous forme de traction et de compression alors que l'âme reprend les efforts tranchants via du cisaillement et la compression hors-plan. L'âme permet aussi de tenir les peaux écartées afin de disposer d'une importante rigidité de flexion sans excès de masse. Un inconvénient de ces structures est que leur comportement à l'impact, en fatigue et l'interaction peau/âme sont encore peu connus. Les événements réduisant la durée de vie des structures sandwich agissant dans un processus complexe ; différents mécanismes

d'endommagement peuvent se créer et évoluent en synergie pouvant altérer le matériau affectant par conséquence sa durée de vie [3, 4].

L'étude porte sur la caractérisation en fatigue de structures composites sandwich. Des travaux récents ont montré qu'une amélioration d'un essai de fatigue sur mousse procurait une durée de vie dix fois supérieure [5, 6]. Sur les structures sandwich, la fatigue est souvent caractérisée par la norme d'essais ASTM C393 de flexion 4 points [7]. Cette norme est discutée ici et nous proposons une nouvelle géométrie d'éprouvette de flexion 4 points qui limite les effets de bord.

Des essais de fatigue sont menés à un niveau de contrainte de cisaillement de 0,8 MPa et un rapport  $R = 0,1$ . Cinq éprouvettes sont testées dans le but d'estimer la variabilité de la durée de vie. Différentes techniques expérimentales sont mise en œuvre et permettent de mieux décrire le comportement de la structure en vue de la modéliser par éléments finis.

En complément, un auto-échauffement de la mousse est constaté en fonction de la fréquence de sollicitation. Une modélisation sous ABAQUS est développée afin de prendre en compte un champ de température non homogène généré par les effets visqueux dans le matériau pour mieux connaître l'état des contraintes de cisaillement au sein de la mousse durant l'essai de fatigue. Enfin, un gradient de densité de la mousse observé dans l'épaisseur de la mousse. Il donne lieu à une évolution de la rigidité de cisaillement et cette distribution est prise en compte dans la modélisation.

## 2. Matériaux et techniques

Nous nous intéressons au calcul des dimensions des éprouvettes de flexion 4 points classiques et des éprouvettes de flexion avec la nouvelle géométrie qui serviront de comparaison avec les résultats obtenus par Zenkert [8–10]. En ce qui concerne la séquence d'empilement de notre éprouvette sandwich, nous choisissons le même type de matériaux que dans [9, 10] :

- Tissus NCF-SAERTEX VF 92108 – 828g/m<sup>2</sup> [0°,45°,90°,-45°]
- Résine EPOLAM 5015-5014
- Mousse PVC Divinycell H100 – Epaisseur 50 mm

L'empilement étant de [0°,45°,90°,-45°]<sub>4</sub> en peau supérieure (soumise à la compression) et de [0°,45°,90°,-45°]<sub>2</sub> en peau inférieure. Les dimensions de l'éprouvette sont présentées sur la figure 1. Les propriétés mécaniques de la mousse PVC sont résumées dans le tableau 1. Les essais sont réalisés sur une machine de flexion d'une capacité de 10 kN à température ambiante.

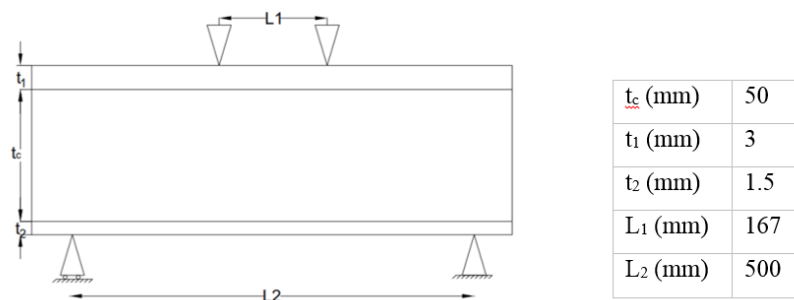


Fig. 1 Dimensions de la structure sandwich étudiée

	E(MPa)	G(MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\tau_{\text{yield}}$ (MPa)	$\tau_{\text{failure}}$ (MPa)
<b>H100</b>	126	40	3,3	1,13	1,21

Tab. 1. Propriétés mécaniques de la mousse PVC

### 3. Analyse et optimisation de l'essai de fatigue en flexion 4 points

Afin de réaliser une étude pertinente, il est important d'analyser des éprouvettes de référence comme celles utilisées par Zenkert [10] basé sur la géométrie de la norme ASTM C393 et de comprendre le mécanisme d'endommagement et la localisation de la rupture. Nous présentons sur la figure 2a la répartition des contraintes de cisaillement dans l'éprouvette de la norme. Cette géométrie présente une concentration de contrainte aux bords de l'éprouvette. Cette concentration de contrainte donne lieu suite à des sollicitations dynamiques à une rupture précoce aux bords ce qui ne permet pas d'avoir une idée correcte sur la durée de vie en fatigue de la structure. Ceci prouve la nécessité de reconsidérer la géométrie des éprouvettes afin d'obtenir une cohérence entre la durée de vie observée des structures réelles et celle déterminée lors des essais en laboratoire.

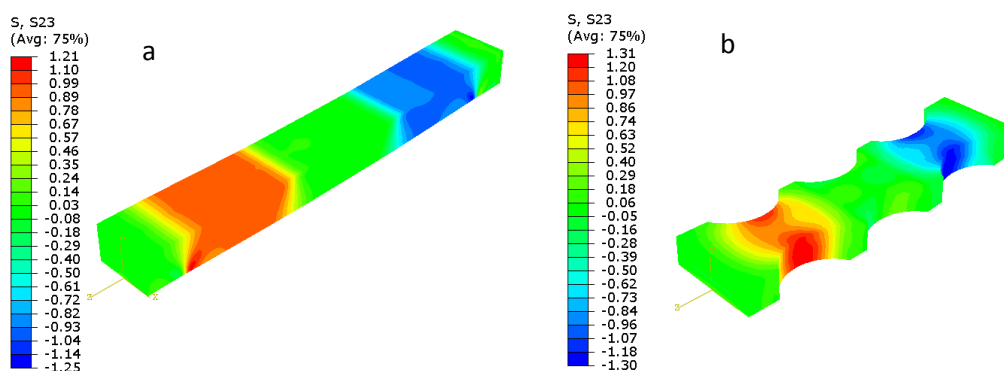


Fig. 2 : a- Répartition de la contrainte de cisaillement dans la géométrie de la norme ASTM C393 ; b- Répartition de la contrainte de cisaillement dans la nouvelle géométrie

Nous avons donc opté pour une géométrie qui présente des enlèvements de matière entre les points d'application de force et les appuis de l'essai de flexion 4 points. La répartition des contraintes de la nouvelle géométrie est présentée sur la figure 2b. La contrainte maximale aux bords est égale à 0,51 MPa alors qu'elle est à l'ordre de 0,34 MPa dans le plan médian de l'éprouvette donnant ainsi un rapport de réduction de 33,5%. Ce résultat permet de constater une différence entre la nouvelle géométrie et la géométrie de la norme dont la contrainte de cisaillement aux bords est égale à 1,21 MPa.

### 4. Résultats des essais de fatigue

Les résultats des essais de fatigue sont présentés sur la figure 3 avec en abscisse la durée de vie exprimé en log (N) et en ordonnée la contrainte en MPa. La figure présente les résultats relevés sur la publication de Zenkert [9], le nombre de cycles à la rupture de nos essais avec la géométrie de la norme et la nouvelle géométrie des éprouvettes. L'objectif n'est pas de reconstruire la courbe de Wöhler dans son intégralité mais de choisir un niveau de chargement et de comparer les durées de vie en se basant sur les différentes approches.

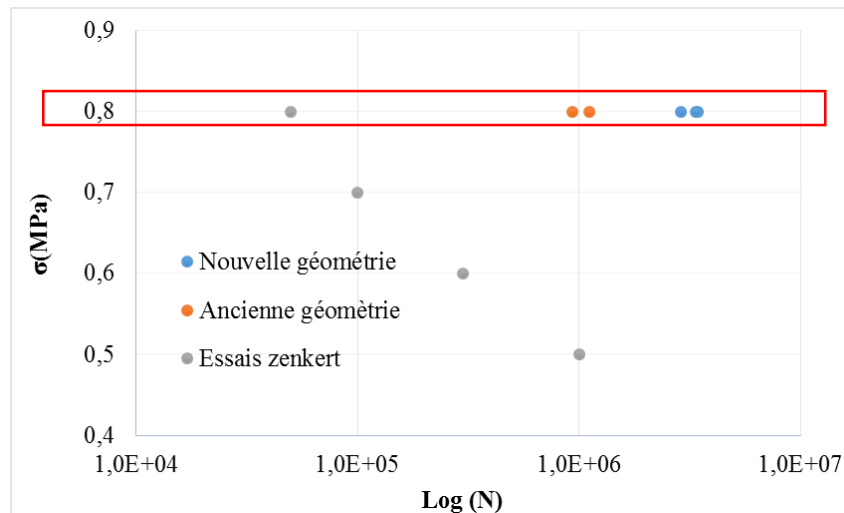


Fig. 3 Courbe S-N comparant les différentes approches

D'après les résultats présentés sur la figure 3, on peut conclure que :

- La disparité entre les durées de vie des différentes éprouvettes est faible.
- Pour un même niveau de contrainte (0,8 MPa) en comparant les durées de vie des éprouvettes de Zenkert et nos éprouvettes suivant la norme on trouve une large différence soit 10 fois plus importante.
- Pour un même niveau de contrainte (0,8 MPa), nous avons obtenu une durée de vie de la nouvelle géométrie 2,5 fois plus importante que la géométrie de la norme.

Lors de nos essais, nous rencontrons une rupture en fatigue de nos éprouvettes. Il est important d'observer de près les faciès de rupture afin de construire une base de données regroupant les différents modes de rupture. Un premier mode de rupture, le cisaillement dans l'âme, a été observé comme le montre la figure 4.a. à l'aide d'un appareil photo numérique équipé d'un objectif macroscopique.

Nous remarquons sur la figure 4.b que la surface rompue présente un aspect festonné et présente des cellules ouvertes dont les parois sont cassées nettement. Nous observons à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) les faciès de rupture à faible grossissement, figure 4.c, afin de déterminer les différents mécanismes responsables de la rupture.

Sur la figure 4.c, nous remarquons des cellules ayant des parois cisailées nettement et d'autres plutôt arrachées.

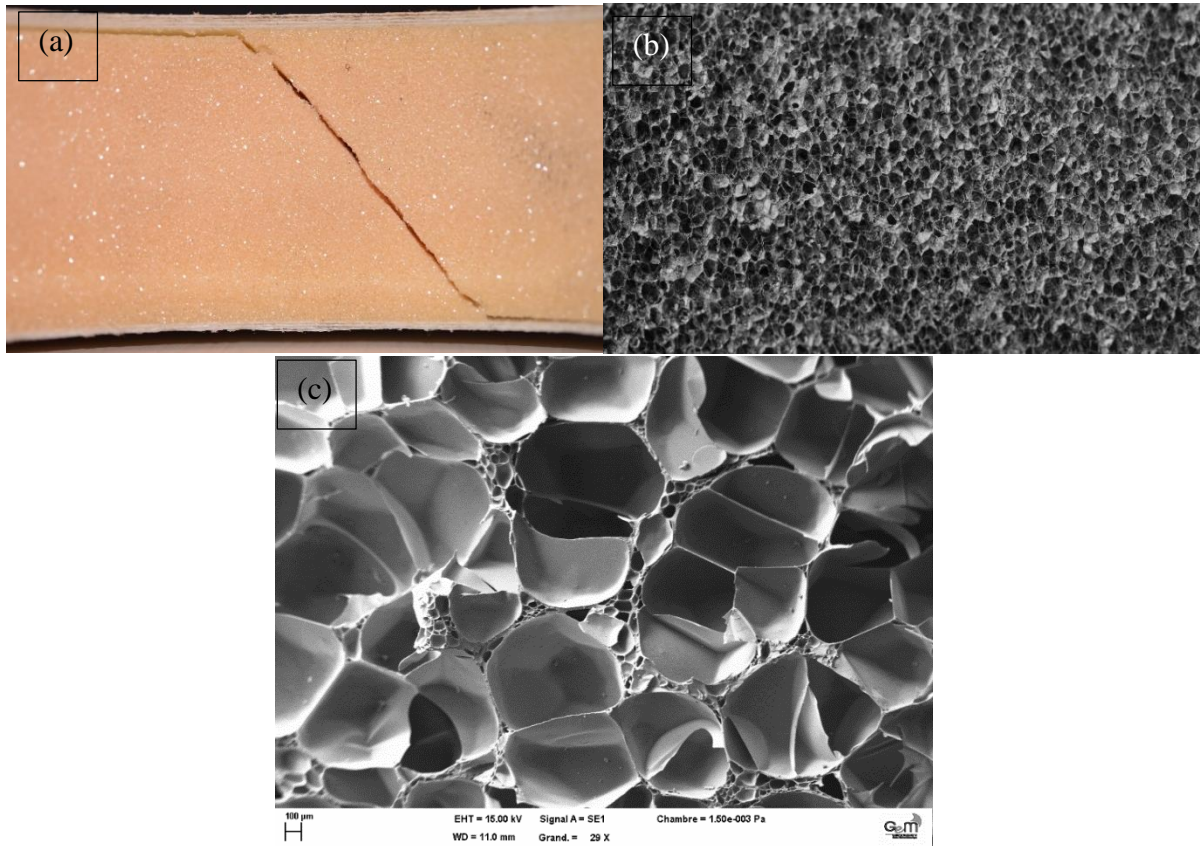


Fig. 4 a. Rupture en cisaillement de l'âme ; b. Facies de rupture (vue macroscopique) ; c- Facies de rupture vue microscopique au MEB

## 5. Approches thermo viscoélastique

Le comportement observé lors des essais de flexion comporte une partie élastique et une partie visqueuse. Ces deux aspects pouvant dépendre de la température. A partir de la réponse en déformation et en température des éprouvettes testées, nous proposons de construire un modèle basé sur un assemblage de ressort et d'amortisseur en parallèle soit le modèle analogique général de Maxwell [11–13]. Ce modèle permettra d'établir une relation entre l'énergie dissipé au sein du matériau avec une élévation de température. Pour ce faire, nous pourrions ainsi inclure la loi de comportement dans un modèle Abaqus® grâce à un programme FORTRAN® définissant le comportement du matériau appelé UMAT. Nous présentons ainsi les résultats numériques et expérimentaux sur la figure 5. On constate que le modèle est représentatif de l'évolution de la température.

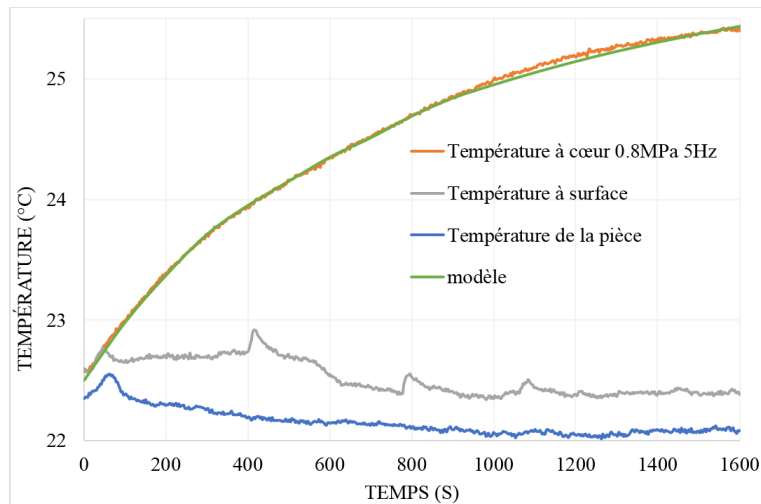


Fig. 5 Evolution de la température durant les essais de fatigue à 0,8MPa à 5Hz

## 6. Gradient de densité dans l'épaisseur de la mousse

La mousse utilisée dans notre structure sandwich est en PVC à cellules fermées de densité  $100 \text{ kg/m}^3$ . Au cours de nos essais nous avons réalisé un suivi du champ de déformation dans nos éprouvettes dans la zone des échancrures. On a remarqué que la répartition du champ de déformation est non homogène suivant l'épaisseur de l'éprouvette, le résultat de la corrélation d'image est présenté sur la figure 6.a. Une comparaison avec le champ de déformation de la simulation numérique montre qu'il y a un gradient de densité dans la mousse (figure 6.b). Pour valider cette hypothèse on a réalisé une analyse acoustique sur l'épaisseur de la mousse afin d'obtenir les informations nécessaire sur le gradient de densité dans l'épaisseur de la mousse H100.

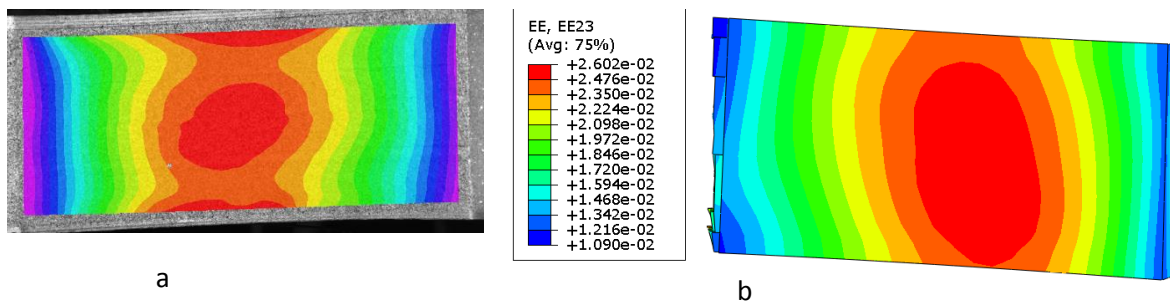


Fig. 6. a. Répartition du champ de déformation avec corrélation d'image, b. Répartition du champ de déformation avec calcul Abaqus

Les résultats de l'analyse de l'épaisseur par émission acoustique sont présentés sur la figure 9. Les résultats montrent que la valeur de densité varie significativement suivant l'épaisseur. Cette variation de densité donne lieu à une variation de propriétés mécaniques en particulier une variation du module de cisaillement de l'âme. Une étude analytique permet de tracer l'évolution du module de cisaillement de la mousse en fonction de la densité. Cette étude nous permet d'introduire les nouvelles valeurs du module sur Abaqus permettant d'avoir plus de correspondance avec les résultats expérimentaux. Nous traçons sur la figure 7.b l'évolution du module de cisaillement en fonction de la densité.

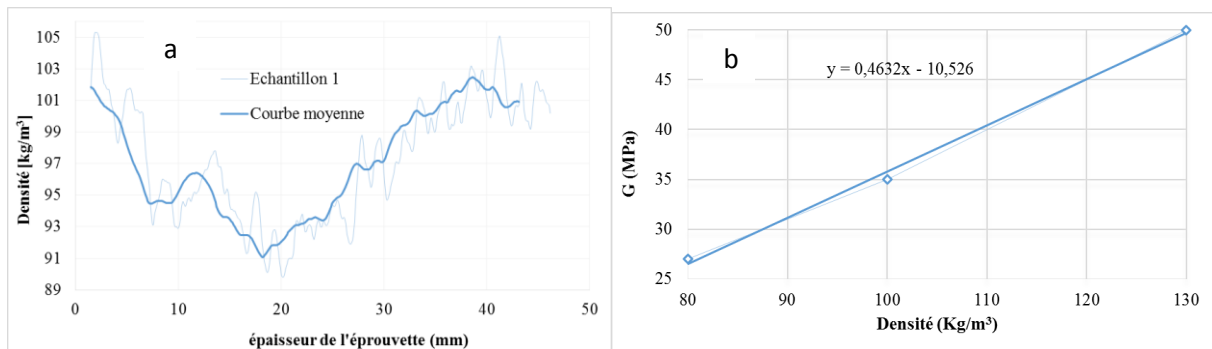


Fig. 7. a-Evolution de la densité de la mousse suivant l'épaisseur de l'éprouvette ; b- Evolution du module de cisaillement en fonction de la densité de la mousse

Nous avons ensuite intégré ces valeurs dans notre calcul sur Abaqus ®. Nous présentons sur la figure 8 la répartition du champ de déformation avec une densité variable.

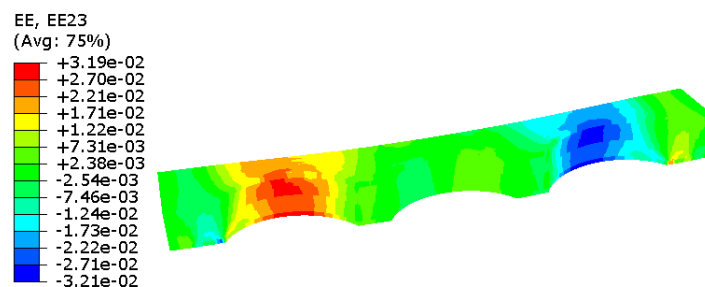


Fig. 8 Répartition du champ de déformation E23 dans l'âme en mousse H100 avec variation de densité

## 7. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié principalement les essais de caractérisation mécanique des structures sandwich qui conduisent à définir leur durée de vie en fatigue. Nous avons proposé une nouvelle méthodologie d'essai de flexion 4 points en fatigue en faisant changer la géométrie de l'éprouvette qui permet d'avoir moins de concentration de contrainte aux bords. Nous constatons que la géométrie adoptée s'avère très satisfaisante et nous a procuré une durée de vie de la structure sandwich supérieure de 2,5 fois par rapport aux résultats obtenus avec la géométrie de la norme ASTM C393. Dans la deuxième partie de ce travail nous avons proposé un modèle qui permet de modéliser le comportement thermo viscoélastique de la mousse H100. Les résultats de simulations et d'essais sont en bonne adéquation. Ensuite nous avons étudié le gradient de densité dans la mousse. Nous avons réalisé des mesures acoustiques qui nous ont montré que la densité varie significativement suivant l'épaisseur du sandwich. Cette variation de densité donne lieu à une variation du module de cisaillement. Un calcul analytique nous a permis de tracer cette évolution et de représenter la répartition des champs de déformation numériquement.



## Références

- [1] Rajapakse YDS, Hui D. Marine Composites and Sandwich Structures. *Compos Part B Eng* 2008;39:1–4. doi:10.1016/j.compositesb.2007.02.003.
- [2] Zenkert D. The handbook of sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd; 1997.
- [3] Sharma N, Gibson RF, Ayorinde EO. Fatigue of Foam and Honeycomb Core Composite Sandwich Structures: A Tutorial. *J Sandw Struct Mater* 2006;8:263–319. doi:10.1177/1099636206063337.
- [4] Steeves CA, Fleck NA. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *Int J Mech Sci* 2004;46:561–83. doi:10.1016/j.ijmecsci.2004.04.003.
- [5] Alila F, Fajoui J, Kchaou M, Casari P, Wali N, Gerard R. Mechanical characterization of sandwich composite structure using a new experimental approach. *Adv Compos Lett* 2016;25:117–20.
- [6] Gerard R, Alila F, Fajoui J, Jacquemin F. Updated fatigue test methods for structural foams and sandwich beams. 5th High Perform Yacht Des Conf Auckl 2015.
- [7] ASTM. ASTM C393 / C393M - 11e1 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure 2008.
- [8] Burman M, Zenkert D. Fatigue of foam core sandwich beams—1: undamaged specimens. *Int J Fatigue* 1997;19:551–61. doi:10.1016/S0142-1123(97)00069-8.
- [9] Zenkert D, Shipsha A, Burman M. Fatigue of Closed Cell Foams. *J Sandw Struct Mater* 2006;8:517–38. doi:10.1177/1099636206065886.
- [10] Zenkert D, Burman M. Failure mode shifts during constant amplitude fatigue loading of GFRP/foam core sandwich beams. *Int J Fatigue* 2011;33:217–22. doi:10.1016/j.ijfatigue.2010.08.005.
- [11] Khan KA, El-Sayed T. A phenomenological constitutive model for the nonlinear viscoelastic responses of biodegradable polymers. *Acta Mech* 2012;224:287–305. doi:10.1007/s00707-012-0760-7.
- [12] Nguyen ST, Vu M-H, Vu MN, Nguyen TN. Generalized Maxwell model for micro-cracked viscoelastic materials. *Int J Damage Mech* 2015:1056789515608231. doi:10.1177/1056789515608231.
- [13] Renaud F, Dion J-L, Chevallier G, Tawfiq I, Lemaire R. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model. *Mech Syst Signal Process* 2011;25:991–1010. doi:10.1016/j.ymsp.2010.09.002.