

Comportement mécanique en statique et en fatigue des mousses polyuréthanes à cellules ouvertes

K. Bouchahdane¹, A. Bezazi¹, F. Scarpa²

¹ Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM), Département de Génie Mécanique ; BP. 401 Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.

² Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, Queens Building, University Walk, BS8 1TR Bristol, UK.

Abstract - L'élaboration et la caractérisation de mousse polyuréthane (production Algérienne) à cellules ouvertes dédiée pour cette étude consiste à une étude du comportement mécanique en compression statique et fatigue cyclique. Dans ce travail une technique est présentée pour la réalisation de la transformation de ce type de mousse d'un état conventionnel ou originale ayant un coefficient de Poisson positif à un état transformé ou auxétique ayant un coefficient de Poisson négatif, via un dispositif conçu spécialement. Des comparaisons en compression statique sont faites pour des mousses conventionnels et transformés en auxétiques. Les résultats obtenus ont montré le degré d'influence du taux de compression sur le comportement mécanique en compression des mousses. Les essais de fatigue cyclique sont menés en contrôle-déplacement pour différents niveaux de chargement r . Le suivi de l'endommagement des éprouvettes auxétiques par charge et décharge permet de tracer l'évolution de la perte de charge F/F_0 en fonction du nombre de cycles N qui se déroule en trois phases différentes. Les boucles d'hystérésis des différents niveaux de chargement sont aussi identifiées en fonction du nombre de cycle ce qui conduit à l'évaluation de l'énergie dissipée E_d dont l'évolution en fonction de N se déroule en deux stades.

Mots clé : Mousses Polyuréthane, auxétique, compression, fatigue, comportement mécanique.

I. Introduction

Les matériaux cellulaires occupent une partie importante de la littérature. En outre, les chercheurs se sont intéressés à étudier le phénomène de moussage, il existe différents types de mousses (à cellules ouvertes ou fermées) on peut citer : les mousses en Aluminium, en Nickel, en céramique, en polyéthylène, PVC, PVDF, polyuréthane, ...etc. Récemment, ces matériaux bénéficient d'une attention renouvelée comme matériaux structurels et fonctionnels [1- 2]. Les propriétés des matériaux cellulaires dépendent de la manière dont le solide est distribué dans la cellule, ces dernières apparaissent largement dans la nature [3].

Les propriétés mécaniques des matériaux cellulaires ont fait l'objet de nombreuses études [4] mais elles sont encore loin pour définir leur comportement et endommagement sous différentes sollicitations. Au cours de ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des mousses en tant que matériau cellulaire, car elles possèdent des caractéristiques mécaniques très intéressantes. Les mousses sont utilisées pour une variété de raisons, notamment l'isolation, faible densité, la dissipation d'énergie, amortissement des chocs et des vibrations et la redistribution des contraintes [5]. La recherche de leur comportement sous des vitesses de déformation quasi-statique et élevée est utile pour des applications d'ingénierie, tels que ceux liés à l'impact et l'absorption de l'énergie. Leur comportement mécanique dépend essentiellement du type du matériau de base, la densité relative, la morphologie et la topologie [6]. Pour cela, plusieurs travaux ont été menés sur des matériaux cellulaires type mousses à coefficient

Auteur correspondant: K. Bouchahdane

Domaine de recherche: Matériaux cellulaires

Adresse: BP 401 université de Guelma 24000 Algérie

E-mail: bouchahdaneakarima@yahoo.fr

de Poisson positif et négatif. La mousse polyuréthane flexible, étant le groupe le plus important qui a atteint 29% de la production totale [7]. Des résultats expérimentaux du comportement mécanique sur des mousses polyuréthane (PU) conventionnelle et auxétique sont présentés par Bezazi et Scarpa en statique et en fatigue cyclique en compression [8], et en traction [9]. Les mêmes auteurs ont testé un autre type de mousse PVDF à cellules fermées en fatigue cyclique en traction et aussi en fatigue statique (relaxation) [10]. Les propriétés mécaniques des mousses du nickel à cellules ouvertes sont étudiées pour la portée des densités utilisées dans des applications industrielles par Badiche *et al* [11]. McDonald *et al* [12] ont utilisé la microtopographie rayon X pour identifier clairement les mécanismes prédominants de déformation responsables de la réaction auxétique de mousses polymères. Les mousses polyuréthanes sont des dérivées du pétrole (polymères) comme le polyol et l'isocyanate (catalyseur), chaque fabricant de mousse polyuréthane garde jalousement sa recette de composants principaux. Pour simplifier, nous pouvons comparer le procédé de fabrication des mousses à celui de la fabrication du pain. En effet, le mélange des composants polymères, du catalyseur et de l'eau, sont d'abord émulsionnés et étendus en une épaisse couche sur un tapis roulant. Cette couche liquide commence immédiatement à lever comme une pâte à pain. La réaction chimique produit du dioxyde de carbone avec un fort dégagement de chaleur qui transforme l'eau en vapeur ; cette vapeur d'eau s'élève par sa légèreté et sa pression augmente, l'effet expansif ou gonflement de la pâte qui devient ainsi de plus en plus spongieuse. Les polymères ou résines jouent le rôle de la farine, le catalyseur et l'eau celui du levain. Il existe bien entendu plusieurs recettes donc plusieurs types de mousses.

Ce travail concerne la fabrication et la caractérisation d'une mousse polyuréthane à cellules ouvertes, fabriquées localement par la société Algérienne "Mousse du Sud". En raison de l'amélioration de leurs propriétés mécaniques, une étude du comportement mécanique en compression statique et en fatigue cyclique est présentée. Les essais statiques sont effectués sur des éprouvettes selon leur état original (conventionnel) et d'autre transformés

(auxétiques) en structure réentrante via un dispositif conçu spécialement. Les transformations sont obtenues en exerçant une compression axiale et radiale des éprouvettes dans des tubes ayant différents diamètres avec un chauffage à une température de ramollissement et un maintien approprié. Dans le but de bien visualiser l'effet des transformations sur le comportement mécanique des mousses une comparaison est faite entre les différents types d'éprouvettes originales et transformées par les niveaux 2 et 3. L'analyse des résultats des essais de fatigue cyclique effectués sur les mousses auxétiques permet de mettre en évidence l'évolution de la perte de charge (F/F_0) ainsi que l'énergie dissipée (E_d) en fonction du nombre de cycles N et du niveau de chargement r .

II. Matériaux d'étude et protocole expérimental

II.1. Matériaux

Le matériau utilisé dans ce travail est un bloc de mousse polyuréthane à cellule ouverte de couleur gris de fabrication algérienne ayant les dimensions suivantes : 190 cm × 140 cm × 5 cm avec une densité de 0,025 g/cm³.

II.2. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour la réalisation des essais sont découpées et préparées au sein du Laboratoire de mécanique appliquée des nouveaux matériaux (LMANM) de l'université 8 Mai 1945 Guelma. La gamme de ces éprouvettes est divisée en deux séries : une contient des éprouvettes testées avec leur état original (conventionnel), tandis que la deuxième série est testée après transformation auxétiques avec deux taux de compression. Les éprouvettes auxétiques ont été fabriquées à partir du même bloque de mousse en utilisant le processus de transformation décrit dans les travaux de Bezazi *et al* [8]-[9]. Sachant que les éprouvettes conventionnelles ont une forme cylindrique ayant une longueur de 30 mm et deux différents diamètres 22 et 28 mm.

Les éprouvettes auxétiques sont transformées à partir d'une compression simultanée dans le sens axial et radial des éprouvettes, puis chauffés à une température de ramollissement pendant un temps adéquat. La transformation peut être résumé en quatre étapes : i)

compression; ii) chauffage ; iii) refroidissement ; iv) relaxation (décompression) [13]. Dans notre cas, les mousses auxétiques sont obtenues à partir des cylindres ayant 28 mm de diamètre et 150 mm de longueur avec des taux de compression différents. Ces cylindres sont ensuite comprimés à l'intérieur du dispositif (Fig. 1) avant de les chauffer dans une étuve à une température désirée, après la décompression et la détente des échantillons. Il est important de signaler que la transformation des éprouvettes de mousse par compression radiale et axiale dans des tubes de diamètre 22 mm est appelée le niveau 2, notée par (G 28/22), et par conséquent la transformation dans des tubes de diamètre égale 19 mm appelée le niveau 3 on la note ainsi par (G 28/19). L'étuve utilisé est de marque **Memmert modèle 500** ayant une chambre de dimension de : 560 x 480 x 400 mm³ équipé d'un système de chauffage jusqu'à 220 °C avec un afficheur électronique. L'étuve est aussi équipée d'un régulateur électronique et d'un thermostat (chauffage ou arrêt) permettant le réglage de la température de consigne désiré de l'appareil avec une précision d'affichage et de lecture de 0,5 °C.

II.3. Conditions d'essais

Les essais de compression statique ont été effectués à une température ambiante, et avec une vitesse de 5 mm/min. Les essais de fatigue ont été menés en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 1 Hz. Les éprouvettes utilisées dans le cas des essais de fatigue sont similaires à ceux utilisés dans le chargement statique. Les éprouvettes sont soumises à un chargement statique jusqu'à un déplacement moyen, puis à un chargement cyclique à différentes valeurs d'amplitude qui se traduit par différents niveaux de chargement soit : r (0,72; 0,75; 0,80; 0,85, 0,90). Ces essais sont réalisés à l'aide d'une machine universel type Zwick / Roell Z005 ayant une cellule de charge dont la capacité maximale est de 5 kN. Elle permet d'effectuer des essais dans une gamme de vitesses de déplacement comprises entre 0,001 et 3000 mm/min. Cette machine est pilotée par un ordinateur autorisant le lancement des essais et l'acquisition des données par l'intermédiaire du logiciel *testXpert* qui permet la programmation de cycles complexes et le pilotage des essais avec différentes vitesses en

contrôle force ou déplacement. Le niveau de chargement est donné par la relation [9] :

$$r = d_{\max} / d_{rup} \quad (1)$$

III. Résultats et discussions

III.1. Essais statiques

Fig. 2 représente le comportement force-déplacement, qui se déroule en trois phases, de la mousse polyuréthane grise originale de diamètre 22 mm, ceci est en bonne concordance avec la théorie classique des mousses développée par Gibson et Ashby [13]. La courbe représentative de la compression des solides cellulaire, que ce soit élastomère ou plastique, montre une phase linéaire (I) suivie d'un plateau de la force (II) et en fin une phase de densification (III) ou la charge augmente considérablement avec le déplacement. Des dispersions sont observées entre les trois éprouvettes effectuées dans les mêmes conditions de fabrication et de tests. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi et Scarpa [8] sauf que la force maximale obtenue par ces derniers est de l'ordre 17 N pour un taux de chargement de 80% pour une mousse PU de densité 0.027 g/cm³ qui est relativement beaucoup plus importante à la valeur trouvé dans le présent travail qui est de l'ordre de 9 N.

Le comportement force-déplacement de la mousse grise originale de diamètre 28 mm (Fig. 3); se déroule en trois phases donc similaire à celui montré dans la Fig. 2. Les essais sont plus ou moins répétitifs, la force maximale est de 13 N, supérieurs de 5 N par rapport aux éprouvettes ayant un diamètre de 22 mm.

On remarque que le comportement force-déplacement de la mousse transformée par le niveau 2 (G28/22) illustré dans la fig. 4 se compose aussi en trois phases linéaires, plateau et densification, ce qu'on a enregistré pour les mousses conventionnelles. Les courbes sont assez proches représentant ainsi une faible dispersion de la force confiné dans la troisième phase, ce comportement est enregistré par d'autres auteurs [15].

De la même manière le comportement force-déplacement enregistré est similaire au cas précédent pour les mousses transformées par le troisième niveau (G 28/19) fig. 5 et la force maximale est de l'ordre 13 N.



Fig. 1. Dispositif de transformation.

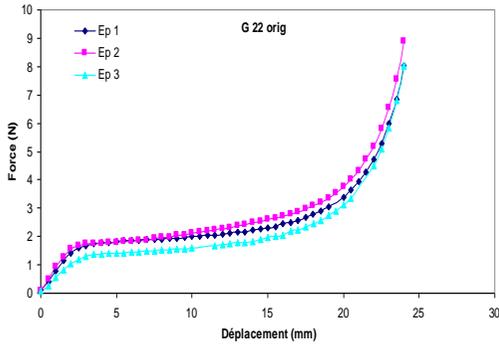


Fig. 2. Force-déplacement de la mousse G 22 originale.

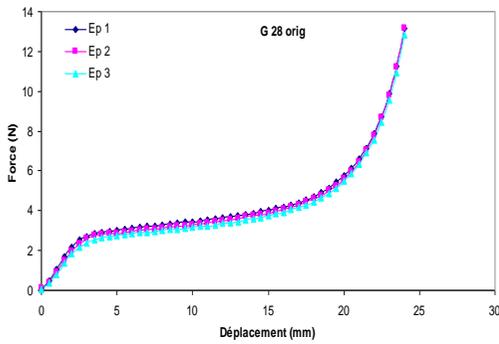


Fig. 3. Force-déplacement de la mousse G 28 originale.

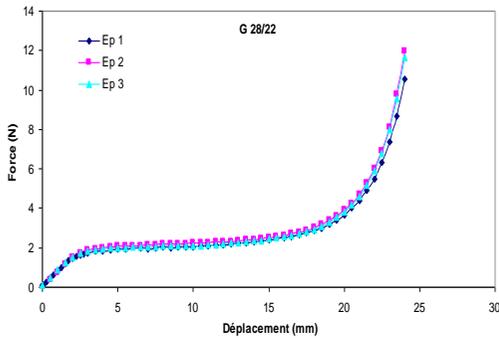


Fig. 4. Force-déplacement de la mousse grise transformée G 28/22.

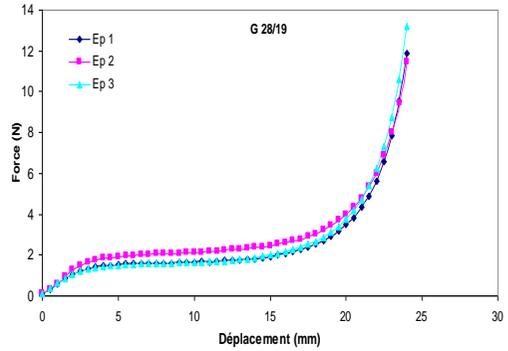


Fig. 5. Force-déplacement de la mousse grise transformée G 28/19.

La Fig. 6. illustre un échantillon de la mousse polyuréthane grise à cellules ouvertes placé entre les deux plateaux de compression monté sur la machine des essais, expliquant comment on effectue un essai de compression statique, tel que la première photos (a) nous montre un échantillon sans application d'une charge de compression F , cependant la deuxième photos (b) présente un échantillon sous sollicitation statique jusqu'à un taux de compression de 50%.

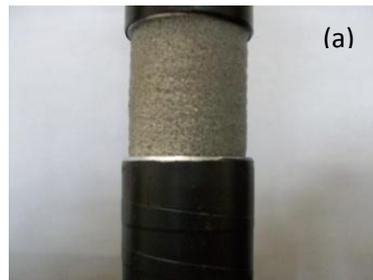


Fig. 6. Echantillon sous compression statique. (a) avant chargement (b) après compression de 80 %.

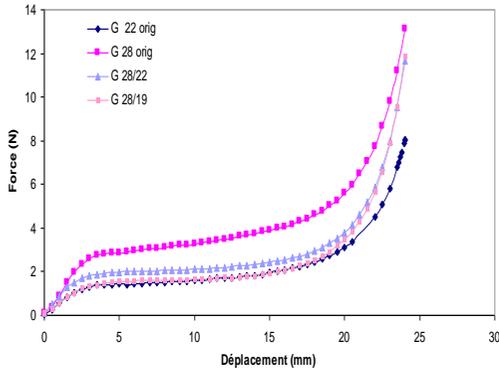


Fig. 7. Force-déplacement de la mousse grise originale et transformée avec deux niveaux de compression.

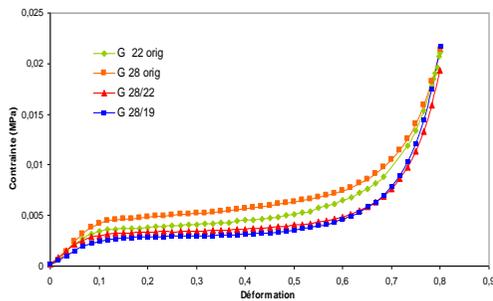


Fig. 8. Contrainte-déformation de la mousse grise originale et transformé.

Table 1. Valeurs obtenus expérimentalement de la force de pression maximale de la mousse grise originale et transformés

Type de mousse	Force maximale à 80% de compression
G 22 originale	$8,46 \pm 0,42$
G 28 originale	$12,97 \pm 0,14$
G 28/22 niveau 2	$11,26 \pm 0,70$
G 28/19 niveau 3	$12,32 \pm 0,87$

Une comparaison entre les différents type de mousses conventionnelle (de diamètres 22, 28 mm) et transformée par les taux 2 et 3 de compression est présentée dans la Fig. 8. L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation se déroule en trois phases d'une manière similaire à celle trouvé pour le comportement force-déplacement. Il est ta noter que la valeur maximale de la contrainte est

enregistrée de l'ordre de 0,02 MPa pour la mousse transformée par le deuxième taux de compression (G 28/19), ce qui vérifie le but de la transformation des mousses concernant l'amélioration des caractéristiques de ces dernières.

III.2. Essais de fatigue

La dégradation de la rigidité (F/F_0) des échantillons jusqu'à 100 000 cycles (Fig. 9) peut être divisée en deux étapes : la première est caractérisée par une forte réduction de F/F_0 durant les premiers cycles, alors que pendant la deuxième étape la dégradation est plus progressive est lente et atteint un comportement quasi plateau. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi & Scarpa [8]. Pour enrichir l'analyse de ce travail, nous avons réalisé des essais allant jusqu'à 800 000 cycles, dans ce cas la perte de rigidité peut être devisée en trois phases (Fig. 10): la première est caractérisée par une forte réduction de F/F_0 durant les premiers cycles, alors que pendant la deuxième phase la dégradation est plus progressive est lente et atteint un comportement plateau. Cependant, la troisième phase se caractérise par un comportement alternatif entre un accroissement et un décroissement de F/F_0 , et cela peut être due à la diminution de la température pendant la nuit, ce qui provoque un durcissement de la mousse qui se traduit par une augmentation relative de la perte de rigidité.

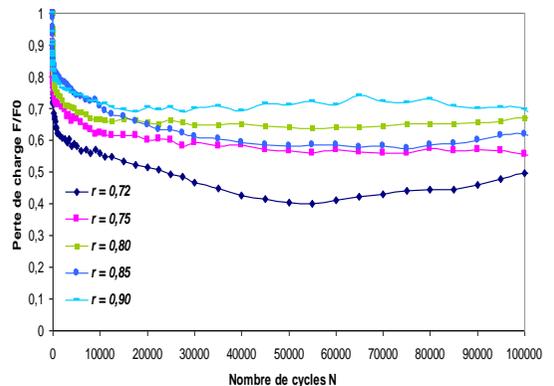


Fig. 9. Evolution de la perte de charge F/F_0 en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement r .

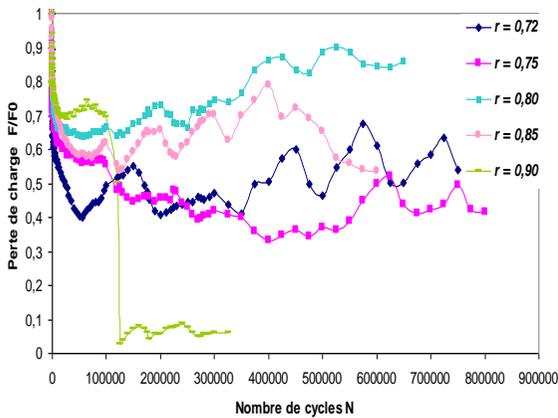


Fig. 10. Evolution de la perte de charge F/F_0 en fonction de nombre de cycle pour les différents niveaux de chargement r .

La Fig. 11 représente les boucles d’hystérésis enregistrée du premier cycle ($N = 1$) pour les différents niveaux de chargements utilisés ($r = 0,72 ; 0,75 ; 0,80 ; 0,85$ et $0,90$).

L’augmentation du niveau de chargement pour un nombre de cycle défini conduit à une augmentation de la taille de la boucle d’hystérésis. En d’autres termes, l’augmentation de r conduit à l’augmentation de la force, du déplacement et par conséquent de la surface de la boucle d’hystérésis.

La Fig. 12 montre la quantité d’énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour les différents niveaux de chargement étudiés. La variation de l’énergie dissipée par unité de volume (mJ/cm^3) en fonction du nombre de cycles se déroule en deux phases : la première correspond à une forte diminution jusqu’à environ 20000 cycles, tandis que la deuxième phase est liée à une diminution très lente (comportement plateau) en raison de la stabilité de la déformation des brins des cellules. En d’autres termes, l’énergie dissipée reste presque constante avec l’augmentation du nombre de cycle ; ceci est en bonne concordance avec les travaux de Prima *et al* [17] et de Bezazi et Scarpa [8], l’énergie dissipée peut être calculée par la relation [8]:

$$E_d = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (2)$$

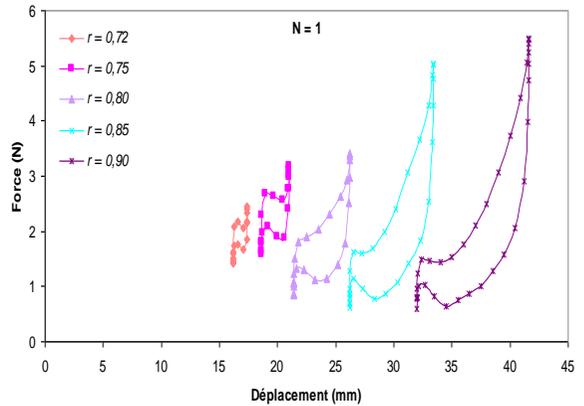


Fig. 11. Boucles d’hystérésis pour le premier cycle des différents niveaux de chargement utilisés.

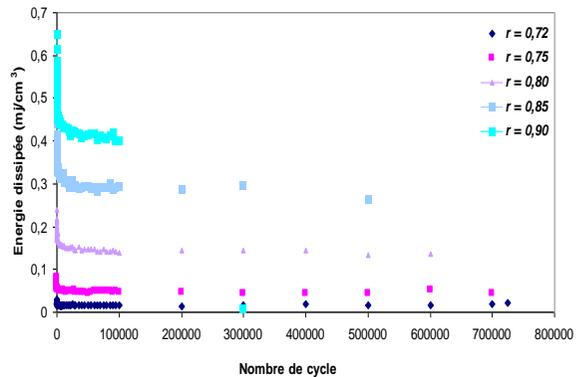


Fig. 12. Energie dissipée E_d par unité de volume en fonction du nombre de cycle pour les différents niveaux de chargement étudiés.

Une microstructure des deux types de mousses conventionnelle et auxétique est présentée par la fig. (Fig. 13) et la prise des photos a été obtenue à l’aide d’un microscope optique binoculaire. L’analyse des photos révèle que la mousse conventionnelle et auxétique possèdent des formes cellulaires avec des pores ayant différente forme et taille. En effet, les pores de la mousse conventionnelle Fig. 13a possèdent une forme ovale mais de taille différente alors que celle de la mousse auxétique Fig. 13b sont de forme aléatoire et parfois réentrante. Le calcul de la porosité par l’intermédiaire du logiciel *Motic Image plus* des échantillons en mousse conventionnelle et auxétique révèle qu’elles possèdent respectivement les porosités de 56,68% et 52,15%. A cause du processus de transformation, la mousse auxétique est donc plus dense que la mousse conventionnelle de

8,69%. La mousse polyuréthane se caractérise également par la géométrie de ses cellules [18] et le changement particulier de la microstructure de la mousse est donné par l'effet prédominant dû aux mécanismes de déformation [19].

Il est important de noter aussi que les dimensions des échantillons des mousses auxétiques augmentent dans le temps. En effet, pour mettre en évidence ce phénomène une prise successive de photos est effectuée pendant des intervalles de temps définie pour une durée de 15 jours sans démontage de l'échantillon. La première et la quinzième photo prise sont présentées respectivement dans les Fig. 13b et 13c. Il est important de signaler donc que la porosité d'échantillon auxétique a augmenté après quinze jours. Cette technique permet de contrôler l'évolution de la forme des cellulaires réentrantes des mousses auxétiques.

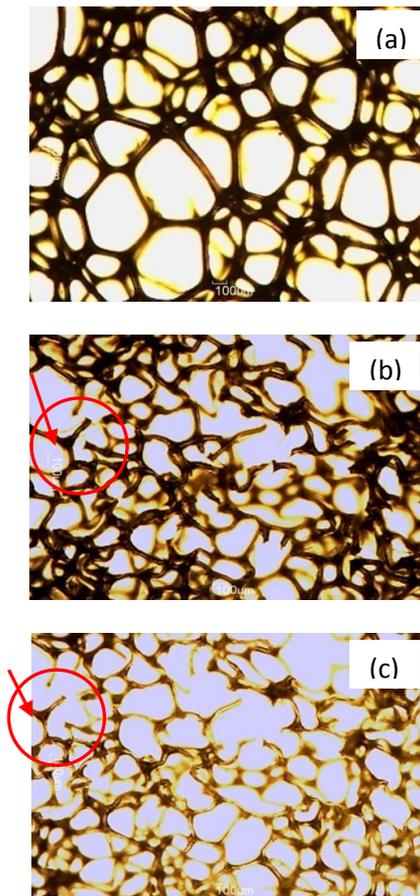


Fig. 13. Images microscopiques,
(a) mousse originale,
(b) première photo (mousse auxétique),
(c) quinzième photo (mousse auxétique).

IV. Conclusions

Le comportement mécanique (force-déplacement) en compression statique des mousses polyuréthane grise (originale et transformée) se déroule en trois phases, une phase linéaire suivie d'un plateau et en fin une phase de densification ou la force augmente rapidement avec l'augmentation du déplacement. La phase linéaire des mousses transformées est faible par rapport à celle des mousses originales. La perte de charge F/F_0 jusqu'à 800 000 cycle se déroule en trois phases : la première est caractérisée par une forte réduction de F/F_0 dès les premiers cycles ceci est lié à la distorsion des brins des cellules, alors que pendant la deuxième phase la dégradation est plus progressive est lente et atteindre un comportement plateau. Cependant, la troisième phase se caractérise par un comportement alternatif entre un accroissement et décroissement de la perte de rigidité qui peut être due aux variations de température entre le jour et la nuit. L'énergie dissipée par unité de volume (mJ/cm^3) en fonction du nombre de cycles se déroule en deux phases : La première correspond à une forte diminution jusqu'à environ 20000 cycles, tandis que la deuxième phase est liée à une diminution très lente est un comportement plateau en raison de la stabilité de la déformation des brins des cellules.

References

- [1] S. Kishimoto, N. Shinya New fabrication method for metallic closed cellular materials containing polymers, *Materials and Design* 22 (2001) 535_539.
- [2] S. Norio Shinya, Compressive behavior of micro-metallic closed cellular materials fabricated by spark-plasma sintering, *Materials Science and Engineering A* 483-484 (2008) 679-682.
- [3] X. Huang , A. Radman, Y.M. Xie, Topological design of microstructures of cellular materials for maximum bulk or shear modulus, *Computational Materials Science* 50 (2011) 1861-1870.
- [4] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, P. Canavan, G. Warner, Effet of defect on elastic-plastic behaviour of cellular materials, *Materials Science and Engineering A* 487 (2008) 558-567.

- [5] R. S. Branchel, LAKES, negative Poisson's ratio polyurethane foams, *Journal of Materials Science* 36 (2001) 5885-5893.
- [6] M. Vesenjak, A. Öchsner, Zoran Ren, Characterization of open-cell cellular material structures with pore fillers, *Materials Letters* 62 (2008) 3250-3253.
- [7] M. Antonio de Lucas, Juan F. Rodríguez, Recovery of polyols from flexible polyurethane foam by "split-phase" glycolysis with new catalysts, *Polymer Degradation and Stability* 91 (2006) 894-901.
- [8] A. Bezazi., F. Scarpa: Mechanical behaviour of conventional and negative Poisson's ratio thermoplastic polyurethane foams under compressive cyclic loading, *International Journal of Fatigue* 29 (2007) 922-930.
- [9] A. Bezazi, F. Scarpa, Tensile fatigue of conventional and negative Poisson's ratio open cell PU foams, *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 488-494.
- [10] A. Bezazi, N. Frioui, F. Scarpa, Tensile static, fatigue and relaxation behaviour of closed cell electret PVDF foams, *Mechanics of Materials* 43 (2011) 459-466.
- [11] X Badiche, S. Forest, T. Guibert, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout, P. Jenny M. Croset, H. Bernet, Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams: application of the mechanics of cellular solids and of porous materials, *Materials Science and Engineering A289* (2000) 276-288.
- [12] S.A. McDonald, N. Ravirala, P.J. Withersa and A. Alderson, In situ three-dimensional X-ray microtomography of an auxetic foam under tension, *Scripta Materialia* 60 (2009) 232-235.
- [13] K. Bouchahdane, *Elaboration et caractérisation mécanique des mousses polyuréthane*, mémoire de magister université de Guelma, 2012.
- [14] Gibson L.J. and Ashby M.F. *Cellular Solids - Structure and properties*, Cambridge University Press, 2nd edition, 2001.
- [15] M. Bianchi, *Open cell PU-PE Auxetic foams: structural and dynamic aspects*, these de doctorat (2010), Department of Aerospace Engineering University of Bristol.
- [16] N. Frioui; *élaboration et caractérisation des mousses PVDF* Thèse de doctorat (2011), université de 08 mai 1945 Guelma.
- [17] M.A. Di Prima, K. Gall, D.L. McDowell, R. Guldberg, A. Lin, T. Sanderson, D. Campbell, S.C. Arzberger, *Cyclic compression behaviour of epoxy shape memory polymer foam*, *Mechanics of Materials*, Volume 42, Issue 4, April 2010, Pages 405-416.
- [18] Virginie GOUSSERY-VAFIADÈS (2004), *caractérisation microstructurale et mécanique des mousses de nickel à cellules ouvertes pour batteries de véhicules hybrides*, Thèse de doctorat (2004), Centre des Matériaux P.M. Fourt de l'Ecole des Mines de Paris.
- [19] M. Bianchi, F. Scarpa, M. Banse, C.W. Smith: *Novel generation of auxetic open cell foams for curved and arbitrary shapes*; *Acta Materialia* 59 (2011) 686-691