

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/338898911>

Élaboration et caractérisation mécanique des mousses polymères : application aux projectiles non létaux

Conference Paper · November 2018

DOI: 10.4000/books.oep.332

CITATIONS

0

READS

12

6 authors, including:



Boumdouha Noureddine

Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

5 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Zitouni Safidine

military polytechnic school

18 PUBLICATIONS 54 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Achraf Boudiaf

Ecole Militaire Polytechnique

16 PUBLICATIONS 25 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



advanced materials and nanotechnology [View project](#)



Dissimilar welding [View project](#)

Élaboration et caractérisation mécanique des mousses polymères : application aux projectiles non létaux

BOUMDOUHA Nouredine*^a, SAFIDINE Zitouni ^a, BOUDIAF Achraf ^a, OUKARA Amar ^a, TRIA Djalel Eddine ^a, LOUAR Abderouf ^a

^a Ecole Militaire Polytechnique BP17 - 16046 Bordj El-Bahri, Algiers, Algeria.

BOUMDOUHA Nouredine

Laboratoire Génie des matériaux /UER MS/EMP

E-mail:boumdouhanouredine@gmail.com

SAFIDINE Zitouni

Laboratoire de Chimie Macromoléculaire /UER physico-chimie des matériaux / EMP

BOUDIAF Achraf

Laboratoire Génie des Matériaux /UER MS/ EMP

OUKARA Amar

LDMS /UER MS/ EMP

DJALELEDDINE Tria

LDMS /UER MS/ EMP

LOUAR Abderouf

LDMS /UER MS/ EMP

Résumé—Pour la fabrication des mousses polyuréthanes d'une certaine densité, nous cherchons à contrôler le mieux possible la formation d'une microstructure de sorte que le produit final ait les propriétés souhaitées pour projectiles non létaux. Ces derniers doivent être en mesure de mettre hors d'état de nuire une cible sans pour autant provoquer une blessure permanente ou une issue fatale. Ce travail a pour objectif l'élaboration et la caractérisation mécanique de différentes mousses polyuréthanes élaborés par la formulation optimale. La caractérisation mécanique concerne des tests de compression quasi statique. Par ailleurs, une analyse microscopique a été effectuée afin de confirmer la structure en cellules ouvertes de la mousse élaborée.

Mots clés—Mousses polyuréthane, Compression, Charge, Projectiles non létaux.

I. INTRODUCTION

Les projectiles non létaux sont utilisés afin de neutraliser et mettre hors de combat des personnes dans certaines situations telles que les émeutes, le contrôle de foule et l'interception d'embarcation maritimes suspectes. Ils offrent une alternative pour une réponse adéquate en garantissant une neutralisation sans pour autant provoquer des blessures permanentes pour les cibles visées. Il existe toute une panoplie de produits sur le marché. Néanmoins, aucune étude n'est effectuée, au préalable, afin de lier les propriétés des matériaux utilisés aux niveaux lésionnels engendrés par l'utilisation de ces projectiles. En effet, différents cas rapportés font état de blessures graves, voire de décès, suite à l'emploi de ce genre de projectiles. Il est, donc, primordial d'associer le processus de fabrication à l'évaluation du risque lésionnel de ces projectiles afin d'éviter toute situation qui serait contraire à la doctrine d'emploi des armes non létales à projectile.

Les polyuréthanes ont été utilisés dans divers domaines et sont un des groupes les plus importants de matières plastiques en raison de leur polyvalence. Le marché a déjà atteint des

chiffres de consommation, au niveau mondial, de l'ordre de 8,5 millions de tonnes en l'an 2000. Afin d'utiliser efficacement et en toute confiance le matériau à des fins structurelles, il est essentiel d'avoir une connaissance fiable des propriétés du matériau et de son comportement. Lorsque les propriétés d'un matériau de structure ne sont pas connues ou mal représentées, il y aura une utilisation potentiellement inappropriée et catastrophique, occasionnant des conséquences dangereuses. Les mousses polymères présentent des caractéristiques très intéressantes pour une large gamme d'application. La caractérisation du comportement de ces mousses au vu d'un usage particulier ne peut donc se faire sans une connaissance de l'application, à savoir le mode de sollicitation visé. Cette connaissance permettra de définir à partir d'une campagne d'essais de laboratoire aussi représentative que possible, les mécanismes de déformations. Des essais mécaniques rigoureux doivent être réalisés afin de mieux comprendre le comportement de la mousse dans des scénarios courants de charge structurale. Le choix du type d'essais a été fait en fonction des sollicitations mécaniques que subissent au cours d'utilisation les mousses qui sont, en générale, sollicités en compression. Les méthodes de test les plus fréquemment utilisées pour l'analyse des matériaux cellulaires souples sont standardisées dans la norme ASTM D3574 [1] [2]. Cette norme contient les méthodes de pré-conditionnement des échantillons de mousse et la description des procédures analytiques pour l'analyse des propriétés physiques telles que la densité, la résistance à la rupture, la résistance à la déchirure, le flux d'air, la résilience, la résistance à la compression et la déformation permanente.

D'un point de vue synthèse, les polyuréthanes alvéolaires sont obtenus par un polyisocyanate avec un polyol. Cette classe de polymères peut déboucher sur des mousses souples, rigides ou semi-rigides suivant la composition et la structure des réactifs utilisés. Dans ce travail, on propose une étude sur le comportement d'une mousse polyuréthane à porosité

ouverte sous compression quasi statique. Souvent les mousses polyuréthane flexibles à cellules ouvertes sont exposées à la compression et à une charge monotone à base de laquelle des tests de compression ont été choisis pour l'évolution de la charge en fonction du déplacement. Le module de Young et le coefficient de Poisson et la perte de rigidité en fonction du nombre de cycle ont été identifiés.

II. METHODES EXPERIMENTALES

ELABORATION DES PUR(S):

La confection des mousses polyuréthanes consiste à élaborer de nouveaux matériaux avec des propriétés améliorées par rapport à celles des polymères constitutifs de base. Chaque fabricant de mousse polyuréthane garde jalousement sa recette de composants principaux, dérivés du pétrole (polymères) comme le polyol et l'isocyanate (catalyseur). En effet, le mélange des composants polymères, du catalyseur sont d'abord émulsionnés et étendus en épaisse couche sur un tapis roulant. Cette couche liquide commence immédiatement à lever comme une pâte à pain. La réaction chimique produit un fort dégagement de chaleur. Cette vapeur d'eau s'élève par sa légèreté et sa pression augmente. L'effet expansif ou gonflement de la pâte devient ainsi de plus en plus spongieuse. Il existe bien entendu plusieurs recettes et donc plusieurs types de mousses polyuréthanes. Le procédé de fabrication est le même : seules les caractéristiques souhaitées par le fabricant (Densité, élasticité, résistance) déterminent le dosage de la mixture. La mousse polyuréthane est plus spongieuse avec des alvéoles plus grandes permettant une meilleure circulation d'air [3].

L'obtention de la formulation optimale du PUR par l'expansion libre a été effectuée tout d'abord dans des petits gobelets sous faibles vitesses d'agitation (1000 tr/min). L'ensemble des formulations est résumé dans les 6 principales formulations. Après chaque étape on rectifie la formulation en se basant sur l'aspect de la mousse obtenu, la formulation optimale sur le tableau 1. Les additifs sont des matières qui, ajoutées à un polymère, modifient ses propriétés ou ses caractéristiques. Quelques additifs compris dans la mousse polyuréthane sont donnés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1 QUELQUES ADDITIFS COMPRIS DANS LE MOUSSE DU POLYURÉTHANE

	<i>Polyol (g)</i>	<i>PMDI (g)</i>	<i>Catalyseur (g)</i>	<i>Glycérin (g)</i>	<i>Silicium (g)</i>	<i>Bentonite (g)</i>	<i>Dichloromethane (g)</i>	<i>PEG (g)</i>	<i>Alumine (g)</i>
<i>Formulation Ep_1</i>	100	51,61	1,48	2,21	1,32	0	1,19	2	0

<i>Formulation Ep_2</i>	100	42,09	2,11	3,71	3,51	17,81	0	0	0
<i>Formulation Ep_3</i>	100	44,94	2,14	3,68	2,50	17,84	0	0	0
<i>Formulation Ep_4</i>	100	47,44	1,57	3,69	2,48	5,66	0	0	0
<i>Formulation Ep_5</i>	100	40,88	23,22	3,77	2,11	0	2,11	0	39
<i>Formulation Ep_6</i>	100	40,36	2,64	1,54	4,17	0	1,24	1,69	0

L'élaboration des PUR(s) en mode expansion libre, c'est-à-dire à pression atmosphérique en utilisation, se fait en utilisant un réacteur de 300 ml de volume et malaxage du mélange réactionnel à l'aide d'un agitateur mécanique atteignant la vitesse de 2500 tr/min et après épaississement du PUR et son refroidissement, on procède à son démoulage. En la reproduisant dans un béccher plus volumineux en téflon on aboutit à une mousse ayant l'aspect la Figure 1.



Fig. 1.a) Évolution des échantillons b) La forme finale après 24 heures

Les propriétés finales de la mousse polyuréthane dépendent des composants chimiques, de l'agent gonflant, des conditions du procédé et de la nature des parements du moule. Grâce aux développements constants de nouvelles formulations, les mousses polyuréthanes sont aujourd'hui fabriquées avec une grande variété de textures et de duretés. Plusieurs éprouvettes ont été fabriquées en se basant sur différentes formulations. Six séries d'éprouvettes ont été utilisées pour des essais de compression dans deux différents sens de coupe, c'est-à-dire la découpe des blocs de mousses en éprouvettes est effectuée dans le sens vertical et dans le sens horizontal (Figure 2). Ceci est effectué dans le but de mettre en évidence l'effet de la variation de la direction d'usinage sur le comportement mécanique compression statique.

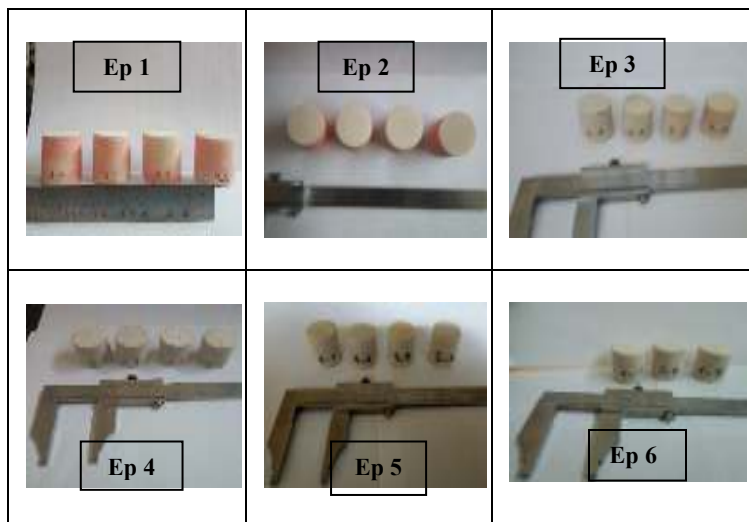


Fig. 2. Gamme des éprouvettes fabriquée respectivement sur la formulation mousse polyuréthane.

Six séries d'échantillons ont été, donc, testés en compression. Chaque série comprend quatre éprouvettes de forme cylindrique préparées à partir de formulations connues. L'échantillon est comprimé entre les deux plateaux de compression de l'appareil jusqu'à une déformation établie. La variation de la contrainte appliquée pour déformer l'échantillon est mesurée par un capteur de force et enregistrée tout au long de la déformation. Grâce à l'analyse des données, les valeurs de la contrainte sont visualisées en fonction des valeurs de la déformation. L'appareil utilisé pour les tests en compression est un dynamomètre 40 T utilisable en traction comme en compression. Les tests mécaniques en compression ont été réalisés suivant la norme ASTM D3574 [4]. Ce test consiste à comprimer l'échantillon jusqu'à 80% de son épaisseur spécifique à une vitesse de déplacement de 2 mm/min. La compression est maintenue pour une durée de 900 secondes. La courbe contrainte-déformation et la valeur finale de la contrainte après les soixante secondes, définie comme résistance à la compression, sont enregistrées. La valeur du module de Young (E) est

calculée par le logiciel d'acquisition selon la loi de Hooke. Cette machine est pilotée par un ordinateur autorisant le lancement des essais et l'acquisition des données par l'intermédiaire du logiciel merlin qui permet la programmation de cycles complexes et le pilotage des essais avec différentes vitesses en contrôlant la force ou le déplacement. Il est recommandé d'utiliser les constantes d'ingénieur quand on analyse la réponse contrainte-déformation des mousses même pour les grandes déformations. A cet effet, nous avons donc mesuré les dimensions de chaque éprouvette juste avant l'essai [5]. L'analyse microstructurale a été effectuée à l'aide d'un microscope optique.

III. RESULTATS

a) CARACTERISATION MECANIQUE D'UNE MOUSSE POLYURETHANE

La courbe force-déplacement caractéristique d'une mousse de polyuréthane (Figure 4) montre les trois régimes de déformation typiques des matériaux viscoélastiques. La première partie de la courbe est linéaire et correspond au régime élastique. Au moment de la suppression de la contrainte, la déformation de l'échantillon est complètement réversible. Après la limite d'élasticité, qui correspond à la fin de la partie linéaire, la courbe contrainte-déformation montre un long palier à contrainte presque constante. Cette partie correspond au régime plateau. Elle est associée à la déformation plastique de la structure et, dans le cas d'une mousse de polyuréthane fragile, à la rupture des parois des cellules. Lorsque la déformation augmente, les parois des cellules entrent en contact les unes avec les autres. Lorsque tous les vides sont remplis, la résistance de la mousse augmente rapidement, de manière proportionnelle à la contrainte mesurée. Cette dernière partie de la courbe est connue comme le régime de densification [7]. La courbe représentative de la compression des solides cellulaires, que ce soit élastomère ou plastique, montre une phase linéaire suivie d'un plateau de la charge (force) et une phase de densification où la charge augmente considérablement avec le déplacement. Ce comportement en trois stades est en bonne concordance aussi avec les travaux de Goussri [8]. Une légère dispersion est observée entre les six éprouvettes effectuées dans les mêmes conditions d'élaboration et de tests. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi et Scarpa [9].

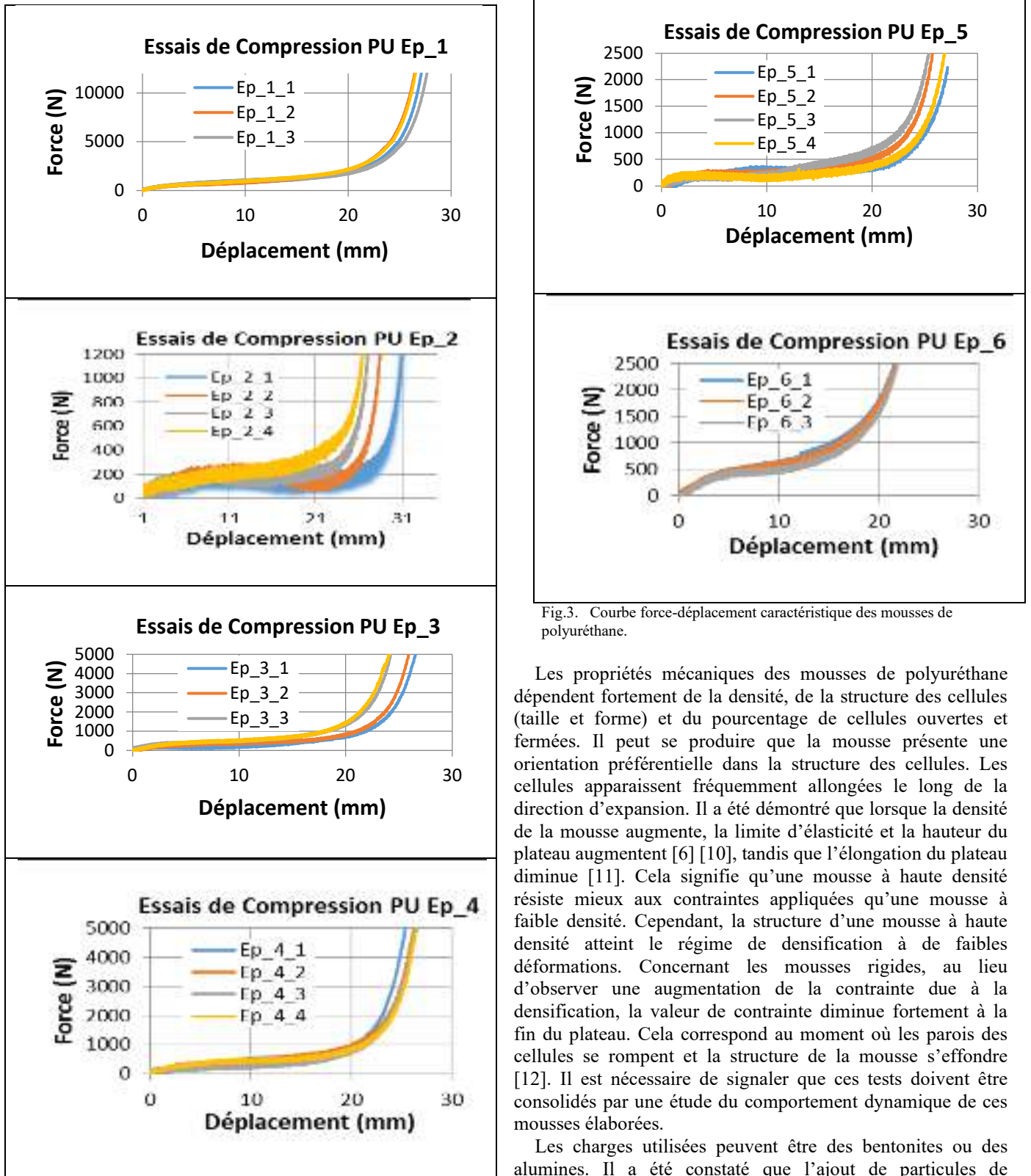


Fig.3. Courbe force-déplacement caractéristique des mousses de polyuréthane.

Les propriétés mécaniques des mousses de polyuréthane dépendent fortement de la densité, de la structure des cellules (taille et forme) et du pourcentage de cellules ouvertes et fermées. Il peut se produire que la mousse présente une orientation préférentielle dans la structure des cellules. Les cellules apparaissent fréquemment allongées le long de la direction d'expansion. Il a été démontré que lorsque la densité de la mousse augmente, la limite d'élasticité et la hauteur du plateau augmentent [6] [10], tandis que l'élongation du plateau diminue [11]. Cela signifie qu'une mousse à haute densité résiste mieux aux contraintes appliquées qu'une mousse à faible densité. Cependant, la structure d'une mousse à haute densité atteint le régime de densification à de faibles déformations. Concernant les mousses rigides, au lieu d'observer une augmentation de la contrainte due à la densification, la valeur de contrainte diminue fortement à la fin du plateau. Cela correspond au moment où les parois des cellules se rompent et la structure de la mousse s'effondre [12]. Il est nécessaire de signaler que ces tests doivent être consolidés par une étude du comportement dynamique de ces mousses élaborées.

Les charges utilisées peuvent être des bentonites ou des aluminés. Il a été constaté que l'ajout de particules de carbonate de calcium de taille inférieure à celles des cellules de la mousse fait augmenter la valeur du module initial dans la courbe contrainte-déformation. En revanche, si les dimensions des particules ajoutées sont supérieures à celles des cellules, le

renforcement n'est pas efficace [13]. Les mousses polyuréthanes se composent d'un mélange de domaines rigides et de domaines souples. L'augmentation de la température ou de l'humidité détériore de manière significative les propriétés mécaniques des mousses [14]. Cette perte de propriétés mécaniques correspond à une diminution de la résistance à la compression et elle est probablement liée à la scission des chaînes appartenant aux domaines rigides (liaisons urée et uréthane) et à la rupture des liaisons hydrogènes [15].

La détermination de la densité apparente des différentes mousses polyuréthanes étudiées consiste à la pesée des échantillons par une balance électronique d'une précision de 0,01 g et au calcul du volume des éprouvettes. Les résultats moyens obtenus pour les mousses polyuréthane non transformé (original) sont présentés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2 CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS AVANT ET APRES ESSAIS DE COMPRESSION

		Longueur (mm)	Longueur après la compression (mm)	Diamètre (mm)	Diamètre après la compression (mm)	Densité (g/cm ³)	Densité après la compression (g/cm ³)
Mousse polyuréthane Ep_1	Ep_1_1	35,6	30	35,5	31	0,32319	0,502829
	Ep_1_1	35,5	30,5	35,7	33	0,342642	0,467203
	Ep_1_3	35,5	30	36,5	33	0,312618	0,452522
	Ep_1_4	35,4	30	35,9	33,2	0,320856	0,442407
Mousse polyuréthane	Ep_2_1	34,72	34,41	34,2	32,61	0,077155	0,0858

	Ep_2_2	32,5		32,41	33,22	0,08353	0,079858
	Ep_2_3	30,72	30,42	34	32,34	0,077235	0,086258
	Ep_2_4	30	30	31,51	30,3	0,073129	0,079193
Mousse polyuréthane Ep_3	Ep_3_1	32,31	32	32,71	32,5	0,232891	0,238251
	Ep_3_2	31,68	32,31	31,6	31	0,236227	0,240609
	Ep_3_3	30,01	30	32	32,71	0,240357	0,229969
	Ep_3_4	30,4	30	32	33	0,277914	0,264983
Mousse polyuréthane Ep_4	Ep_4_1	32,36	32,1	32,4	32,66	0,239869	0,238124
	Ep_4_2	32,48	32,16	32,58	33	0,231713	0,228031
	Ep_4_3	32,58	32	32,6	33,1	0,2313	0,22823
	Ep_4_4	32,3	31	32	32,58	0,229195	0,23051
Mousse polyuréthane Ep_5	Ep_5_1	33,16	32,56	33,1	33,06	0,163571	0,16714
	Ep_5_2	31,18	30,4	31,78	33,28	0,182628	0,170536
	Ep_5_3	31	30,42	31,4	33,1	0,185302	0,170035
	Ep_5_4	32,66	32	32,1	32,94	0,175933	0,170512

Mousse polyuréthane Ep_6	Ep_6_1	32,58	32,18	32,66	33,56	0,340041	0,326211
	Ep_6_2	33,64	33,28	33,14	34	0,329122	0,316415
	Ep_6_3	35,6	32	32,48	33,36	0,343399	0,329934

b) CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE

Les résultats de caractérisation microstructurale de la mousse polyuréthane utilisée comme matériau de référence sont présentés dans la Figure 3. L'image obtenue par microscope optique montre une mousse à cellules partiellement ouvertes non totalement close par sa paroi et communiquant avec d'autres alvéoles ou avec l'extérieur. Des membranes cellulaires sont visibles entre les parois de certaines cellules. Toutefois, la majorité des cellules montrent l'absence de membranes. La mousse à cellules ouvertes ou partiellement ouvertes est généralement une mousse souple ou semi-souple. Dans notre cas, la structure à cellules partiellement ouvertes est en accord avec la nature souple de la mousse.

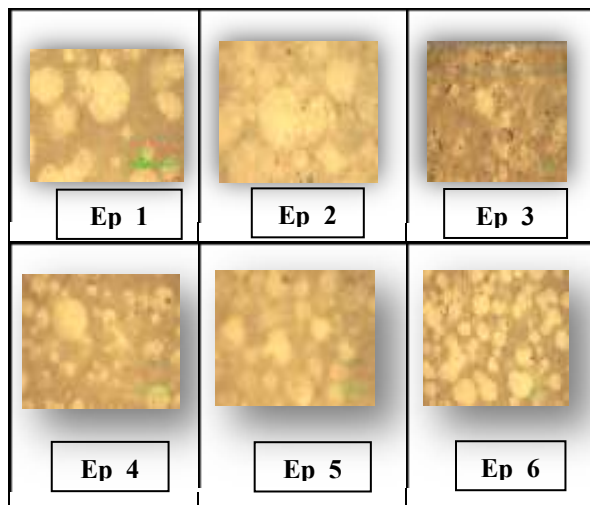


Fig.4. Image cellulaire de polyuréthane.

IV. CONCLUSION

Il est proposé dans cet article, l'élaboration et la caractérisation de différentes mousses polyuréthanes en vue de les utiliser comme matériaux de base pour les projectiles non létaux. Premièrement, différents échantillons ont été

élaborés à partir de formulations connus. Des tests de compression quasi-statique et une analyse microstructurale ont été effectués. Les résultats des tests de compression ont montré un comportement typique des matériaux viscoélastiques en trois phases : déformation élastique linéaire, plateau et densification. L'analyse microstructurale a mis en évidence la nature en cellules ouvertes de la mousse élaborée. Il est envisagé d'effectuer des tests en compression dynamique afin d'évaluer le comportement des mousses lors de l'impact. Par ailleurs, une amélioration de processus d'élaboration est nécessaire afin d'assurer une meilleure respectabilité des caractéristiques des mousses étudiées.

References

- [1] M. W. Quintero, J. A. Escobar, A. Rey, A. Sarmiento, C. R. Rambo, A. P. Novaes de Oliveira, and D. Hotza. Flexible polyurethane foams as templates for cellular glass-ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (12–13):5313–5318, 2009.
- [2] M. Sonnenschein, B. L. Wendt, A. K. Schrock, J.-M. Sonney, and A. J. Ryan. The relationship between polyurethane foam microstructure and foam aging. *Polymer*, 49(4):934–942, 2008.
- [3] Abderrezak BEAZI, FABRISIO SCARPA: Tensile fatigue of conventional and negative Poisson's ratio open cell PU foams, *international journal of fatigue* 31 (2009) 488-494.
- [4] ASTM. Standard d3574-03, standard test methods for flexible cellular materials - slab, bonded and molded urethane foams, 2003 2003.
- [5] Gibson L.J. and Ashby M.F. *Cellular Solids - Structure and properties*. Cambridge University Press, 2nd edition, 2001.
- [6] L. Gong, S. Kyriakides, and W. Y. Jang. Compressive response of open-cell foams. part i : Morphology and elastic properties. *International Journal of Solids and Structures*, 42(5–6) :1355–1379, 2005.
- [7] A.-M. Harte, N.A. Fleck, M.F. Ashby: The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core, *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 499–507.
- [8] 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
- [9] A bderrezak Bezazi, Fabrizio Scarpa: Mechanical behaviour of conventional and negative Poisson's ratio thermoplastic polyurethane foams under compressive cyclic loading (2007) 922-930
- [10] F. Saint-Michel, L. Chazeau, J.-Y. Cavaillé, and E. Chabert. Mechanical properties of high density polyurethane foams : I. effect of the density. *Composites Science and Technology*, 66(15) :2700–2708, 2006.
- [11] M. C. Saha, H. Mahfuz, U. K. Chakravarty, M. Uddin, Md E. Kabir, and S. Jeelani. Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams. *Materials Science and Engineering : A*, 406(1–2) :328–336, 2005.
- [12] H. Jin, W.-Y. Lu, S. Scheffel, T. D. Hinnerichs, and M. K. Nielsen. Full-field characterization of mechanical behavior of polyurethane foams. *International Journal of Solids and Structures*, 44(21) :6930–6944, 2007.
- [13] F. Saint-Michel, L. Chazeau, and J.-Y. Cavaillé. Mechanical properties of high density polyurethane foams : II effect of the filler size. *Composites Science and Technology*, 66(15) :2709–2718, 2006.
- [14] D. V. Dounis and G. L. Wilkes. Structure-property relationships of flexible polyurethane foams. *Polymer*, 38(11) :2819–2828, 1997.
- [15] J. C. Moreland, G. L. Wilkes, and R. B. Turner. Viscoelastic behavior of flexible slabstock polyurethane foams : Dependence on temperature and relative humidity. i. tensile and compression stress (load) relaxation. *Journal of Applied Polymer Science*, 52(4) :549–568, 1994.