

Comportement mécanique d'une mousse de polyuréthane sous sollicitations statiques et dynamiques

Hamza El Yamani^a, Jean-Luc Hanus^a, Huabin Zeng^a, Patrice Bailly^a,
Gaëtan Prod'Homme^b, et Benjamin Le-Roux^b

a. INSA Centre Val de Loire, Univ. Orléans, Univ. Tours, LaMé EA7494, 88, Boulevard
Lahitolle, 18000 Bourges, France

b. INERIS, Parc Technologique ALATA, 60550 Verneuil-en-Halatte, France
hamza.el_yamani@insa-cvl.fr

Résumé :

Qu'elles soient d'origine accidentelle ou malveillante, les explosions sur un site industriel peuvent prendre des proportions dramatiques. Un moyen économique de répondre au besoin de protection pourrait être d'utiliser des matériaux développés pour l'isolation thermique afin d'atténuer les effets mécaniques de l'onde de souffle. Dans cet article, nous nous intéressons au comportement mécanique d'une mousse de polyuréthane de très faible densité (30 kg/m^3). Pour étudier la sensibilité à la vitesse des différentes caractéristiques mécaniques de la mousse que sont la contrainte seuil, la contrainte plateau moyenne et la déformation à la densification, des essais de compression quasi-statiques et dynamiques aux barres de Hopkinson sont réalisés. Une attention particulière est apportée au suivi des champs de déformation des échantillons dont la réponse, même pour les faibles vitesses de déformation, s'avère hétérogène.

Mots clefs : Mousse de polyuréthane, comportement mécanique, essais confinés, SHPB, mesures de champs, effets de surpression

Abstract :

Even if provisions have been made to reduce risk, the hazard of an explosion with disastrous effects cannot be totally eliminated. The use of blast walls made with thermal insulating materials could be an economic and efficient way to mitigate the effects of the blast wave. In this paper, the mechanical response of a very low density polyurethane foam (30 kg/m^3) to compression is examined experimentally. Static compressive tests are conducted with a press and Split Hopkinson Pressure Bars (SHPB) are used to characterize the dynamic behavior. In addition to traditional strain gauges measurements, the Digital Image Correlation (DIC) technique is used to observe the inhomogeneous strain fields.

Key Words : Polyurethane foam, mechanical behavior, confined test, SHPB, full-field measurements, blast mitigation

1 Introduction

La réduction des risques, sur et autour des sites Seveso et face aux sollicitations de malveillance, passe par la sécurisation des bâtiments et équipements aux sollicitations dynamiques de type surpression et impact. Les solutions technologiques les plus courantes reposent sur l'utilisation de revêtements sacrificiels. Ces bardages simple ou double peau sont constitués d'une âme compactable positionnée entre une ou deux plaques métalliques. Les plaques servent à répartir l'effort et à augmenter la raideur à la flexion, tandis que l'âme constituée d'un matériau alvéolaire est présente pour absorber l'énergie [1]. Une solution économique, permettant d'allier protection et efficacité énergétique, pourrait être d'utiliser comme matériaux alvéolaires, ceux destinés à l'isolation thermique. Parmi les différents isolants thermiques, les plastiques alvéolaires - mousse de polystyrène expansé, mousse de polystyrène extrudé et mousse de polyuréthane - ont représenté plus de 40% de la surface posée en 2017 et sont retenus comme matériaux de référence pour cette étude.

Le comportement mécanique des mousses polymères a fait l'objet de nombreuses études et le livre de Gibson et Ashby en fait une large synthèse [1]. Si leur comportement statique est ainsi relativement bien connu, il n'en est pas de même de leur comportement dynamique notamment pour des mousses de très faible densité. Les capacités d'absorption d'énergie des mousses polymères ont été étudiées en utilisant différentes techniques comme la tour de chute, l'essai Charpy modifié ou l'impact de masses propulsées par un canon à air [2, 3, 4]. Mais c'est seulement avec l'utilisation du dispositif des barres de Hopkinson que la sensibilité à la vitesse du comportement mécanique a commencé à être décrite. Pour tenir compte de la faible résistance et de la faible impédance mécanique du matériau, des barres en nylon ou des barres en aluminium, instrumentées avec des cellules de charges à quartz, ont été utilisées [5, 6]. Qu'il s'agisse des essais statiques ou des essais dynamiques, une difficulté supplémentaire apparaît quant à l'identification du comportement du matériau en raison de la non-satisfaction des hypothèses d'homogénéité des champs de déformation et/ou de contrainte dans l'échantillon. Le support de techniques d'imagerie et d'analyse par corrélation d'images numériques pour accéder à la répartition spatiale des champs devient indispensable [7].

2 Matériel et méthodes

2.1 Mousse polyisocyanurate

Dans cet article, pour mettre en place le protocole d'étude, une catégorie particulière de mousse polyuréthane est étudiée. Cette mousse polyisocyanurate (PIR) est commercialisée sous forme de panneaux isolants d'épaisseur 6 cm. Elle présente une très faible conductivité thermique $0.022 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une masse volumique de 30 kg m^{-3} . Du point de vue morphologique, il s'agit d'une mousse polymère rigide à cellules fermées (fig. 1). En assumant une masse volumique pour le polyuréthane non alvéolaire de 1200 kg m^{-3} [1], sa densité relative est de 0.025 ce qui permet donc de la classer dans la catégorie des mousses de très faible densité.

2.2 Essais statiques

Les propriétés mécaniques statiques de la mousse de polyuréthane sont étudiées au travers d'essais statiques de compression uniaxiale avec une machine universelle MTS équipée d'un

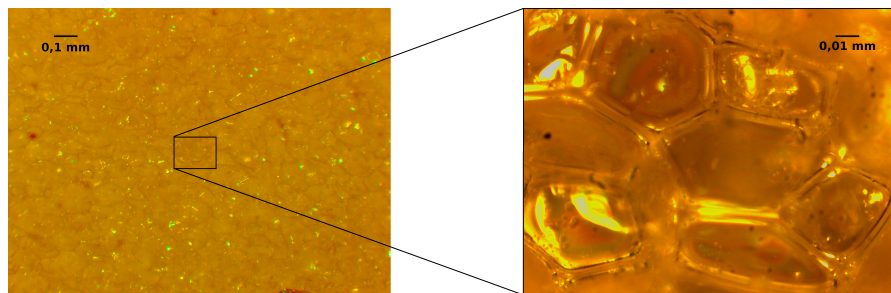


FIGURE 1 – Vue microscopique de la mousse de polyuréthane dans la direction de croissance

capteur d'effort de 5 kN à des vitesses de 10%/min, conformément à la norme EN 826 [8], mais également de 100%/min et 1000%/min. Des échantillons sont découpés dans la direction de croissance de la mousse et dans deux directions transversales perpendiculaires. Un lubrifiant sec au PTFE est vaporisé sur les plateaux de compression et sur les faces supérieures et inférieures des échantillons pour limiter les frottements. Pour améliorer l'analyse des essais, ceux-ci sont filmés avec une caméra à haute résolution (Prosilica GX 6600 29 Mpixels) munie d'un objectif télécentrique. La majorité des échantillons ont une géométrie cylindrique, de diamètre 59.5 mm et d'élanement 1. Pour faciliter l'analyse par corrélation d'images, des échantillons parallélépipédiques à section carrée de côtés 65 à 69 mm et de hauteurs 56 à 59.5 mm sont également utilisés. Même si la mousse possède une texture aléatoire marquée, pour éviter des problèmes de reflets sur les membranes des cellules, un mouchetis de peintures mates, blanches et noires, est projeté sur la surface des échantillons.

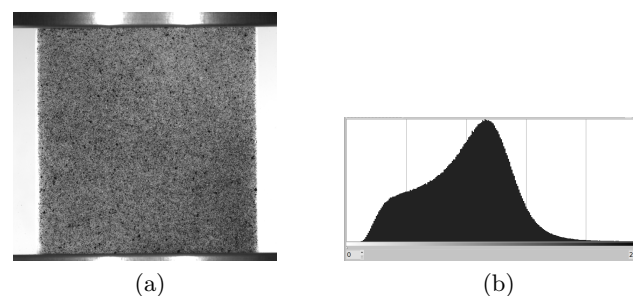


FIGURE 2 – Essai de compression : échantillon prismatique et histogramme des niveaux de gris

Dans le cadre d'une utilisation comme dispositif d'atténuation des effets d'une onde de souffle, la mousse alvéolaire sera comprimée dans le sens de croissance suivant un mode de déformation uniaxiale, en conséquence des essais de compression oedométrique sont également réalisés. Le confinement est réalisé au moyen de cylindres en polycarbonate.

2.3 Essais dynamiques

La sensibilité à la vitesse de la mousse est étudiée au moyen d'essais de compression dynamiques réalisés avec des barres de Hopkinson. Compte tenu de la très faible impédance acoustique ($Z = \sqrt{\rho E}$) attendue pour les échantillons, des barres en nylon ($E = 3.3 \text{ GPa}$, $\rho = 1150 \text{ kg m}^{-3}$) de diamètre 21 mm sont utilisées. En raison du comportement viscoélastique du nylon, le transport des ondes et la correction de dispersion sont effectués avec le logiciel DAVID [9]. Les

échantillons sont des cylindres de diamètre 20 mm et une cellule en polycarbonate est utilisée pour réaliser les essais confinés. Comme en statique, les essais sont suivis par imagerie au moyen d'une caméra Photron SA5 et un mouchetis est déposé sur les échantillons pour permettre de réaliser de la corrélation d'images numériques.

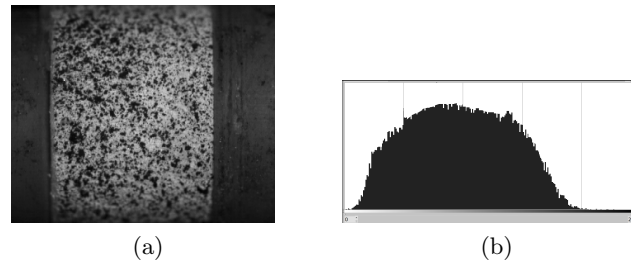


FIGURE 3 – Essai de compression dynamique : échantillon et histogramme des niveaux de gris

3 Résultats et discussion

3.1 Essais de compression statiques

Les essais de compression statique dans le sens de croissance de la mousse permettent de mettre en évidence les trois phases caractéristiques du comportement en compression d'un matériau alvéolaire à cellules fermées [1] : phase linéaire associée à la déformation élastique des cellules, long plateau associé au flambement des arêtes des cellules avec une faible pente positive associée à la présence du gaz piégé dans les cellules et une phase de densification (fig. 4a et 4b).

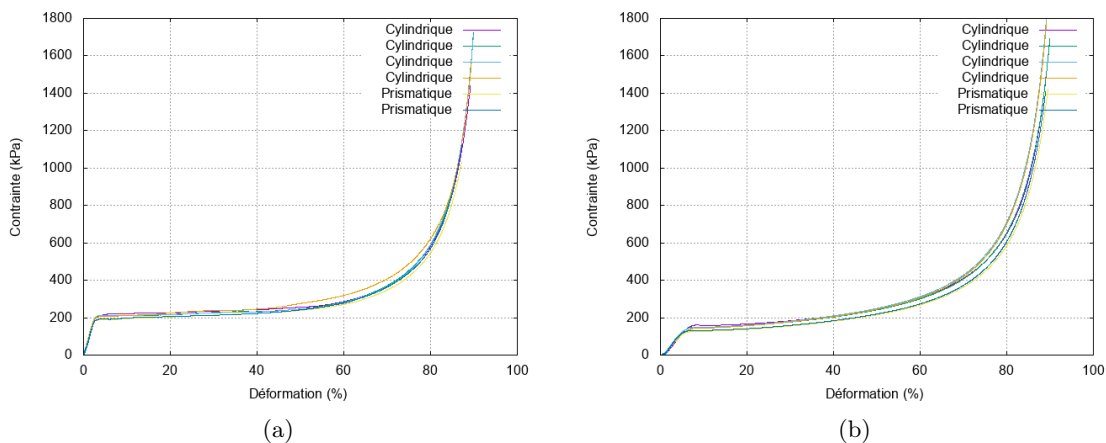


FIGURE 4 – Répétabilité des essais pour des échantillons cylindriques et parallélépipédiques : (a) compression dans le sens de croissance et (b) dans les deux directions transverses

Ces résultats mettent également en évidence la bonne reproductibilité des essais et l'indépendance de ceux-ci vis-à-vis de la géométrie de l'échantillon. Les essais dans deux directions perpendiculaires à la direction de croissance mettent en évidence l'isotropie transverse du matériau dans sa réponse élastique et dans la phase d'écrasement, les différences dans la phase de densification étant moins marquées. L'analyse des films des essais met en évidence une autre différence significative entre les essais. La déformation se localise fortement dans une ou plusieurs bandes pour les essais de compression dans la direction de croissance avec apparition

d'un flambement global très marqué (fig. 5a et 7a). A contrario, la déformation apparaît plus diffuse dans les directions transverses et seul un très léger flambement global est observé (fig. 5b et 7b). Des observations similaires avaient déjà été effectuées par Tu et al. [10] sur une mousse de polyuréthane de faible densité, mais les auteurs avaient conclu que la déformation était diffuse dans le sens transverse alors qu'elle est seulement moins localisée dans notre cas. Cette différence de comportement peut également s'observer à la décharge des échantillons (fig. 6a, 8a, 6b et 8b).

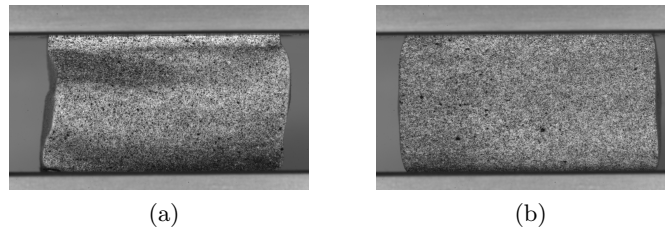


FIGURE 5 – Prisme - modes de déformation : (a) sens de croissance, (b) sens transverse

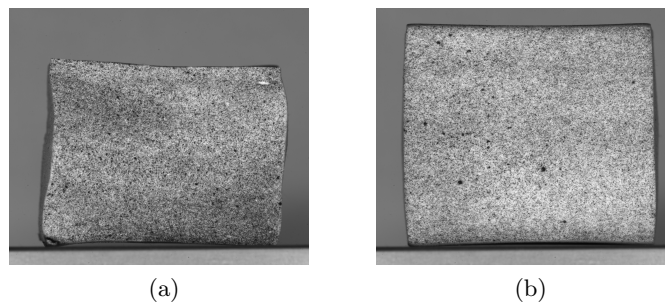


FIGURE 6 – Prisme - état relâché : (a) sens de croissance, (b) sens transverse

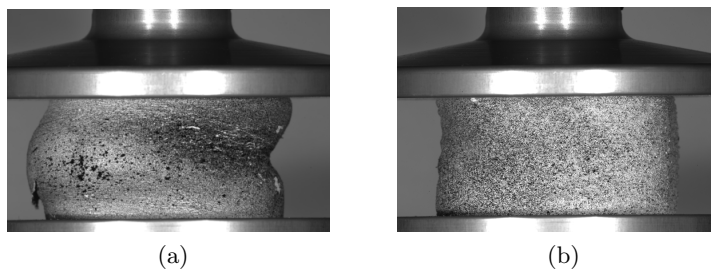


FIGURE 7 – Cylindre - modes de déformation : (a) sens de croissance, (b) sens transverse

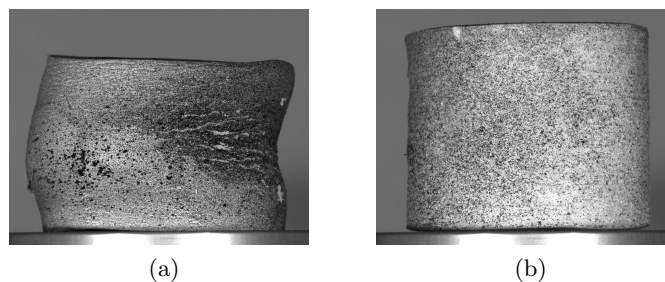


FIGURE 8 – Cylindre - état relâché : (a) sens de croissance, (b) sens transverse

Les principaux paramètres déduits de l'instrumentation classique des essais de compression simple sont :

- le module d'Young du matériau déterminé au point d'inflexion de la réponse contrainte déformation sur la partie quasi-linéaire ;
- la limite d'élasticité σ_y et la déformation à la limite d'élasticité ε_y ;
- la déformation à la densification ε_d , valeur calculée en maximisant l'efficacité énergétique lors de l'essai, définie par :

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)}$$

- la contrainte plateau σ_p , valeur moyenne sur la phase plateau :

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_y}$$

- l'énergie absorbée W , définie comme énergie de déformation avant densification :

$$W = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Les valeurs sont reportées dans le tableau (1). Les données issues de la corrélation d'images numériques sont utilisées pour déterminer les valeurs du coefficient de Poisson dans les directions longitudinale et transverse, mais également pour affiner les valeurs des modules d'Young.

TABLE 1 – Propriétés mécaniques statiques de la mousse de polyuréthane en compression simple déduites des essais sur échantillons parallélépipédiques

Quantité	Direction de croissance	Direction transverse
Module d'Young - machine (MPa)	8.7	3.5
Limite d'élasticité (kPa)	188 ± 2	137 ± 2
Déformation à la limite d'élasticité	3.	5.
Déformation à la densification (%)	62	62
Contrainte plateau (kPa)	226 ± 1	170 ± 2
Énergie absorbée (kJ/m ²)	137 ± 1	107 ± 1
<i>Module d'Young - CIN (MPa)</i>	11.	4.1
<i>Coefficient de Poisson - CIN</i>	0.14	0.17±0.2

Nous évaluons également en complément, par CIN, la valeur du *coefficient de Poisson apparent* pour la phase de plateau qui est trouvée nulle.

3.2 Essais de compression confinée

Les essais confinés ont pour principal effet de limiter le flambement global des échantillons. En termes de paramètres mécaniques, une légère augmentation de la contrainte plateau est constatée. Ces observations de la faible influence du confinement rejoignent celles effectuées sur une mousse de polychlorure de vinyle (PVC) à cellules fermées de faible densité [11]. Ces résultats s'expliquent ici par la faible valeur du coefficient de Poisson pour la phase élastique

et pour un *coefficient de Poisson apparent* pour la phase d'écrasement égal à zéro.

3.3 Essais de compression aux basses vitesses

Des essais de compression simple à vitesse plus élevée ont été réalisés avec des échantillons cylindriques et prismatiques (tab. 2). Compte tenu des limitations de la fréquence d'acquisition de notre caméra haute résolution, la corrélation d'images numériques n'a pas été utilisée pour analyser ces essais. L'effet de la vitesse de déformation se traduit par une faible augmentation du module d'Young et une augmentation plus sensible de la contrainte plateau et par conséquent de l'énergie absorbée.

TABLE 2 – Propriétés mécaniques aux faibles vitesses de la mousse de polyuréthane en compression simple dans la direction de croissance

Vitesse de déformation	$\dot{\epsilon} = 10\% \text{min}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 100\% \text{min}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 1000\% \text{min}^{-1}$
<i>Échantillons testés</i>	<i>3 cylindriques et 2 prismatiques</i>	<i>1 cylindrique et 1 prismatique</i>	<i>1 cylindrique</i>
Module d'Young - machine (MPa)	8.9±0.4	9.4±0.6	10.8
Déformation à la densification (%)	62±1	62	62
Contrainte plateau (kPa)	230 ±10	250 ±10	270
Énergie absorbée (kJ/m ²)	138±17	151 ±7	163

3.4 Essais de compression à haute vitesse

La figure (9) illustre l'évolution de l'état d'un échantillon au cours d'un essai dynamique. Sur la ligne supérieure sont reportées les images brutes et sur les lignes suivantes le champ de déplacement longitudinal et le champ de déformation longitudinale déduits de la corrélation d'images numériques. Aux premiers instants de l'essai, l'échantillon est déformé de manière homogène puis, très rapidement, la déformation se localise sur une bande puis sur plusieurs.

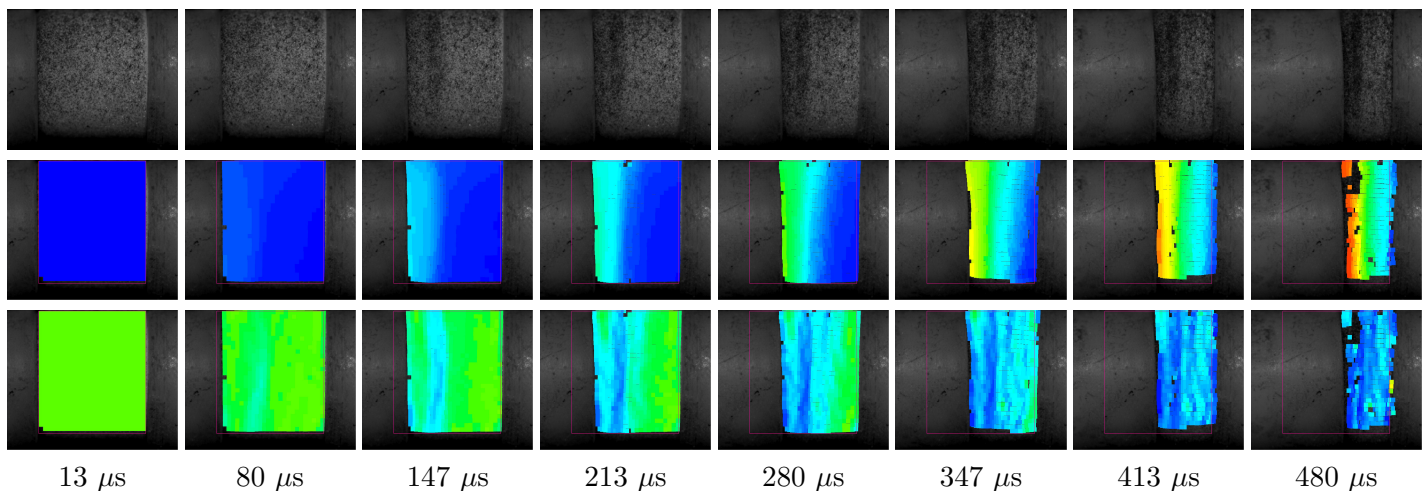


FIGURE 9 – Suivi d'un essai dynamique par imagerie rapide, ligne supérieure : images brutes, ligne intermédiaire : déplacement longitudinal, ligne inférieure : déformation longitudinale

La très faible masse volumique du matériau et son faible module d'Young conduisent à une très faible célérité des ondes ($\approx 600 \text{ ms}^{-1}$). En l'absence de *pulse shaper* et en raison de l'utilisation d'échantillons de longueur relativement importante pour permettre le suivi par corrélation d'images, l'équilibre des forces aux interfaces (force entrante et force sortante) n'est atteint que tardivement. Par conséquent, seule la valeur de la contrainte plateau est déduite des essais dynamiques. Le tableau (3) recense les valeurs de contrainte plateau en fonction de la vitesse de sollicitation mesurée.

TABLE 3 – Propriétés mécaniques dynamiques de la mousse de polyuréthane en compression déduites des essais aux barres de Hopkinson

Vitesse de déformation(/s)	Contrainte plateau (kPa)
350	326
1050 \pm 50	364
1300	419
1650	465
1450	463

La sensibilité de la valeur de la contrainte plateau aux fortes vitesses est beaucoup plus marquée qu'aux basses vitesses. Pour le mettre en évidence de manière plus significative, l'ensemble des résultats obtenus avec la machine de compression et les barres de Hopkinson est reporté sur la figure (10).

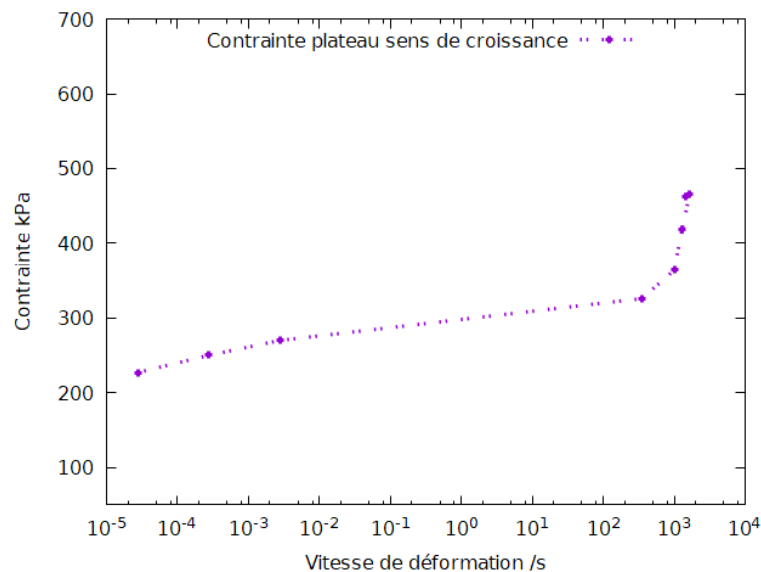


FIGURE 10 – Évolution de la contrainte plateau avec la vitesse

Ce type d'évolution a déjà été observé sur des mousses de polypropylène pour plusieurs densités

[12]. Ces résultats devront être analysés plus finement pour déterminer l'origine cette inflexion significative autour de 1000 s^{-1} . Celle-ci pouvant trouver son origine dans des effets micro-inertiels ou dans l'influence du gaz comprimé à l'intérieur des cellules.

4 Conclusion et perspectives

Ce travail avait pour but de proposer une méthodologie d'identification de la réponse mécanique de matériau isolant de très faible densité en vue d'une utilisation potentielle pour atténuer les effets mécaniques d'une onde de souffle. Dans cette première étape, une mousse de polyuréthane, constitutive de panneaux isolants rigides, a été retenue comme matériau type. Des essais de compression quasi-statique et dynamique ont été réalisés.

Les résultats obtenus en statique ont permis de mettre en évidence une isotropie transverse, tant dans la réponse élastique du matériau que durant la phase d'écrasement de celui-ci. Le matériau apparaît plus raide et plus résistant dans la direction de croissance de la mousse. Le suivi par imagerie a également permis de mettre en évidence un processus de déformation différent suivant la direction de sollicitation. Enfin, l'utilisation incrémentale de la corrélation d'images numériques a permis d'accéder au champ de déplacement et de déformation sur la surface de l'échantillon et d'améliorer l'identification des propriétés élastiques du matériau. Afin de se rapprocher du mode de déformation attendu dans une utilisation comme dispositif de protection aux effets de souffle, des essais de compression confinée dans la direction de croissance ont également été réalisés. Peu de différences ont été observées avec les essais de compression simple.

La sensibilité de la réponse du matériau à la vitesse de déformation a été étudiée. Aux faibles vitesses de sollicitations, le module d'Young et la contrainte plateau apparaissent sensibles à la vitesse de déformation. Pour l'étude des plus hautes vitesses, le dispositif des barres de Hopkinson a été adopté. Compte tenu de la très faible masse volumique du matériau, l'équilibre n'est atteint que tardivement dans l'échantillon et de ce fait, seule la valeur de la contrainte plateau a été identifiée. Elle a été trouvée fortement sensible à la vitesse de déformation. L'utilisation de l'imagerie rapide et de la corrélation d'images numériques n'a pour l'instant été utilisée en dynamique que de manière qualitative, pour observer les modes de déformation de l'échantillon dont la réponse, comme en statique, s'avère hétérogène.

Les perspectives immédiates sont, pour mieux comprendre l'origine des effets de vitesse, de poursuivre les essais dynamiques avec cellule de confinement et de réaliser des essais de compression dynamiques dans les directions perpendiculaires à la direction de croissance de la mousse. En parallèle, l'analyse plus fine des essais, au moyen des résultats de corrélation d'image, est en cours.

Références

- [1] L. Gibson, L., M. Ashby, M., *Cellular Solids : Structure and Properties* (Cambridge Solid State Science Series), Cambridge : Cambridge University Press, 1997
- [2] H. L. Schreyer, Q. H. Zuo, A. K. Maji, Anisotropic Plasticity Model for Foams and Honeycombs, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, N 9., 1993, pp. 1913-1930.

- [3] O. Faruque, N. Liu, C.C. Chou, Strain rate dependent foam : constitutive modeling and applications, SAE Transactions, Vol. 106, 1997, pp. 904–912.
- [4] M. Avalle, G. Belingardi, R. Montanini, Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram, International Journal of Impact Engineering, Vol. 25 (5), 2001, pp. 455-472.
- [5] W. Chen, F. Lu, N. Winfree, High-strain-rate Compressive Behavior of a Rigid Polyurethane Foam with Various Densities, Experimental Mechanics Vol. 42 (1), 2002, pp. 65-73
- [6] H. Zhao, G. Gary, J. Klepaczko, On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar, International Journal of Impact Engineering, Vol. 19, 1997, pp. 319–330.
- [7] J. Liu, D. Saletti, S. Pattofatto and H. Zhao, Impact testing of polymer foam using Hopkinson bars and digital image analysis, Polymer testing, Vol. 36, 2014, pp. 101-109.
- [8] AFNOR, NF EN 826, Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment - Détermination du comportement en compression, 2013
- [9] David : SHPB tests analysis software [Online ; accessed apr-2019]
[https ://www.sites.google.com/site/hopkinsonbars/home/david](https://www.sites.google.com/site/hopkinsonbars/home/david)
- [10] Z. H. Tu, Shim V. P. W. and Lim. C. T., Plastic deformation modes in rigid polyurethane foam under static loading, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38 :50–51, 2001, pp. 9267–9279.
- [11] T. R. Walter, A. W. Richards, W. Andrew and G. Subhash, A unified phenomenological model for tensile and compressive response of polymeric foams. Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 131 (1), 2001, pp. 1-6
- [12] P. Viot, Comportement des matériaux cellulaires sous sollicitations dynamiques. Partie 1 : approche macroscopique, Mécanique & Industries, Vol. 11 (1), 2010, pp. 1-23