

# Étude pour le dimensionnement en fatigue et sous impact de butées d'amortisseur en mousse de polyuréthane

J.B. Le Bail<sup>a,b,c,\*</sup>, D. Kerihuel<sup>b</sup>, L. Maheo<sup>b,d</sup>, Y. Marco<sup>a</sup>, V. Le Saux<sup>a</sup>,  
W. Hervouet<sup>c</sup>, P. Charrier<sup>c</sup>

a. ENSTA Bretagne, IRDL – CNRS UMR 6027, 29200 Brest, France

jean-baptiste.le\_bail@ensta-bretagne.org

b. Univ. Bretagne Sud, IRDL – CNRS UMR 6027, F-56100 Lorient, France

c. Vibracoustic CAE & Département Durabilité et Prédiction, 44474 Carquefou, France

jean-baptiste.lebail@vibracoustic.com

d. Ecoles de Saint-Cyr Coëtquidan, CREC, F-56380 Guer, France

## Résumé :

*Les butées en mousse de polyuréthane étudiées sont utilisées dans le milieu automobile. Leur principale fonction est d'amortir les chocs verticaux aux roues et de contribuer au confort du véhicule. La réponse mécanique de ce type de pièces implique de prendre en considération différents mécanismes, allant du flambement des parois de la pièce à l'auto-contact en passant par les non-linéarités géométriques. La caractérisation actuelle de ces butées en mousse de polyuréthane en fatigue et sous impact est aujourd'hui limitée au cahier des charges du client et aux tests prédéfinis par celui-ci. L'objectif de cet article est de présenter le contexte et le matériau de l'étude, puis les premiers résultats obtenus en traction et compression uniaxiales pour réaliser l'identification d'une loi de comportement.*

## Abstract :

*The studied polyurethane jounce bumpers are used in the automotive industry. Their main function is to absorb vertical impacts on the wheels to contribute to the comfort of the vehicle. The mechanical response of this type of parts involves different mechanisms, from foam wall buckling to self-contact and material non-linearities. The current characterization of these polyurethane foam parts in fatigue and under impact is today limited to the customer's specifications and its predefined tests. This study presents the first steps of the design loop, with mechanical characterization under uniaxial tension and compression.*

**Mots clefs : Polyuréthane - Mousse - Caractérisation mécanique**

# 1 Introduction

Afin de caractériser au mieux le comportement des butées en mousse de polyuréthane, trois axes sont envisagés dans cette étude.

Le premier d'entre eux porte sur la description précise de la microstructure. Cette étape doit permettre de comprendre les liens entre le procédé de fabrication, la microstructure et les propriétés mécaniques (comportement mécanique et ruine du matériau). C'est un point essentiel afin de relier les paramètres du processus de fabrication à la réponse mécanique des pièces [1].

Le second axe met l'accent sur la définition d'un modèle de comportement mécanique du matériau. L'expérience montre qu'il existe de très fortes non linéarités dans la réponse mécanique du matériau constitutif des butées en mousse polyuréthane. Cette complexité conduit à différents choix possibles quant à la modélisation dans les codes de calcul industriels. Les trois principales familles de lois de comportement sont, les modèles viscoélastiques à sollicitations faibles [2] avec des lois à seuils dérivées de la mécanique des sols, les modèles classiques hyperélastiques, pour lesquels l'hypothèse d'incompressibilité doit être adaptée [10], et des modèles dérivés du modèle "Hyperfoam" [4].

Le dernier axe de l'étude porte sur l'implémentation d'un critère de fatigue pour le dimensionnement des butées d'amortisseur en mousse de polyuréthane [5] ainsi que sur l'effet d'un chargement de type "impact" sur la durée de vie de ce type de pièce.

Dans cet article, nous nous limiterons à la description de la fabrication des butées d'amortisseurs en mousse de polyuréthane ainsi qu'à la présentation d'essais de caractérisation mécanique classique (compression, traction) pour des matériaux présentant différentes masses volumiques.

## 2 Fabrication de butées en mousse polyuréthane

### 2.1 Bases de la chimie du polyuréthane

La chimie du polyuréthane est basée sur la chimie des isocyanates. En 1849, Wurtz [6] découvre la réaction de formation de l'uréthane en faisant réagir ensemble un isocyanate R-NCO et un alcool R'-OH ensemble. Plus tard en 1937, Otto Bayer [7] découvre et brevète le procédé de polyaddition qui permet de produire du polyuréthane en associant un diisocyanate et un polyol. Il existe des milliers de polyuréthanes différents qu'il est possible de regrouper en quatre grandes familles.

La première est celle des polyuréthanes linéaires. Ce type de polyuréthane est réalisé en associant un diisocyanate et un diol. C'est un thermoplastique. La seconde famille (également appelé réseau de polyuréthane) est un matériau thermodurcissable. En augmentant la fonctionnalité du polyol mis en jeu, il est possible de moduler la densité de réticulation du réseau. Il est courant d'utiliser des triols ( $f=3$ ) ainsi que des tétrols ( $f=4$ ) associé à des diisocyanates pour ce type de polyuréthane. La troisième famille est celle des mousses de polyuréthane. celles-ci possèdent des caractéristiques très différentes d'une formulation à une autre. Il est possible d'obtenir des mousses souples de faible densité ( $10-80 \text{ kg.m}^{-3}$ ), des mousses flexibles haute densité ( $>100 \text{ kg.m}^{-3}$ ), des mousses semi-rigides microcellulaires ( $400-800 \text{ kg.m}^{-3}$ ), ou encore des mousses rigides cde faible densité ( $30-80 \text{ kg.m}^{-3}$ ) ou haute-densité ( $>450 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Peu importe que la mousse à préparer soit rigide ou souple, la présence d'un agent porogène (un gaz) est requise au sein du milieu réactionnel au moment de la polymérisation du mélange isocyanate alcool. Cette addition peut être effectuée par voie physique ou par voie chimique. La voie physique correspond à l'ajout d'un gaz de type dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ou à l'addition d'un liquide volatil en petite quantité

comme l'isopentane qui possède un point d'ébullition bas (la réaction de formation du polyuréthane étant exothermique, la chaleur générée par celle-ci est suffisante pour amener ce liquide dans un état d'ébullition). La voie chimique correspond à l'addition d'eau dans le mélange réactionnel. La réaction de l'isocyanate avec l'eau conduit à la formation de  $\text{CO}_2$  comme l'explique (1). La quatrième et dernière famille concerne les uréthanes thermoplastiques ou TPU. Ce sont des copolymères multi-blocs séquencé en segments rigides courts résultantes de la réaction de diisocyanates avec des diols de faible masse molaire, et de séquences souples longues résultantes de la réaction de diisocyanates avec des polyéthers ou polyesters téléchéliques à terminaisons hydroxyles.



## 2.2 Procédé de fabrication

### 2.2.1 Formulation

Il est possible de synthétiser des polyuréthanes de trois façons différentes (cf. Fig. 1).

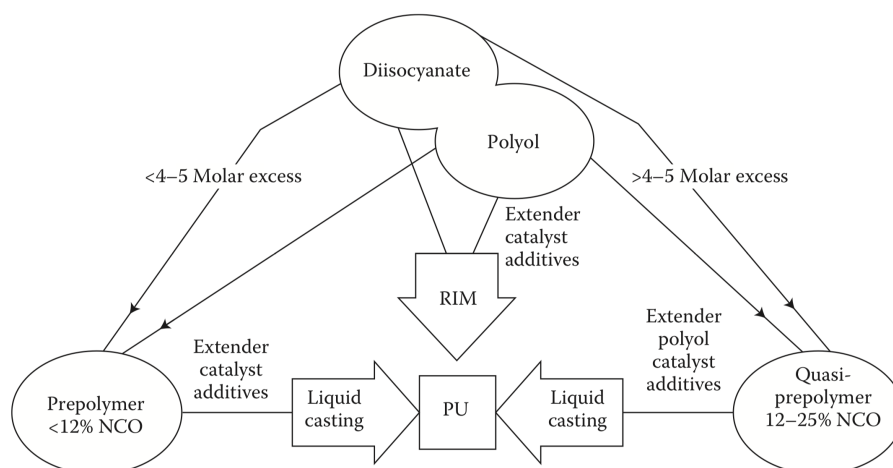


FIGURE 1 – Formulation du polyuréthane d'après Szycker [9]

La première méthode est appelée "RIM" (Reaction Injection Molding) et consiste à mélanger en une seule fois tous les agents réactionnels diisocyanates, polyols et additifs. L'avantage de cette méthode dite "low-cost" est sa capacité à produire de gros volume de matière. Il faut cependant être très vigilant car la réaction est hautement exothermique et de ce fait, la mousse peut parfois être endommagée. Les deux autres méthodes utilisent le même principe et sont largement utilisées car il est plus facile de contrôler la chimie finale du matériau. La différence notable est la quantité de groupes isocyanates résultant. En effet, dans la formulation "prepolymer" les isocyanates sont en excès par rapport aux polyols tandis que dans la formulation "quasi-prepolymer" la totalité des isocyanates du produit final est ajoutée à une partie des polyols.

### 2.2.2 Production

Il existe trois façons de produire à l'échelle industrielle des pièces en mousse de polyuréthane la coulée, l'injection et la projection. La production par coulée peut être continue ou discontinue. Dans le cadre de

la fabrication de butées d'amortisseur, les deux procédés utilisés sont la coulée discontinue et l'injection. Dans les deux cas, la matière est introduite dans un moule qui a la forme de la pièce finale à un facteur de retrait thermique prêt.

### 3 Essais de caractérisation mécanique

Une première modélisation classique de la mousse polyuréthane, utilise un modèle hyperélastique et prend en compte le caractère compressible du matériau. Le plus couramment utilisé est un modèle de type "hyperfoam", disponible dans les logiciels de calcul par éléments finis standards. Il est basé sur une fonction d'énergie de déformation (2) provenant du modèle de Ogden [10].

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} [\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1)] \quad (2)$$

avec :

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \text{ module de cisaillement} \quad (3)$$

$$K_0 = 2\mu_i \left( \frac{1}{3} + \beta_i \right) \text{ module de compressibilité} \quad (4)$$

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (5)$$

$$\lambda_i \text{ élongations principales} \quad (6)$$

#### 3.1 Essai de compression uniaxiale sur cube

Les cubes utilisés dans le cadre de ces essais ont pour dimensions 20x20x20mm et ont été découpés dans un même cylindre obtenu par injection. Afin de comparer au mieux les résultats, un soin particulier a été apporté à la notation des orientations. La direction 1 correspond à la direction d'écoulement de la matière (gravité) et les deux autres correspondent aux deux directions perpendiculaires à la direction 1. Les échantillons ont été pesés avant les différents essais pour évaluer leur masse volumique.

Le premier essai mis en place concerne l'effet de la masse volumique sur le comportement mécanique de la mousse. 4 cycles de compression à 50% ont été réalisés (3 cycles puis 1 minute d'attente et 1 quatrième cycle) pour une vitesse de déformation de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  sur trois cubes de densité respectives 363, 305 et  $298 \text{ kg.m}^{-3}$ . Toutes les données présentées ici ont été déterminées sur le dernier cycle. En effet l'expérience montre qu'il existe un adoucissement cyclique, ressemblant à un effet Mullins [11] sur les trois premiers cycles en sollicitation quasi-statique. Le second essai mis en place concerne la caractérisation de l'anisotropie du matériau. Le protocole d'essais est le même que pour l'expérience précédente mais sur un seul est même cube de masse volumique  $363 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Pour des raisons de confidentialité, les résultats ont tous été normés. Afin d'analyser les résultats, la contrainte nominale normalisée a été tracée en fonction de la déformation nominale normalisée.

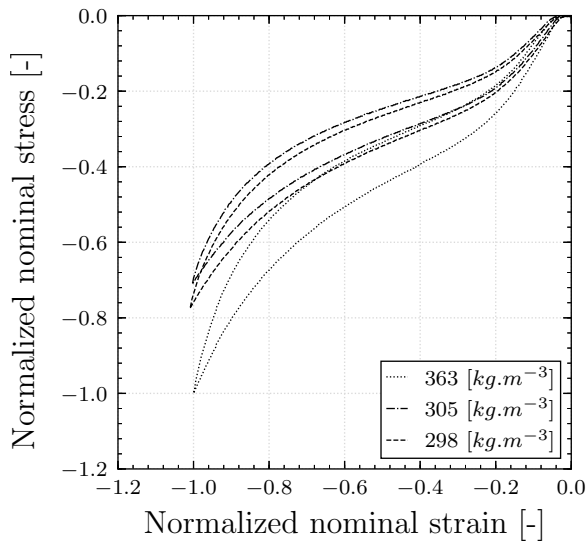


FIGURE 2 – Effet de la densité sur la réponse mécanique en compression

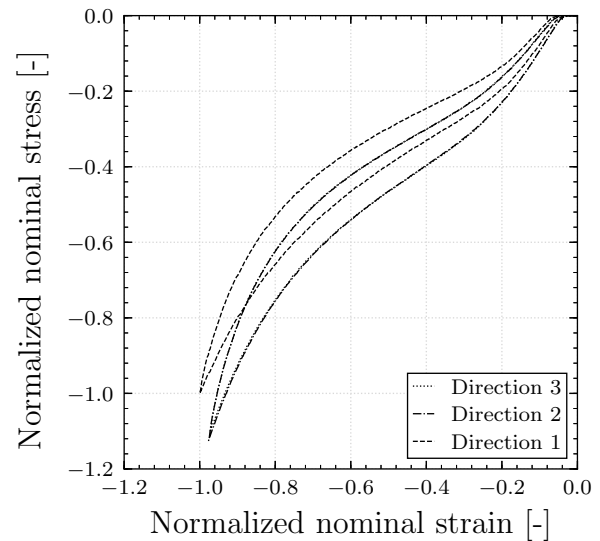


FIGURE 3 – Observation de l'anisotropie en compression

Les résultats du premier essai (cf. Fig. 2) montre un effet non négligeable de la masse volumique sur la réponse en compression, ce qui est une caractéristique des matériaux cellulaires. En effet, plus la masse volumique est élevée, plus la contrainte nominale est grande pour une déformation nominale donnée. Les résultats du second essai (cf. Fig. 3) mettent en évidence un caractère orthotrope du matériau. En effet, il est aisé de voir que la réponse est identique suivant les directions 2 et 3 et différente suivant la direction 1. Cette anisotropie est liée à la direction d'écoulement de la matière dans le moule, ici à la direction 1. Pour mettre en lien la microstructure et l'anisotropie, l'échantillon a été analysé au microscope électronique à balayage (MEB) après découpage au cutter suivant les trois plans perpendiculaires aux directions principales (cf. Fig. 4).

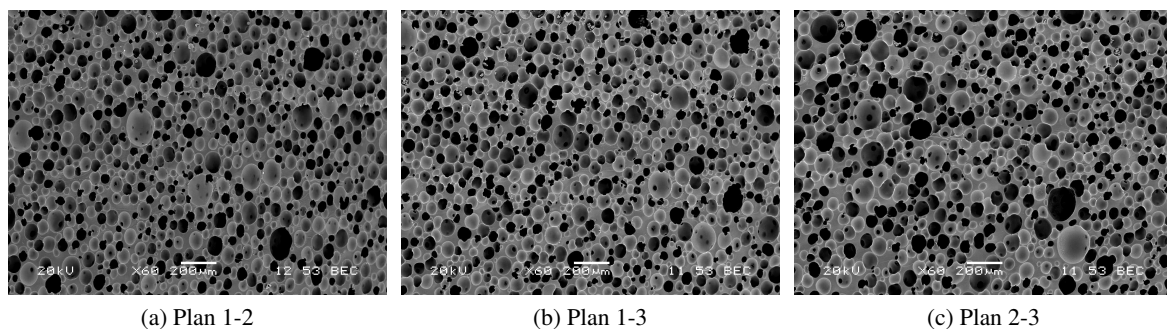


FIGURE 4 – Analyse de la microstructure au MEB suivant les trois plans de découpe

L'analyse de la microstructure montre une sphéricité des cellules suivant le plan 2-3, tandis qu'elles sont allongées suivant les plans 1-2 et 1-3. L'allongement des cellules s'effectue suivant les directions transverses à la direction 1. L'analyse de la microstructure semble donc confirmer les résultats obtenus lors du second essai.

## 3.2 Essai de traction uniaxiale

Il n'est pas courant d'utiliser des essais de traction sur les mousses. Même si la butée est soumise macroscopiquement à de la compression, localement, elle subit de la traction pouvant être à l'origine de sa ruine. Pour ces raisons, des essais de traction ont été réalisés.

Des essais de traction uniaxiale ont été effectués sur des éprouvettes de type H2 à une vitesse de déformation de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  et pour une masse volumique de  $500 \text{ kg.m}^{-3}$ . Ces éprouvettes sont issues d'une même plaque obtenue par injection puis surfacée pour supprimer la peau et découpée à l'emporte pièce.

Pour des raisons de confidentialité, les résultats ont tous été normés. Afin d'analyser les résultats, la contrainte nominale normalisée a été tracée en fonction de la déformation nominale normalisée.

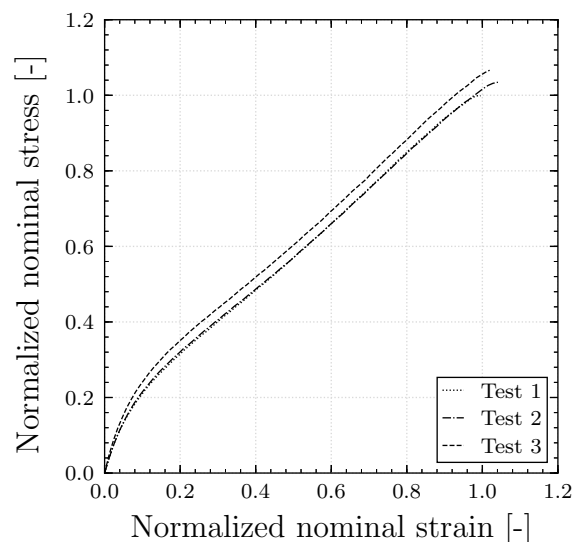


FIGURE 5 – Essai de traction sur éprouvette de type H2

Les résultats des essais (cf. Fig. 5) suggèrent une très bonne répétabilité de l'essai. Il est à noter qu'il n'existe pas de densification avant rupture.

## 4 Conclusions et perspectives

Il existe de multiples façons d'obtenir des mousses de polyuréthane. Il est possible de faire varier la chimie, la formulation ainsi que le procédé de fabrication. Il a été montré ici que la densité de la mousse avait un impact non négligeable sur la réponse en compression du matériau. Par ailleurs, le procédé de moussage induit une anisotropie marquée suivant la direction d'écoulement du matériau ce qui a été confirmé par analyse de la microstructure.

Afin d'obtenir une meilleure estimation par la loi "hyperfoam" en compression, il sera intéressant de continuer l'investigation sur le caractère anisotrope du matériau ainsi que d'effectuer des essais de cisaillement simple et de compression oedométrique. Cette première étape doit être complétée afin d'obtenir une démarche de dimensionnement en fatigue robuste. Il est aussi nécessaire de comprendre les mécanismes de dégradation locaux à l'échelle de la microstructure et en particulier à l'échelle cellulaire, puis de définir un critère de ruine macroscopique pertinent vis-à-vis du scénario d'endommagement.

## Références

- [1] L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cellular solids-structural and properties. Cambridge Univ. Press. 2ed., 1997.
- [2] R. Singh, P. Davies, A.K. Bajaj, Identification of Nonlinear and Viscoelastic Properties of Flexible Polyurethane Foam. Nonlinear Dynamics, 2003.
- [3] R.W. Ogden, Large deformation isotropic elasticity : on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids. Proc Roy Soc Lond, 1972; A328 :567–83.
- [4] M. K. Neilsen, R. D. Krieg, H. L. A. Schreyer, A constitutive theory for rigid polyurethane foam. Polymer Eng. Sci., 35(5), 387-394 , 1995
- [5] S. Golnaraghi, Modelling compressive cyclic stress-strain behavior of structural foams”. IJF, 2001.
- [6] C. A. Wurtz, A. Ann. Chim. Phys., 71, 326, 1849.
- [7] O. Bayer, German patent, 728.981, 1937.
- [8] L. Moshinsky, O. Figovsky, Chemical resistance of epoxy polymers depending on a structure of amino-phenol hardeners, Scientific Israel-Technological Advantages, no. 1, 28-34, 1999.
- [9] M. Szycker, Szycker’s handbook of polyurethane, CRC press, 2<sup>o</sup> ed., New York, 2013.
- [10] R. W. Ogden, Large deformation isotropic elasticity – On the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 326, No. 1567, 565–584 1972
- [11] L. Mullins, Experiment for incompressible rubberlike solids, Rubber Chem. Technol., Vol. 42, 339-362 1969.