

# Comportement et modélisation mécanique multiaxiale d'un PHA

**E. GUITTON<sup>a</sup>, G. RIO<sup>a</sup>, H. LAURENT<sup>a</sup>, A. BOURMAUD<sup>a</sup>, S. BRUZAUD<sup>a</sup>**

a. Université de Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F- 56321 LORIENT

email : erwan.guitton@univ-ubs.fr, gerard.rio@univ-ubs.fr, herve.laurent@univ-ubs.fr,

alain.bourmaud@univ-ubs.fr, stephane.bruzaud@univ-ubs.fr

## Résumé :

*Dans cette étude, un dispositif expérimental a été utilisé pour la caractérisation mécanique multiaxiale d'un PolyHydroxyAlcanoate (PHA), polymère biodégradable et biosourcé. Cette caractérisation a été effectuée à l'aide d'une géométrie d'éprouvette tubulaire permettant l'exécution de cycles de sollicitations successives et/ou simultanées de traction-compression-torsion. La base de données expérimentale ainsi obtenue a permis l'identification des paramètres d'un modèle de comportement d'Hyperélasto-Visco-Hystérésis (HVH). Enfin, la tenue mécanique en statique a été étudiée pour des structures en PHA dédiées à l'emballage alimentaire.*

## Abstract :

*In this study, an experimental setup has been used for the multiaxial characterization of a PolyHydroxy-Alkanoate (PHA), a biodegradable and biosourced polymer. The mechanical characterization has been done using a tubular specimen geometry allowing to carry out tests with multiple or successive cycles mixing tensile, compression and torsion loadings. The experimental database has been used to identify the material parameters of a Hyperelasto-Visco-Hysteresis (HVH) constitutive model. The mechanical strength has been studied with this behavior law on PHA structures in the field of food packaging.*

**Mots clés : Polymère, PolyHydroxyAlcanoates, Sollicitations Multiaxiales, Loi de comportement, Éléments finis**

## 1 Introduction

Les matériaux polymères sont présents partout dans notre quotidien et sont utilisés dans de nombreux secteurs d'activités et notamment par l'industrie de l'emballage alimentaire. Ce fait rend la caractérisation mécanique des polymères indispensable pour optimiser la tenue mécanique de ce type d'emballage. Cependant, la caractérisation mécanique des polymères s'effectue le plus souvent pas de simples essais uniaxiaux. Il s'agit par exemple d'essais de traction pour déterminer des caractéristiques mécaniques simples tel que le module d'Young, la limite d'élasticité, l'allongement ou la contrainte à la rupture.

Pourtant, il est désormais bien connu que le comportement des matériaux polymères dépend notamment de la vitesse, de la direction et de l'histoire des cycles de chargement [1, 2]. Ainsi, une structure d'emballage en polymère est à même de subir des sollicitations autres que de la traction, combinant également

du cisaillement et de la compression. Ainsi, il semble indispensable de maîtriser la réponse mécanique de ces matériaux pour des essais multiaxiaux avec trajets de chargements complexes afin d'obtenir un modèle en 3 dimensions représentatif de leurs comportements.

Ces travaux proposent d'utiliser un modèle d'Hyperélasto-Visco-Hystérésis (HVH) capable de rendre compte des phénomènes hyperélastiques, visqueux et d'hystérésis non visqueuses, caractéristiques du comportement complexe des polymères rencontrés dans les structures en service.

## 2 Matériaux et conditions expérimentales

Afin d'effectuer des essais avec chargements complexes sur des polymères, un dispositif expérimental et une géométrie d'éprouvette tubulaire ont été développés [3, 4, 5]. Le dispositif est principalement constitué de mors spécifiques (fig. 1.a et 1.b) s'adaptant sur une machine de traction/torsion Zwick Z250/SN5A. Ces mors ont été conçus conjointement à l'éprouvette tubulaire (fig. 1.c) afin de lier cette dernière par obstacle au montage et, ainsi, éviter l'instauration de contraintes initiales dans l'éprouvette et l'apparition de glissements au cours d'un essai. La présence de plateaux, de vis et d'empreintes hexagonales vient assurer respectivement la transmission de mouvements de translation, de compression et de torsion.

Le polymère utilisé est un P(3HB-co-4HB) de la famille des PolyHydroxyAlcanoates (PHAs), famille de matériaux d'origine microbienne possédant des propriétés biodégradables et biocompatibles. De nom commercial Mirel F3002, ce grade de PHA est distribué par Metabolix (USA) pour l'industrie de l'emballage alimentaire<sup>1</sup>, ce matériau n'altérant pas les aliments et possédant de bonnes propriétés barrières avec l'environnement [6]. Les essais sur le Mirel F3002 ont été effectués à une température contrôlée de 25°C via une enceinte hygrométrique s'adaptant au dispositif d'essai.

## 3 Caractérisation multiaxiale

La campagne expérimentale visait à déterminer des essais pertinents pour caractériser précisément le comportement mécanique 3D du PHA, en incluant les phénomènes liés à la vitesse, à la direction et à l'histoire des cycles de chargement. Ainsi, la campagne d'essais est constituée d'une part, d'essais uniaxiaux dans les directions de traction, de compression et de torsion. Pour chaque direction, des essais avec cycles de charge/décharge ainsi que des essais interrompus par des relaxations ont été effectués [5]. D'autre part, pour prendre en compte des modes de sollicitations complexes, combinant plusieurs types de déformations, des essais papillons ont été réalisés balayant plusieurs quadrants des modes de sollicitations possibles (fig. 2). Ces essais combinent simultanément, à certaines étapes, les directions de traction et de torsion ou de compression et de torsion. Sur la fig. 2, les notations utilisées sont :

- $\varepsilon' = \frac{2}{3}(1 + \nu)e$ , la déformation équivalente associée à la traction où  $e$  représente la déformation nominale et  $\nu$  le coefficient de Poisson ;
- $\gamma' = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$ , la déformation équivalente associée à la torsion où  $\gamma$  représente la déformation de cisaillement ;
- $\sigma$ , la contrainte de Cauchy.
- $\tau' = \sqrt{3}\tau$ , la contrainte équivalente de cisaillement où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement obtenue en effectuant l'hypothèse d'une distribution linéaire de la contrainte dans l'épaisseur de l'éprouvette tubulaire.

1. <http://ir.metabolix.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=522896>

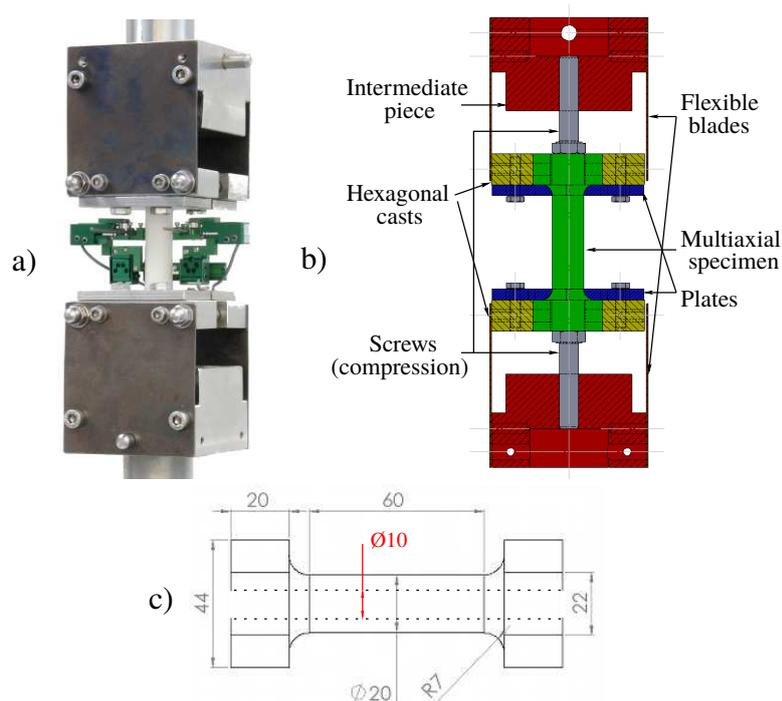


FIGURE 1 – Principales pièces constituant le dispositif expérimental. a) Vue d’une éprouvette multiaxiale et de l’extensomètre en position dans les mors du dispositif. b) Vue en coupe de la CAO des mors du dispositif. c) Dimensions de l’éprouvette multiaxiale.

La réponse du matériau en contrainte montre une dépendance au trajet de chargement. En particulier, une dissymétrie de la réponse peut être observée, ce qui illustre l’intérêt potentiel de tels essais pour mettre en évidence les effets liés au temps, à l’histoire de chargement ainsi qu’à la direction de déformation.

## 4 Identification du modèle HVH

Le modèle proposé d’Hyperélasto-Visco-Hystérésis (HVH) [7] rend compte des phénomènes hyperélastiques, visqueux et d’hystérésis non visqueuses, caractéristiques du comportement complexe des polymères. Ce modèle original s’appuie sur un comportement additif en contrainte composé d’un potentiel hyperélastique, d’un modèle de Maxwell généralisé pour la partie visqueuse et d’une contribution hystérétique purement déviatorique utilisant un modèle à mémorisation discrète.

La méthode d’identification de cette loi de comportement a été développée de manière à être suffisamment aisée et rapide pour être utilisable en industrie [8]. Les seuls essais utilisés pour son identification sont des essais interrompus par des phases de relaxations (fig. 3). Pour cette figure,  $\varepsilon_{eq} = \sqrt{\varepsilon'^2 + \gamma'^2}$  et  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + \tau'^2}$  désignent respectivement la déformation et la contrainte équivalente de type Von Mises. Les simulations obtenues pour chaque direction de déformation (en pointillés sur la figure) montrent que la première phase de relaxation est convenablement simulée contrairement aux suivantes. Ce phénomène trouve son origine au niveau du modèle visqueux qui reste à améliorer.

De plus, la réponse en contrainte du matériau en torsion est supérieure à la contrainte en traction, ceci est notamment due à l’hypothèse d’une distribution linéaire de la contrainte suivant le rayon de l’éprouvette.

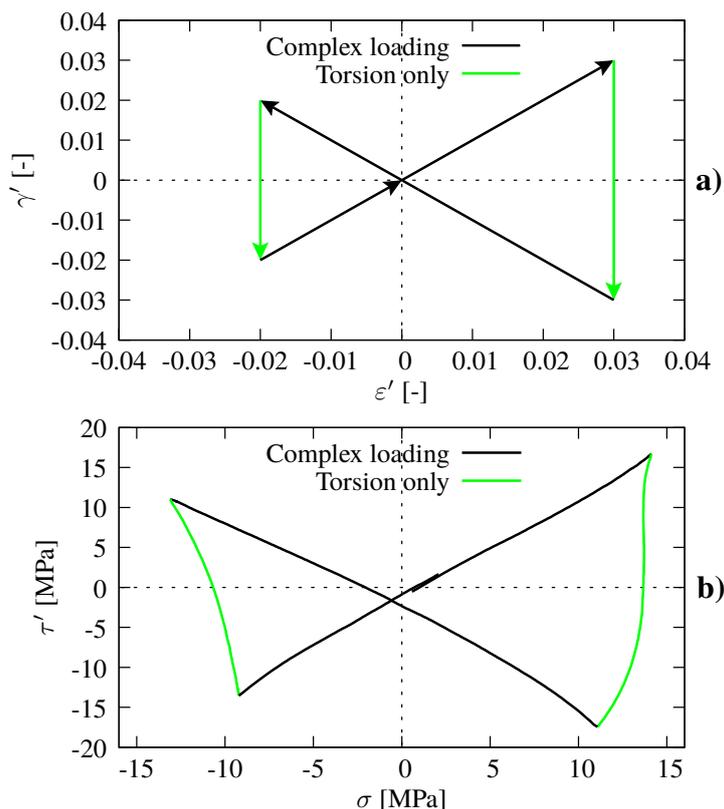


FIGURE 2 – Essai papillon à 25°C. a) Consigne de chargement dans l'espace des déformations. b) Réponse mécanique dans l'espace des contraintes.

## 5 Conclusion et perspectives

Cette étude présente une expérimentation dédiée à l'étude multiaxiale d'un polymère. Le matériau polymère choisi, un PHA, a été étudié dans différentes directions de déformations, ces directions pouvant être combinées, en utilisant une seule et même géométrie d'éprouvette. Ceci permet de s'affranchir des incertitudes sur le matériau pouvant être rencontrées lors de l'utilisation de différentes géométries d'éprouvette.

Nous proposons une loi de comportement HVH permettant de considérer un comportement en 3 dimensions du matériau, en incluant les phénomènes d'hyperélasticité, de viscosité et d'hystérésis, caractéristiques des polymères. L'identification expérimentale conduit à des réponses simulées de qualités raisonnables malgré l'hypothèse grossière mais simple, d'une répartition linéaire de la contrainte suivant le rayon de l'éprouvette.

Cependant, suivant les directions de déformations, les résultats expérimentaux montrent des disparités au niveau de la réponse en contrainte équivalente. Actuellement, nous travaillons à une méthode de calcul rapide permettant de faire l'identification inverse en torsion et en traction/torsion. Ainsi, il sera possible de quantifier la surestimation de la contrainte en torsion, issue de l'hypothèse d'une distribution linéaire de la contrainte suivant le rayon de l'éprouvette.

De plus, la simulation de compression d'un bol alimentaire en PHA utilisant la loi HVH est en cours de développement et sera confrontée aux résultats expérimentaux. À terme, les résultats de ces simulations ont pour but d'améliorer le dimensionnement de ce type de structures d'emballages en PHA.

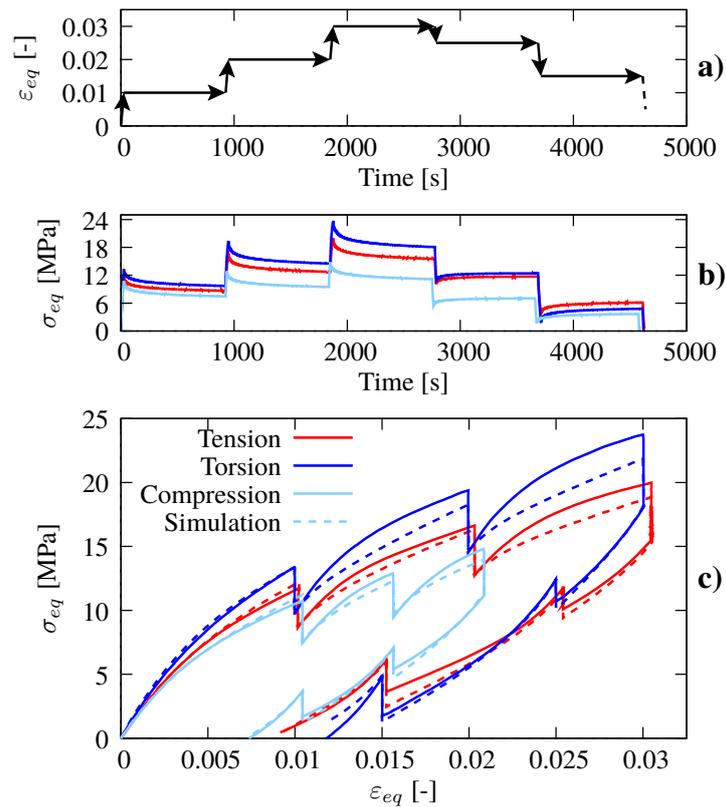


FIGURE 3 – Essais interrompus par des relaxations pour différentes directions de chargement, à 25°C. a) Trajet de chargement. La dernière étape, en pointillé, s’achève lorsque la force mesurée est nulle. b) Représentation de la contrainte équivalente en fonction du temps. c) Représentation de la contrainte équivalente en fonction de la déformation équivalente, comparaison avec les résultats obtenus par simulation.

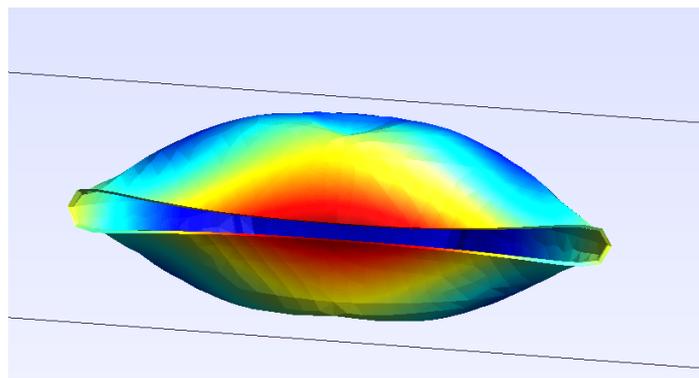


FIGURE 4 – Vue de la déformée pour l’écrasement d’un bol en PHA entre deux plateaux de compression.

## 6 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Région Bretagne et le Conseil Général du Morbihan pour leur soutien financier et la société EuroPlastiques.

## Références

- [1] M. Zrida, H. Laurent, G. Rio, S. Pimbert, V. Grolleau, N. Masmoudi, C. Bradai, Experimental and numerical study of polypropylene behavior using an hyper-visco-hysteresis constitutive law, *Computational Materials Science* 45 (2) (2009) 516–527. doi :10.1016/j.commatsci.2008.11.017.
- [2] A. Andriyana, N. Billon, L. Silva, Mechanical response of a short fiber-reinforced thermoplastic : Experimental investigation and continuum mechanical modeling, *European Journal of Mechanics - A/Solids* 29 (6) (2010) 1065–1077. doi :10.1016/j.euromechsol.2010.07.001.
- [3] E. Guitton, H. Laurent, G. Rio, Y.-M. Corre, S. Bruzaud, Y. Grohens, Caractérisation expérimentale en traction/compression/torsion d'un matériau biosourcé type PHA, in : 24eme colloque des DEformation des POLymères Solides (DEPOS24), Ecully, France, 2012.
- [4] E. Guitton, H. Laurent, G. Rio, Y.-M. Corre, S. Bruzaud, Y. Grohens, Mechanical Characterization and simulation under multiaxial conditions of PolyHydroxyAlkanoates, in : 28th International Conference of the Polymer Processing Society PPS28, Pattaya, Thaïlande, 2012.
- [5] E. Guitton, G. Rio, H. Laurent, A new multiaxial loading test for investigating the mechanical behaviour of polymers, *Polymer Testing* 36 (2014) 32–43. doi :10.1016/j.polymertesting.2014.03.011.
- [6] Y.-M. Corre, S. Bruzaud, J.-L. Audic, Y. Grohens, Morphology and functional properties of commercial polyhydroxyalkanoates : A comprehensive and comparative study, *Polymer Testing* 31 (2) (2012) 226–235. doi :10.1016/j.polymertesting.2011.11.002.
- [7] A. Vandenbroucke, H. Laurent, N. A. Hocine, G. Rio, A Hyperelasto-Visco-Hysteresis model for an elastomeric behaviour : experimental and numerical investigations, *Computational Materials Science* 48 (3) (2010) 495–503. doi :10.1016/j.commatsci.2010.02.012.
- [8] E. Guitton, Caractérisation mécanique multiaxiale de matériaux polymères, application à un PHA utilisé pour des structures d'emballages alimentaires, Ph.D. thesis, Université de Bretagne-Sud, Lorient (Dec. 2014). doi :10.13140/RG.2.1.2066.8960.