



**HAL**  
open science

# Modélisation du comportement multi-axial d'un élastomère chargé et application à la simulation d'essais complexes sur éprouvettes lamifiés élastomère-métal

Alexis Delattre, Stéphane Lejeunes, Stéphane Meo, Florian Lacroix, Frédéric Mazerolle

## ► To cite this version:

Alexis Delattre, Stéphane Lejeunes, Stéphane Meo, Florian Lacroix, Frédéric Mazerolle. Modélisation du comportement multi-axial d'un élastomère chargé et application à la simulation d'essais complexes sur éprouvettes lamifiés élastomère-métal. 12eme colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01158972

**HAL Id: hal-01158972**

<https://hal.science/hal-01158972v1>

Submitted on 2 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Modélisation du comportement multi-axial d'un élastomère chargé et application à la simulation d'essais complexes sur éprouvettes lamifiés élastomère-métal.

A. Delattre<sup>1</sup>, S. Lejeunes<sup>2</sup>, S. Méo<sup>3</sup>,  
F. Lacroix<sup>3</sup>, F. Mazerolle<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Airbus Helicopters, Marignane, alexis.delattre@airbus.com

<sup>2</sup> LMA, CNRS, {lejeunes,mazerolle}@lma.cnrs-mrs.fr

<sup>3</sup> LMR, Université François Rabelais de Tours, {stephane.meo,lacroix}@univ-tours.fr

**Résumé** — On présente dans cette communication l'extension du modèle de Delattre [1] au cas des sollicitations multi-axiales ainsi que son application pour la simulation d'essais de compression/cisaillement sur paliers lamifiés élastomère-métal. Le modèle est basé sur une approche purement phénoménologique en grandes transformations qui permet à la fois de traduire de l'anisotropie induite par la viscosité et de l'assouplissement dynamique en fonction de l'amplitude de sollicitation (effet Payne [2]). Des essais expérimentaux originaux sont présentés afin d'évaluer les capacités prédictives du modèle (globale et locale).

**Mots clés** — Grandes transformations, viscosité, multi-axial.

## 1 Contexte

Ces travaux sont le fruit d'une collaboration qui a pour objectif le développement d'outils prédictifs pour le dimensionnement de diverses pièces lamifiées élastomère-métal utilisées dans les rotor d'hélicoptères. Ces pièces sont soumises à des sollicitations multi-axiales importantes et jouent un rôle centrale sur le plan de la sécurité de l'ensemble de l'architecture rotor. Les outils industriels standards sont peu adaptés pour simuler ce type de pièces à la fois pour des raisons liées à la complexité géométrique (fort élançement dans un contexte de faible compressibilité), aux sollicitations vues par les pièces (charges dynamiques multi-axiales avec pré-contrainte) et aux non-linéarités matérielles. Sur le plan scientifique on constate également qu'il y a peu (voire pas) de modèles dans la littérature qui sont capables de décrire à la fois les dépendances à la fréquence et l'amplitude de sollicitation en grandes transformations et qui soient valides dans un cadre multi-axial. On peut tout de même citer les travaux de Höfer et al. [3] qui proposent un modèle décrivant correctement les effets de la fréquence et de l'amplitude en petites transformations ou les travaux de Martinez et al. [4] qui introduisent une vision statistique de la viscosité pour les effets de la fréquence combinés à de la plasticité pour le comportement à froid et les effets de l'amplitude.

Dans ce travail, le couplage thermo-mécanique est négligé et seul le comportement stabilisé et assoupli du matériau est considéré (on néglige donc également l'effet Mullins). Pour autant le comportement est identifié à partir d'essais conduits dans une enceinte thermique avec régulation de température afin d'évaluer la dépendance des paramètres mécaniques à la température.

## 2 Modélisation

### 2.1 Modèle de comportement

Le modèle de comportement développé est présenté en détail dans [5]. Il est principalement basé sur la décomposition multiplicative du gradient de la transformation :  $\mathbf{F} = J^{-1/3} \mathbf{F}_e^i \cdot \mathbf{F}_v^i$  avec  $J = \det \mathbf{F}$  et  $i = 1..n$  qui permet de définir  $n$  branches de Maxwell à partir de la donnée de  $n + 1$  énergies libres (construites à partir de  $\bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{F}} \cdot \bar{\mathbf{F}}^T$ ,  $J$  et de  $\bar{\mathbf{B}}_e^i = \bar{\mathbf{F}}_e^i \cdot \bar{\mathbf{F}}_e^{iT}$ ) et de  $n$  lois complémentaires. Les potentiels

d'énergie libre retenus sont classiques et sont choisis isotropes en cohérence avec les constats expérimentaux qui donnent une élasticité instantanée et retardée isotrope. Les lois complémentaires sont moins classiques et font intervenir un tenseur de viscosité d'ordre 4 qui distingue les temps caractéristiques des phénomènes visqueux respectivement en élongation et en cisaillement. Ce tenseur de viscosité introduit donc de l'anisotropie liée à l'écoulement visqueux. Tout développement fait, les équations du modèle sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \boldsymbol{\sigma}_h + 2J^{-1} \sum_{i=1}^n G_i \alpha_i \bar{\mathbf{B}}_e^i D + \boldsymbol{\sigma}_{vol} \\ \begin{cases} \dot{\bar{\mathbf{B}}}_e^i = \bar{\mathbf{L}} \cdot \bar{\mathbf{B}}_e^i + \bar{\mathbf{B}}_e^i \cdot \bar{\mathbf{L}}^T - 4G_i J^{-1} \bar{\mathbf{V}}_e^i \cdot \mathbf{R} \cdot (\mathbb{H}_i^{v-1} : (\mathbf{R}^T \cdot \bar{\mathbf{B}}_e^i D \cdot \mathbf{R})) \cdot \mathbf{R}^T \cdot \bar{\mathbf{V}}_e^i \\ \bar{\mathbf{B}}_e^i(t=0) = \mathbf{I} \\ \dot{\alpha}_i = -1/h^i \langle \alpha_i - (3/I_1(\bar{\mathbf{B}}))^r \rangle \\ \alpha_i(t=0) = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

ou  $\bar{\mathbf{L}}$  est le gradient eulérien des vitesses,  $G_i$  est le  $i^{eme}$  module de cisaillement associé à la  $i^{eme}$  branche visqueuse,  $\mathbf{R}$  le tenseur rotation issu de la décomposition polaire de  $\mathbf{F}$ ,  $\bar{\mathbf{V}}_e^i$  le tenseur de déformation pure issu de la décomposition polaire de  $\bar{\mathbf{F}}_e^i$ ,  $\boldsymbol{\sigma}_h$  et  $\boldsymbol{\sigma}_{vol}$  les contraintes hyperélastiques isochorique et volumique. Le tenseur  $\mathbb{H}_i^v$  est défini par (notation de Voigt) :

$$[\mathbb{H}_i^v] = \begin{bmatrix} \eta_i^t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_i^t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_i^t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_i^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_i^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_i^c \end{bmatrix}$$

avec  $\eta_i^t, \eta_i^c$  les deux modules de viscosité de la  $i^{eme}$  branche. Les  $\alpha_i$  sont des variables internes homogènes à des variables d'endommagement et qui traduisent l'assouplissement du module dynamique en fonction de l'amplitude (effet Payne),  $I_1$  est le premier invariant de  $\bar{\mathbf{B}}$ ,  $h_i$  est homogène à un temps caractéristique,  $r_i$  un paramètre matériau. Ce modèle est identifié sur des essais cycliques (et de relaxation) de traction et de cisaillement simple et pour trois températures d'enceinte. Pour le matériau considéré et dans la plage de fréquences 3-25Hz, 6 branches sont suffisantes pour traduire le comportement.

## 2.2 Implémentation numérique

Le modèle décrit par les équations (1) a été implémenté dans Abaqus et dans un outil spécifique qui utilise la méthode de réduction de modèle proposée par [6]. Les équations d'évolutions sont intégrées en temps localement aux points de gauss à l'aide d'un schéma d'Euler implicite qui utilise une sous-discretisation du pas de temps avec auto-adaptation à l'aide d'une évaluation de l'erreur de discrétisation. Les développements ont été validés en utilisant des essais de traction/torsion sur éprouvettes diabolos.

## 3 Essais sur éprouvettes technologiques

### 3.1 Protocole d'essais

Afin d'évaluer les capacités prédictives du modèle pour des structures s'approchant des applications industrielles, nous avons mis au point des essais de compression/cisaillement sur palier élastomère-métal avec mesure de champ. Le montage utilise deux paliers identiques ( $52 \times 38 \text{mm}^2$  de section) constitués de deux lamelles d'élastomères de 14mm d'épaisseur intercalées avec une lamelle métallique de 2mm (voir figure 1). La compression est imposée de manière manuelle par un serrage à vis. La vitesse de serrage n'est pas contrôlée mais reste très faible, de plus le temps de mise en route de l'essai permet aux effets visqueux d'être quasiment relaxés avant l'application du cisaillement. L'ensemble du dispositif est installé sur une machine uniaxiale hydraulique qui permet d'imposer et de contrôler le déplacement de

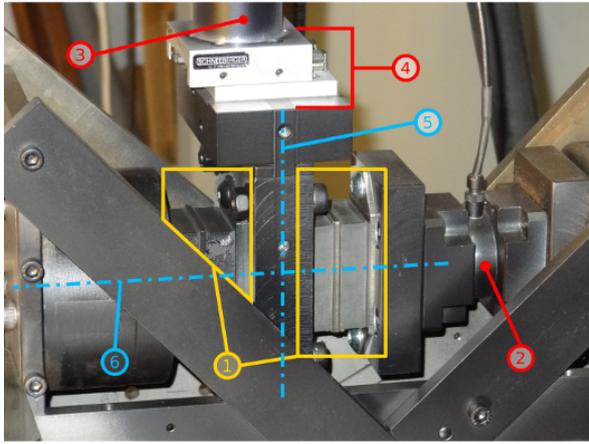


FIGURE 1 – Montage expérimentale de traction/cisaillement sur palier. ① : paliers, ② : capteur d'effort tri-axes, ③ : axe de la machine, ④ : glissière, ⑤ : centre de symétrie, ⑥ : mise en compression par un dispositif chambre/piston réglable par vis

cisaillement. Après une phase d'assouplissement à faible vitesse de déformation, le cisaillement est imposé de manière sinusoïdale à différentes amplitudes et à trois fréquences : 0.1Hz, 1Hz et 4Hz. Les efforts de compression et de cisaillement sont enregistrés en continu à l'aide de deux capteurs d'efforts. Pour la première fréquence uniquement, un dispositif de mesure de champ (Aramis) nous permet d'obtenir le champ de déplacement d'une lamelle d'élastomère.

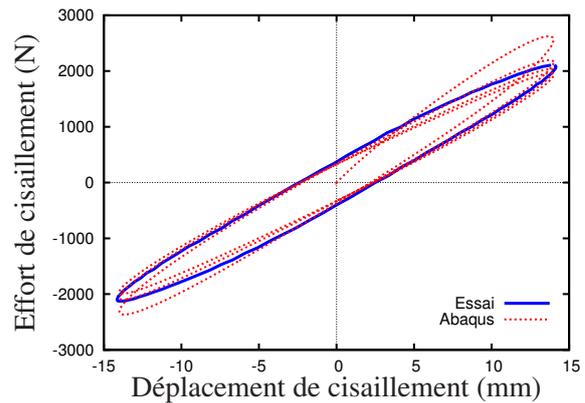
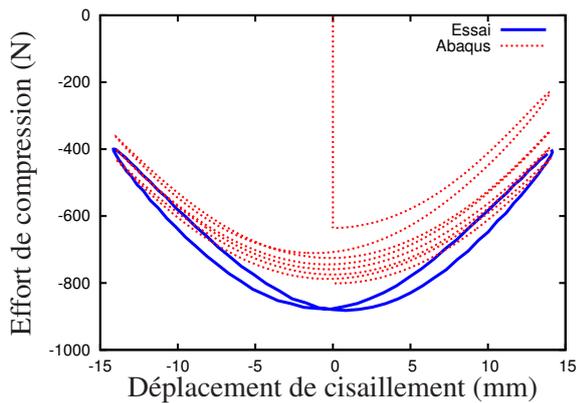


FIGURE 2 – Réponse global pour 14mm de cisaillement, 3mm de compression à 4Hz

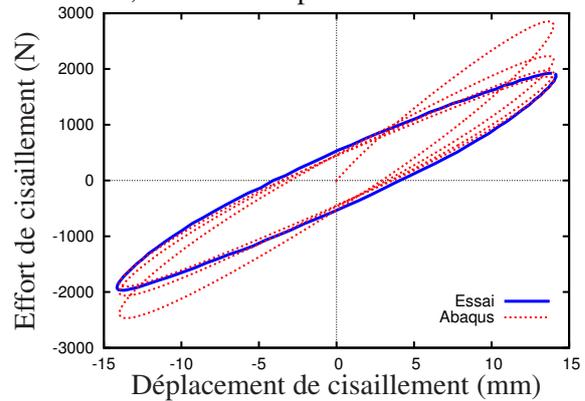
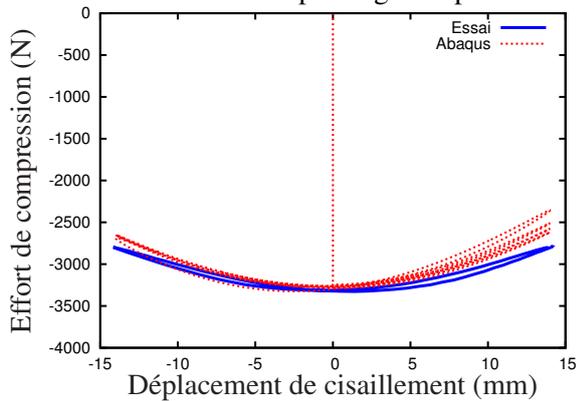


FIGURE 3 – Réponse global pour 14mm de cisaillement, 12mm de compression à 4Hz

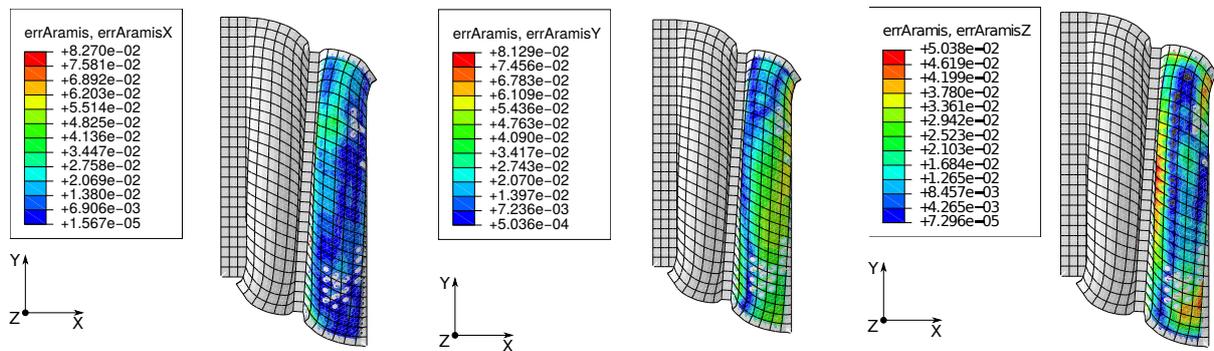


FIGURE 4 – Ecart local simulation/essais sur le champs de déplacement pour 12mm de compression, 14mm de cisaillement à 0.1Hz calculé au maximum de cisaillement

### 3.2 Confrontation numérique/expérimental

Comme le montre en partie les figures 2 et 3, le modèle permet de correctement décrire le comportement global des paliers élastomère/métal et ce pour différentes combinaisons d’amplitudes de compression et de cisaillement appliquées et à différentes fréquences.

La figure 4 présente des isocouleurs d’écarts relatifs simulation numérique/mesure de champ qui montrent que la cinématique locale semble correctement décrite par le modèle car les écarts locaux maximum restent inférieurs à 8% (exception faite de zones en bord du domaine où la mesure de champ atteint ses limites).

## 4 Discussions

Les résultats obtenus avec le modèle proposé sont très encourageants et répondent quasiment pleinement à la problématique industrielle qui était d’avoir un modèle prédictif, valable en multi-axial dans une gamme de sollicitations connue (en amplitude et en fréquence) et à différentes températures. Pour l’aspect température, les dépendances à la température ont été identifiées il nous reste à valider les résultats d’identification à partir d’essais bi-axiaux (traction/torsion) à différentes températures. Sur le plan scientifique la prise en compte de l’effet Payne a été réalisée en négligeant la réversibilité partielle qui est constatée expérimentalement. La combinaison de chargements multi-axiaux à différentes vitesses et à différentes amplitudes peut faire jouer un rôle non négligeable à cette réversibilité. Cet effet mérite donc d’être plus amplement exploré d’autant plus qu’il n’existe que très peu d’approches dans la littérature qui l’ont abordé sur le plan de la modélisation.

### Références

- [1] A. Delattre, S. Lejeunes, S. Méo, F. Lacroix, C. Richard. *Caractérisation et modélisation d’un élastomère dissipatif : application au pré-dimensionnement de pièces lamifiées élastomère-métal*, Actes du 11e Colloque National en Calcul des Structures, 2013
- [2] A.R. Payne. *The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates*, Part I. Rubber Chem. & Tech., 432-443, 1963.
- [3] P. Höfer, A. Lion. *TModeling of the frequency and amplitude dependant material properties of filler reinforced rubber*, J. Mech. Phys. Solids, 500-520, 2009.
- [4] J.M. Martinez, A. Boukamel, S. Méo, S. Lejeunes. *Statistical approach for a hyper-visco-plastic model for filled rubber : Experimental characterisation and numerical modeling*, Eur. J. Mech. A/Solids, 1028-1039, 2011.
- [5] A. Delattre, S. Lejeunes, S. Méo, F. Lacroix, C. Richard. *On the multiaxial amplitude and frequency dependent behavior of rubber : experiments and constitutive modeling*, Rubber Chem. & Tech., 557-578, 2014.
- [6] S. Lejeunes, A. Boukamel, B. Cochelin. *Analysis of laminated rubber bearings with a numerical reduction model method*, Arch. Appl. Mech., 311-326, 2006.