



HAL
open science

Un modèle élasto-visco-plastique micro-physiquement motivé pour les élastomères chargés. Caractérisation en fatigue

Julie Grandcoin, Adnane Boukamel

► To cite this version:

Julie Grandcoin, Adnane Boukamel. Un modèle élasto-visco-plastique micro-physiquement motivé pour les élastomères chargés. Caractérisation en fatigue. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495616

HAL Id: hal-01495616

<https://hal.science/hal-01495616>

Submitted on 25 Mar 2017

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.

Public Domain

Un modèle Élasto-visco-plastique micro-physiquement motivé pour les élastomères chargés - Caractérisation en fatigue

Julie Grandcoin — Adnane Boukamel

Ecole Centrale de Marseille

IMT/Technopôle Château-Gombert, 13451 Marseille Cedex 20

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille

31 chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille cedex 20

grandcoin@lma.cnrs-mrs.fr

RÉSUMÉ. Ce papier présente une démarche micro-physiquement motivée, pour la modélisation du comportement hyper-élasto-visco-plastique d'un élastomère chargé. Une approche statistique est utilisée pour développer un modèle constitué d'assemblage de modèles rhéologiques généralisés aux grandes déformations. Ce modèle rhéologique statistique présente l'avantage de refléter le comportement du matériau dans un large spectre de temps caractéristiques tout en réduisant le nombre de paramètres à identifier. Une campagne d'essais de fatigue et de caractérisation permet d'identifier les paramètres du modèle et de décrire leur évolution vis-à-vis de la fatigue.

ABSTRACT. This paper is concerned with the micro-physically motivated elasto-visco-plastic behavior simulation of a filled elastomer. A statistical approach is used to develop a model with an assembly of rheological model for finite strains. This model allows to predict the material behavior in a large range of characteristic times and to reduce the number of parameters to identify. A fatigue experimental procedure is realised in order to analyze evolution of model parameters vs the number of fatigue cycles.

MOTS-CLÉS : Elastomère chargé, Hyper-élasto-visco-plasticité, Modèle statistique, Fatigue

KEYWORDS: Filled elastomer, Hyper-elasto-visco-plasticity, Statistical model, Fatigue

1. Introduction

Les élastomères appartiennent à la famille des hauts polymères. Ils sont donc constitués de chaînes macromoléculaires plus ou moins longues, avec ou sans ramifications, ce qui leur confère une grande déformabilité et un comportement dynamique souvent très dissipatif. Ces propriétés font qu'ils sont de plus en plus présents dans les industries aéronautique, automobile, du bâtiment... Leurs conditions d'utilisation se révèlent souvent très sévères compte tenu des sollicitations auxquelles ils sont soumises et requièrent une connaissance fine du comportement du matériau notamment vis-à-vis de l'endommagement par fatigue.

Dans la littérature, de nombreux travaux ont été consacrés à la modélisation de l'endommagement des élastomères et en particulier à l'effet Mullins (Lin *et al.*, 2003, Miehe, 1995) et se tournent aujourd'hui vers le comportement en fatigue. L'objet de ce travail est de proposer un modèle hyper-élasto-visco-plastique, basé sur des observations microscopiques réalisées sur un élastomère en silicone chargé en silice et d'en identifier les paramètres en fonction de la fatigue du matériau. L'objectif *in fine* est de développer un modèle hyper-élasto-visco-plastique couplé à une loi d'endommagement par fatigue.

2. Motivations microphysiques

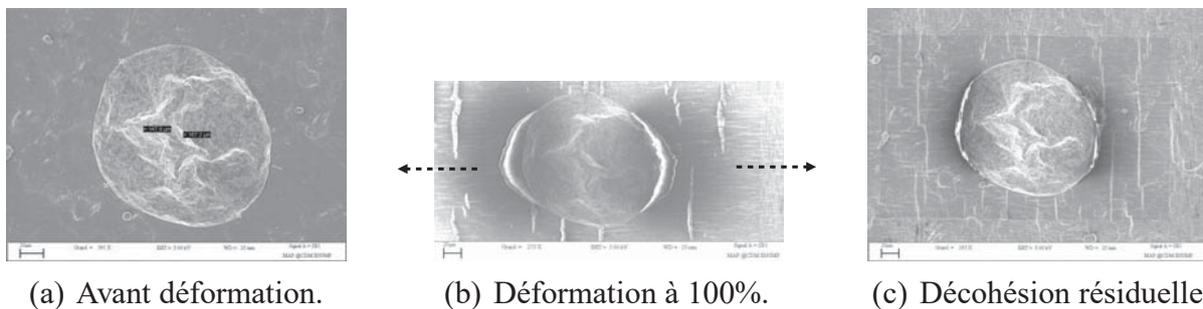


Figure 1. Mise en évidence de la décohésion à l'interface charges/gomme.

Des observations au MEB, réalisées en collaboration avec le CENTRE DES MATÉRIAUX de l'ENSMP, sur un élastomère en silicone, avec des charges de silice regroupées en agglomérats de quelques dizaines de μm , ont permis de dégager les constatations suivantes :

- sous chargement en traction *in situ* du matériau, on observe une décohésion entre les agglomérats de charges et la gomme, (Figure 1(b)) ;
- après décharge, cette décohésion induit une déformation résiduelle à caractère permanent, puisqu'elle reste visible après 15 jours de repos (Figure 1(c)).

Ces observations à l'échelle microscopique, nous permettent de considérer l'élastomère comme un mélange bi-phasique constitué d'inclusions noyées dans une matrice. Cependant la zone de transition entre ces deux phases reste encore méconnue,

mais semble être le siège d'interactions jouant un rôle important dans les micro-mécanismes de déformation de ces matériaux. On peut donc dégager un Volume Élémentaire Représentatif, comprenant :

- une matrice élastomérique dense (*Gomme*) à comportement hyperélastique,
- des inclusions constituées d'agglomérats de charges faiblement réticulées, dont le comportement sera supposé hyperélastique ou hyper-viscoélastique,
- une zone d'interface, entre la gomme et l'inclusion, avec un comportement plastique ou visco-plastique.

Par ailleurs on adoptera l'hypothèse d'*affinité*, c'est-à-dire que la déformation dans la matrice correspond à la déformation macroscopique. Pour modéliser le comportement de ce V.E.R. (Boukamel, 2006), nous utilisons un modèle rhéologique associant en parallèle, une branche hyperélastique représentant le comportement de la matrice et une branche élasto-dissipative pour le comportement de l'inclusion et de l'interface (voir Figure 2).

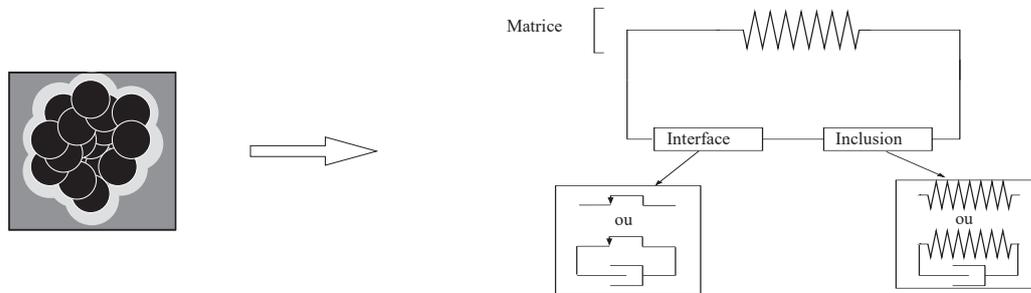


Figure 2. Modélisation rhéologique du V.E.R.

3. L'approche statistique

L'idée centrale de cette approche est de modéliser le comportement de l'élastomère chargé via l'association des schémas rhéologiques des différentes populations de V.E.R. constituant le matériau. L'approche statistique proposée ici permet donc de généraliser les assemblages parallèles d'un nombre fini de branches à un assemblage statistique à une infinité de branches. L'intérêt de cette démarche réside en une couverture du comportement de plusieurs populations d'agglomérats de charges avec différents temps caractéristiques de retard de la réponse et différents seuils de glissement aux interfaces. Cette approche présente ainsi les avantages d'un modèle multi-branches, sans pour autant augmenter le nombre de paramètres du modèle (Martinez, 2005) et s'inscrit dans le cadre des modélisations micro-mécaniquement motivées des élastomères chargés que l'on trouve dans la littérature. Ces modélisations sont souvent basées sur des hypothèses concernant les interactions entre les agglomérats de charges et la matrice élastomérique (Drozdov *et al.*, 2002), ou concernant les mécanismes de déformation et de réarrangement du réseau macro-moléculaire (Reese, 2003).

Sur la base de cette logique, on peut donc construire un modèle statistique en partant

du schéma rhéologique du V.E.R. Ainsi chaque branche schématise une population d'agglomérats associée à une variable aléatoire ω et une probabilité de présence d'une telle population dans la phase des inclusions $\mathcal{P}(\omega)d\omega$.

Pour la présente application, nous avons adopté un comportement hyperélastique pour les inclusions, avec une loi d'interface rigide visco-plastique. La représentation rhéologique de ce modèle est décrite sur la figure 3.

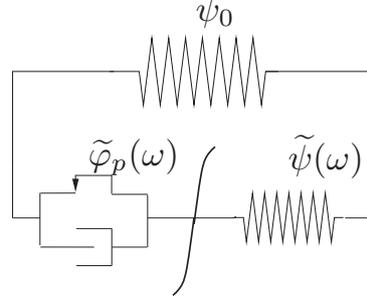


Figure 3. *Modèle statistique adopté.*

Ainsi, l'énergie libre spécifique et le pseudo-potential de dissipation du mélange s'écrivent, avec une description eulérienne, sous la forme (1) :

$$\begin{cases} \psi = \psi_0(\bar{\bar{B}}) + \int_0^\infty \tilde{\psi}(\omega, \bar{\bar{B}}_e(\omega)) \mathcal{P}(\omega)d\omega, \\ \varphi^{int} = \int_0^\infty (\tilde{\varphi}_p(\omega, \bar{\bar{D}}_p^o(\omega))) P(\omega)d\omega, \end{cases} \quad (1)$$

avec un choix des formes de potentiels telles que :

$$\begin{cases} \rho\psi_0(\bar{\bar{B}}) = c_1(I_1 - 3) + c_2 \ln \frac{I_2}{3}, \\ \rho\tilde{\psi}(\omega, \bar{\bar{B}}_e(\omega)) = a(\omega)(I_1^e(\omega) - 3), \\ \tilde{\varphi}_p(\omega, \bar{\bar{D}}_p^o(\omega)) = \frac{\eta(\omega)}{2} (\bar{\bar{D}}_p^o(\omega) : \bar{\bar{D}}_p^o(\omega)) + \chi(\omega) \|\bar{\bar{D}}_p^o(\omega)\| \end{cases} \quad (2)$$

Le choix des fonctions statistiques est conditionné par le spectre de temps caractéristiques de retard visé. Ainsi, pour privilégier la réponse instantanée, on choisit une fonction de distribution $P(\omega)$ sous forme d'une GAUSSIENNE centrée à l'origine et de variance Ω . Pour les variations, en fonction de ω , des caractéristiques hyperélastiques, visqueuses et plastiques, plusieurs jeux de fonctions ont été testés, pour aboutir à :

$$a(\omega) = a_0 (Exp[\omega^2] + \ln[\sqrt{\omega} + 1]), \quad \eta(\omega) = \bar{\eta} \quad \text{et} \quad \chi(\omega) = \bar{\chi}\omega. \quad (3)$$

Les paramètres à identifier sont donc au nombre de **6** : ($c_1, c_2, a_0, \bar{\eta}, \bar{\chi}$ et Ω).

4. Identification des paramètres du modèle

Dans le but d'identifier les paramètres du modèle et d'en analyser l'évolution vis-à-vis de la fatigue, nous avons réalisé une campagne d'essais sur des éprouvettes de

double-cisaillement constituées d'un silicone chargé en silice. Ces essais ont été menés dans une enceinte climatique à $25^{\circ}C$ et ont consisté en :

- des essais de fatigue cycliques à différents nombres de cycles, fréquences et amplitudes ;
- des essais de caractérisation réalisés après chaque séquence de fatigue (de 1000 à 500000 cycles suivant les sollicitations) regroupant un essai de relaxation à amplitude progressive, et des essais triangulaires à amplitude progressive et à différentes vitesses de déformations.
- enfin, des essais de validation à amplitude progressive avec pré-déformation.

Les essais de caractérisation servent à l'identification des paramètres selon une stratégie permettant de distinguer les effets de viscosité de ceux dus à la plasticité, en identifiant d'abord sur des essais quasi-statiques puis en ajustant partiellement les paramètres sur des essais de relaxation et sur des essais cycliques triangulaires à amplitude progressive et à différents taux de déformations (Boukamel, 2006). Les identifications réalisées après chaque séquence de fatigue, démontrent la bonne capacité de ce modèle à traduire le comportement statique et dynamique, à différents taux de déformations. En effet, les courbes présentées sur les Figures 4(a),4(b) et 4(c) montrent une bonne corrélation entre les résultats d'identification et les réponses expérimentales, à l'issue de chacune des trois étapes d'identification (Erreur relative respectivement égale à 11.4%, 1.53% et 12.3%).

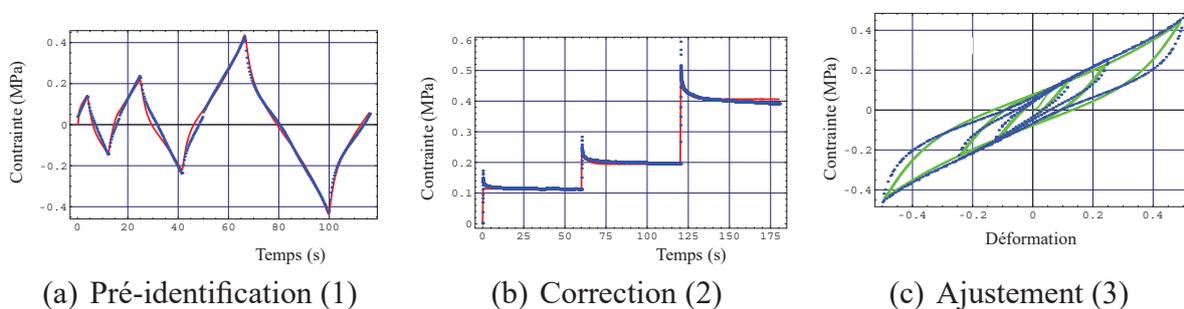


Figure 4. Résultats d'identification des paramètres du modèle

L'évolution des paramètres identifiés, en fonction du nombre de cycles de fatigue, (5(b)) indique que :

- on constate une rigidification du comportement des inclusions au cours des cycles de fatigue, cette rigidification peut être attribuée à une réticulation thermique-ment activée à l'interface inclusions-gomme,
- la ruine de l'éprouvette se traduit par une macro-fissure au milieu du minisque (*cf.* figure 5(a)),
- le comportement de la matrice n'est que tardivement affecté par la fatigue (phase de macro-fissuration),
- le comportement élasto-dissipatif des inclusions de l'interface est relativement plus affecté par la fatigue.

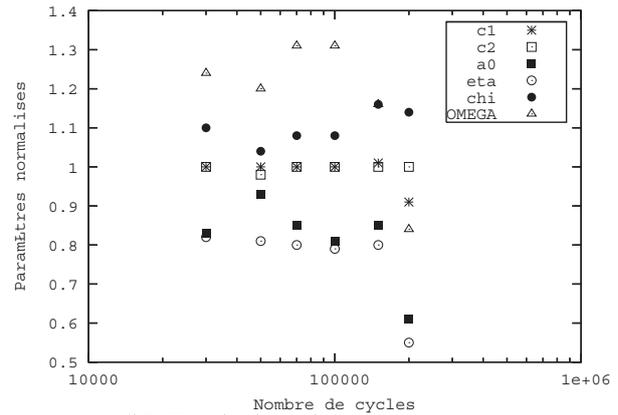
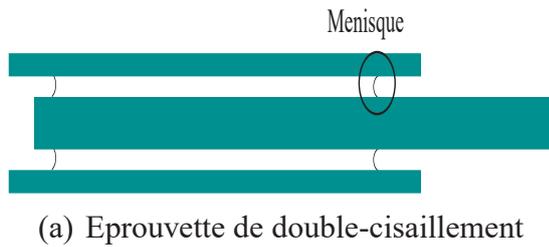


Figure 5. Essais de fatigue.

5. Conclusion

Une approche statistique a été proposée pour le développement d'un modèle hyper-élasto-visco-plastique permettant de couvrir un large domaine de déformations et/ou de temps de réponse caractéristiques. Il présente l'avantage des modèles multi-branches, mais avec un faible nombre de paramètres caractéristiques à identifier. Par ailleurs, nous avons mis au point une stratégie d'identification permettant l'évaluation de ces paramètres moyennant une corrélation avec des résultats d'essais expérimentaux réalisés à différentes séquences de fatigue et sous différentes conditions de chargement, permettant ainsi de quantifier l'évolution des paramètres en fonction du nombre de cycles de fatigue.

6. Bibliographie

- Boukamel A., Modélisations mécaniques et numériques des matériaux et structures en élastomères, Habilitation à diriger des recherches, Université de la Méditerranée, 2006.
- Drozdoz A., Dorfmann L., « The nonlinear viscoelastic response of carbon black-filled natural rubbers », *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, p. 5699-5717, 2002.
- Lin R. C., Schomburg U., « A finite elastic-viscoelastic-elastoplastic material law with damage : theoretical and numerical aspects », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 192, p. 1591-1627, 2003.
- Martinez J., Modélisation et caractérisation du comportement hyper-visco-plastique d'un élastomère sous sollicitations multi-harmoniques et à différentes températures, Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 2005.
- Miehe C., « Discontinuous and continuous damage evolution in Ogden-type large-strain elastic materials », *European Journal of Mechanics*, vol. 14, n° 5, p. 697-720, 1995.
- Reese S., « A micromechanically motivated material model for the thermo-viscoelastic material behaviour of rubber-like polymers », *International Journal of Plasticity*, vol. 19, p. 909-940, 2003.