



**HAL**  
open science

## Caractérisation du comportement mécanique d' élastomères silicones chargés et non chargés

Luc Meunier, Grégory Chagnon, Denis Favier, Laurent Orgéas

► **To cite this version:**

Luc Meunier, Grégory Chagnon, Denis Favier, Laurent Orgéas. Caractérisation du comportement mécanique d' élastomères silicones chargés et non chargés. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-01978979

**HAL Id: hal-01978979**

**<https://hal.science/hal-01978979>**

Submitted on 12 Jan 2019

**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.

## Caractérisation du comportement mécanique d' élastomères silicones chargés et non chargés.

Luc Meunier, Grégory Chagnon, Denis Favier & Laurent Orgéas

Laboratoire Sols, Solides, Structures (3S), Universités de Grenoble  
Domaine Universitaire, BP53  
38041 Grenoble cedex 9, France  
gregory.chagnon@hmg.inpg.fr

### Résumé :

*Le silicone ou polysiloxane est formé de macromolécules articulées autour de liaisons silicium-oxygène. Dans le cas des élastomères silicones, les chaînes sont liées entre elles par réticulation. De plus, ces élastomères silicones peuvent être chargés de silice pour améliorer les propriétés mécaniques, à l'instar des caoutchoucs. Pour caractériser le comportement de deux élastomères silicones, non-chargé et chargé, des essais de traction simple, traction plane ont été réalisés. Les résultats de ces essais sont analysés en ce qui concerne la non-linéarité, l'effet Mullins, l'hystérésis, les effets viscoélastiques et la relaxation. Les résultats obtenus montrent dans quelle mesure les comportements mécaniques de ces deux élastomères silicone peuvent être approchés par de simples lois hyperélastiques, et ce pour différents potentiels hyperélastiques de la littérature.*

### Abstract :

*Silicones are macromolecules which structure is built with silicon and oxygen. In a silicone rubber, the macromolecules are tied by cross-linking. Silicon rubbers can be filled with silica particles in order to improve their mechanical properties. Simple tension and plane tension tests have been performed on two silicone rubbers, without and with silica particles. Experimental results are analysed regarding non-linear behaviour, Mullins effects, hysteresis, viscoelasticity and relaxation effects. Experimental results also highlight the limits of the use of hyperelastic constitutive equation to model the mechanical behaviour of these two silicone rubbers. A comparison of usual elastic potential functions able to represent the two silicone rubbers behavior is presented.*

**Mots-clefs : Silicone, expérimentation, hyperélasticité**

### 1 Introduction

Dans le cadre d'une collaboration avec le CHU de Grenoble, une étude est menée sur des muscles artificiels implantables dans le corps humain. Le besoin d'un matériau biocompatible pouvant subir de grandes déformations a conduit à choisir un élastomère silicone pour concevoir ce muscle. Pour cela, deux formulations de silicone du commerce ont été choisies, i.e. une formulation chargée en silice et une autre non-chargée. Dans un premier temps, le protocole expérimental utilisé pour élaborer des membranes avec les formulations choisies (§2) est présenté. Dans un deuxième temps, des essais mécaniques de traction simple et traction plane ont été réalisés sur ces membranes (§3). Les résultats des essais permettent alors d'évaluer les différents phénomènes qui caractérisent le comportement de silicones chargé et non chargé (§4). Enfin, la capacité des modèles hyperélastiques classiques à décrire leur comportement a été étudiée (§5).

## 2 Présentation des élastomères silicones – élaboration

Les élastomères silicones ont un squelette qui est constitué d'une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène (figure 1). Les groupements notés R varient d'un silicone à l'autre pour en modifier les propriétés. Du fait de leur construction chimique, les silicones peuvent être biocompatibles. Un grand intérêt leur est porté dans le domaine médical.

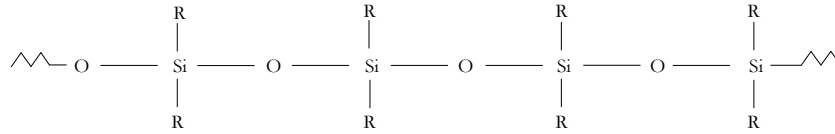


Figure 1 : représentation d'une partie du squelette d'un élastomère silicone

Deux silicones ont été choisis pour les expériences, les silicones RTV 141 et le RTV 3428 produits par Rhodia Silicones. Le RTV 141 est un silicone non chargé, totalement transparent. Le RTV 3428 est un silicone blanc chargé de silice. Pour chacun des deux produits, le silicone se présente au départ sous la forme de deux pâtes dont l'une d'elles contient un catalyseur. Le mélange des deux composants amorce la réticulation. Le mélange introduit des bulles gazeuses qui ne disparaissent pas lors de la réticulation ; aussi ce mélange est au préalable passé sous vide. On place alors le produit dans un moule dans lequel on laisse se produire la réticulation.

Pour les essais présentés au §3, un unique protocole d'élaboration a été utilisé. Le mélange est placé sous vide pendant quinze minutes avant et après moulage, le tout étant ensuite mis dans une étuve à 80°C pendant 2h.

## 3 Protocole expérimental

L'application visée étant une structure de type membrane, les matériaux n'ont été testés qu'en contraintes planes, i.e. en traction simple et en traction plane. L'essai de traction plane est équivalent à un essai de cisaillement (Charlton *et al* (1994)). Pour les deux types de chargement, des essais cycliques à différentes vitesses de déformation ont été réalisés ainsi que des essais de relaxation. Ils ont été effectués sur une machine de traction mécanique MTS 4M équipée d'un capteur de force 250N placé en série avec des mors, ce qui permet de mesurer la contrainte axiale moyenne nominale  $F/S_0$  (Figure 2a).  $F$  est la force mesurée par le capteur et  $S_0$  la section initiale de l'éprouvette. Les mors sont de type auto-serrants afin d'éviter le glissement des échantillons en grandes déformations. Les déformations sont mesurées à l'aide d'une caméra CCD (25Hz, 1024 x 1280 pixels) et d'un logiciel de suivi de cibles. Pour les deux types d'éprouvettes les cibles sont collées avec une colle silicone. Le système associé à la caméra mesure la déformation moyenne dans la zone située entre les cibles notées  $dL/L_0$ , où  $dL$  et  $L_0$  sont respectivement la variation de longueur et la longueur de la zone utile.

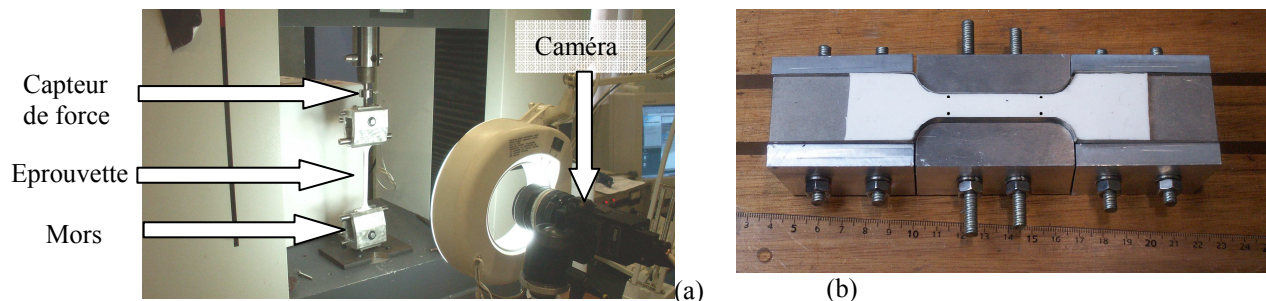


Figure 2 : Dispositif expérimental : (a) machine de traction ; (b) éprouvette de traction simple

Les éprouvettes de traction simple sont fabriquées de manière à avoir des déformations les plus homogènes possibles dans la zone étudiée (voir figure 2b). La zone utile de l'éprouvette mesure

50mm de long et 12mm de large, l'épaisseur étant de l'ordre de 2mm ; variant légèrement d'une éprouvette à l'autre, elle est mesurée pour chaque éprouvette.

Pour la traction plane (voir figure 3), les éprouvettes sont rectangulaires et serrées directement entre les mors. La zone utile mesure 70 mm de large et 10 mm de haut. La géométrie de l'éprouvette et les serrages par les mors permettent de réduire au maximum la déformation suivant la direction  $x$ .

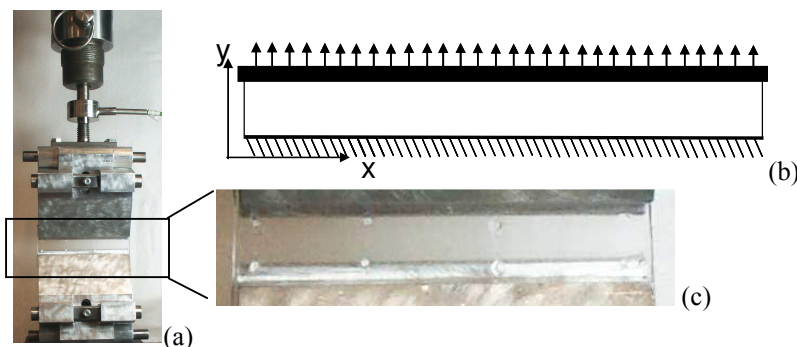


Figure 3 : Dispositif expérimental de traction plane :

(a) ensemble de serrage, (b) principe de la traction plane, (c) zone utile de l'éprouvette

## 4 Résultats expérimentaux

### 4.1 Silicone chargé (RTV 3428)

Dans un premier temps, des essais de traction simple et traction plane cyclique à une vitesse de déformation axiale de  $2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ont été réalisés. L'essai de traction (Fig.4.a) était constitué de cinq cycles charge-décharge limités par un effort donné, et cela pour 8 niveaux d'efforts croissants. Un seul niveau d'effort maximum était utilisé pour la traction plane (Fig.4b).

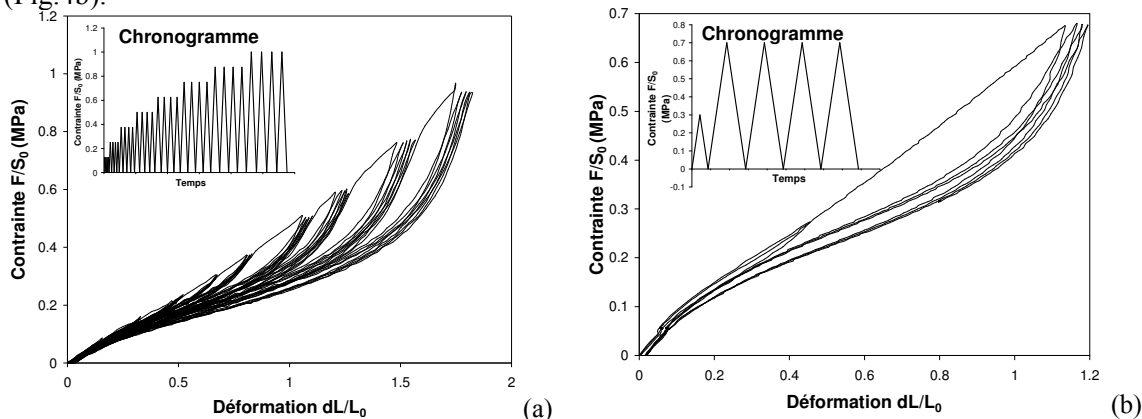


Figure 4 : Réponse d'une éprouvette vierge soumise à un chargement cyclique à  $2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ :

(a) traction simple et (b) traction plane

On observe différents phénomènes classiques pour les élastomères chargés, à savoir un fort effet Mullins (1969) caractérisé par une très nette différence entre la première charge et les suivantes pour un cycle donné, une relaxation cyclique et des phénomènes d'hystérésis. Pour ce silicone chargé, l'effet Mullins est important tandis que l'hystérésis est faible.

L'influence des paramètres tels que le temps et la vitesse a été testée en réalisant un essai de relaxation et des essais de traction cyclique à différentes vitesses de déformation. La figure 5a présente l'essai de relaxation en traction simple réalisée sur une éprouvette étirée à 180%. La contrainte initiale est de 0.9 MPa, une chute de contrainte de l'ordre de 3.75% par décade est observée. Des essais de traction cycliques (Fig. 5b) ont été réalisés à 3 vitesses de déformation:

$2.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  et  $4.5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Dans la gamme de vitesse de déformation considérée, la vitesse n'influe pas sur le comportement du matériau.

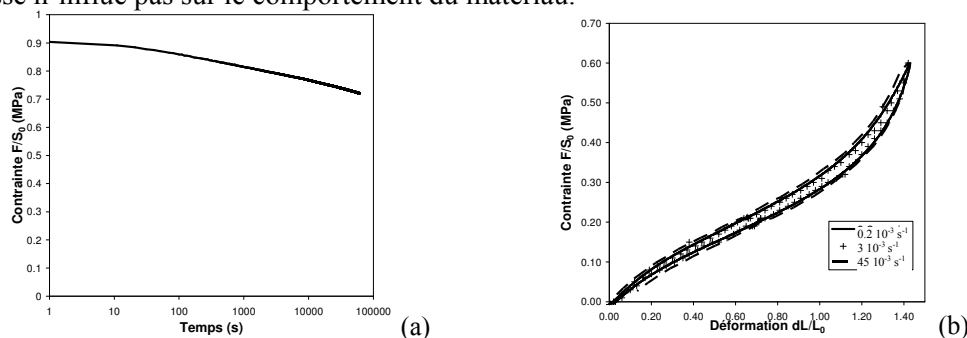


Figure 5 : Influence des paramètres temps et vitesse sur le comportement mécanique du silicone chargé : (a) essai de relaxation (traction simple à 180%), (b) essai de traction cyclique (charge-décharge) à 3 vitesses de déformation

#### 4.2 Silicone non chargé (RTV 141)

Le même type d'essais a été réalisé sur le matériau non chargé mais pour des valeurs de déformation plus faibles car la rupture du matériau intervient à environ 120% de déformation contre 400% pour le silicone chargé.

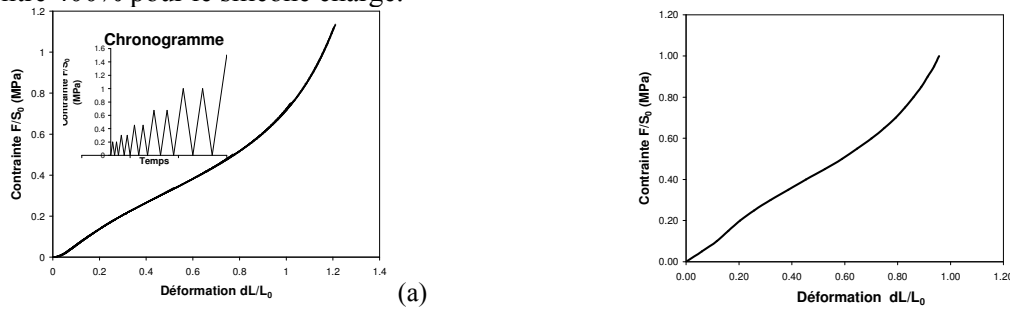


Figure 6 : Essais sur des éprouvettes vierges : (a) traction simple cyclique et (b) traction plane

La figure 6 présente des essais cycliques effectués à  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . D'une part, les charges et décharges sont superposées ; d'autre part, ce matériau ne présente pas d'effet Mullins, la première charge étant semblable aux suivantes. Par ailleurs, jusqu'à des déformations relativement importantes ( $\approx 80\%$ ) les courbes sont quasiment linéaires dans l'espace contrainte nominale – déformation nominale.



Figure 7 : Influence des paramètres temps et vitesse sur le comportement mécanique du silicone : (a) essai de relaxation (traction à 55 %), (b) essai de traction cyclique (charge-décharge) à 3 vitesses

Un essai de relaxation est présenté sur la figure 7a. Il montre une chute de contrainte de 2.5% par décade. Cette dépendance est donc moins importante que pour le matériau chargé. Des essais cycliques ont été réalisés à trois vitesses différentes, i.e.  $2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  et  $4.5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Les résultats présentés sur la figure 7b montrent des courbes superposées démontrant l'indépendance du comportement du matériau vis-à-vis de la vitesse de sollicitation pour les vitesses considérées.

## 5 Modèles

### 5.1 Modélisation du silicone non chargé (RTV 141)

Les résultats expérimentaux indiquent que le silicone non chargé présente un comportement hyperélastique quasiment parfait. En effet, il ne dépend pas de la vitesse ni de l'histoire du chargement. Une loi hyperélastique paraît donc tout à fait adaptée pour le modéliser. Pour représenter à la fois la traction simple et la traction plane, plusieurs potentiels ont été testés, i.e. les potentiels de Mooney (1940), Hart-Smith (1966) et Haines et Wilson (1979). Leurs formulations s'expriment en fonction de deux paramètres invariants  $I_1$  et  $I_2$  du tenseur des dilatations de Cauchy-Green droit. Leurs formes sont présentées dans le tableau 1.

Mooney	$W_{MR} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$
Hart-Smith	$W_{HS} = C_1 \int \exp(C_3(I_1 - 3)^2) dI_1 + C_2 \ln\left(\frac{I_2}{3}\right)$
Haines et Wilson	$W_{HW} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + C_{01}(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)$

Tableau 1 : Forme des potentiels hyperélastiques

Les courbes de la figure 8 représentent les prévisions des modèles identifiés ainsi que les données expérimentales du § 3. Les valeurs des coefficients sont présentées dans le tableau 2. Le modèle de Mooney peut uniquement décrire le comportement à faibles déformations. Les modèles de Hart-Smith et Haines et Wilson permettent en revanche de décrire l'ensemble de la courbe. Néanmoins, le modèle de Haines et Wilson compte un grand nombre de paramètres, ce qui le rend délicat d'emploi. Le modèle de Hart-Smith semble le plus pertinent pour décrire ce matériau.

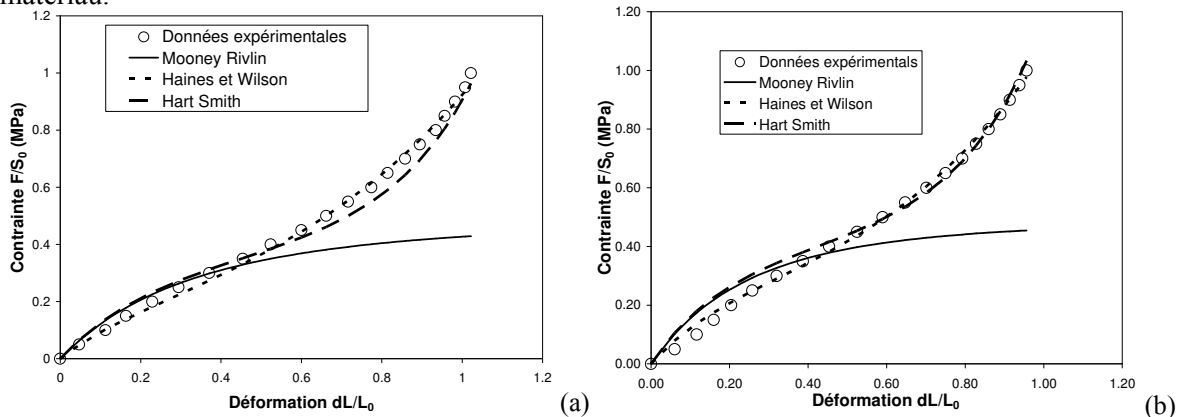


Figure 8 : Comparaison des prévisions des modèles hyperélastiques avec les données expérimentales en (a) traction simple, (b) traction plane.

Mooney-Rivlin	$C_1=0.25$	$C_2=0$				
Hart-Smith	$C_1=0.25$	$C_2=0.022$	$C_3=0.19$			
Haines et Wilson	$C_{10}=0.09$	$C_{20}=-0.06$	$C_{30}=0.04$	$C_{01}=0.1$	$C_{02}=-0.03$	$C_{11}=0.16$

Tableau 2 : Résultats de l'identification pour le silicone non chargé

### 5.2 Modélisation du silicone chargé :

A la vue des résultats expérimentaux du paragraphe précédent la modélisation par une loi de comportement hyperélastique implique de fortes restrictions :

- pour s'affranchir de l'effet Mullins, les résultats expérimentaux utilisés ont été obtenus sur une deuxième charge à 0.6 MPa après une première charge à 0.8 MPa (les valeurs des contraintes ont été choisies pour l'exemple).

- l'hystérésis n'est pas non plus prise en compte. Les modèles sont recalés sur la charge en considérant que la décharge se fait par le même chemin.

Les valeurs des paramètres sont présentées dans le tableau 3. Les courbes de la figure 9 présentent une comparaison entre les prévisions données par les potentiels de Mooney, Haines et Wilson ainsi que Hart-Smith avec les résultats des expériences en traction et traction plane.

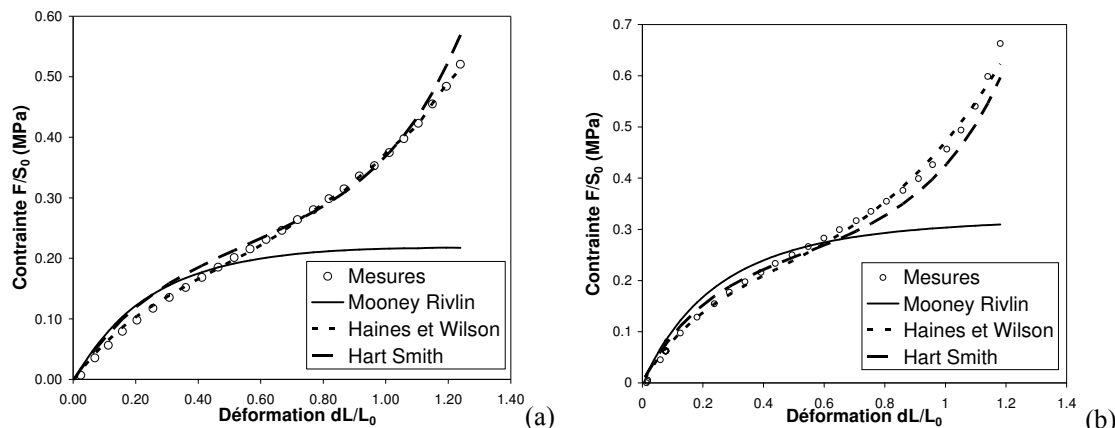


Figure 9 : Comparaison des prévisions des modèles hyperélastiques avec les données expérimentales

Mooney-Rivlin	$C_1=0.08$	$C_2=0.08$				
Hart-Smith	$C_1=0.15$	$C_2=0$	$C_3=0.085$			
Haines et Wilson	$C_{10}=0.14$	$C_{20}=-0.02$	$C_{30}=0.02$	$C_{01}=0.0$	$C_{02}=0.0$	$C_{11}=0.01$

Tableau 3 : Résultats de l'identification pour le silicone chargé

En tenant comptes des hypothèses fortes faites pour la modélisation de ce matériau, la qualité des simulations sur ce matériau est similaire au matériau précédent. Les modèles de Hart-Smith et Haines et Wilson sont encore une fois les plus performants.

## 6 Conclusions

Les essais présentés permettent de comparer des modèles hyperélastiques et évaluer leur capacité à représenter un silicone chargé et un silicone non-chargé. Par la suite, des essais de compression et de gonflement doivent permettre d'approfondir cette évaluation. Par ailleurs, d'autres phénomènes doivent être pris en compte dans la modélisation du comportement du silicone chargé, levant les fortes restrictions effectuées ici. Des essais doivent notamment être effectués pour caractériser l'effet Mullins et ensuite le modéliser.

**Remerciements** : Luc MEUNIER remercie la région Rhône-Alpes et l'ANR qui financent ses recherches dans le cadre des projets OSROBOT et OSMOTEUR.

## Références

- Charlton, D. J., Yang, J., et The, K. K. 1994 A review of methods to characterize rubber elastic behaviour for use in finite element analysis. *Rubber Chem. Technol.*, **67**, 481-503
- Haines, D. W., Wilson, D. W. 1979 Strain energy density functions for rubber like materials *J. Mech. Phys. Solids* **27**, 345-360
- Hart-Smith, L. J. 1966 Elasticity parameters for finite deformations of rubber-like materials. *Z. Angew. Math. Phys.* **17**, 608-626
- Mooney, M. 1940 A theory of large elastic deformation. *J. Appl. Phys.*, **11**, 582-592
- Mullins, L. 1969 Softening of rubber by deformation. *Rubber Chem. Technol.*, **42**, 339-362