

Résumé

Dans cette étude, une nouvelle méthode d'identification de paramètres hyperélastiques est proposée, basée sur la reconstruction du champ de source de chaleur de deux manières différentes. La première utilise l'équation de diffusion de la chaleur, et nécessite de connaître les paramètres thermo-physiques du matériau. La seconde nécessite d'avoir le champ cinématique et de choisir un modèle hyperélastique, qui contient les paramètres à identifier. Cette méthode permet d'effectuer l'identification à l'échelle locale, c'est-à-dire sans connaître les conditions aux limites du problème.

La méthode a été appliquée à une éprouvette de nitrile, soumise à un chargement multiaxial. Au vu des grandes déformations subies par le matériau, une technique de compensation du mouvement a été développée afin d'obtenir les champs cinématiques et thermiques aux mêmes points.

Mots-clés : identification inverse, source de chaleur, hyperélasticité, thermographie infrarouge, corrélation d'image numérique, élastomère

Introduction

Bien que le comportement mécanique des élastomères inclue de nombreux phénomènes physiques, l'hyperélasticité est généralement utilisée comme première approximation [1] afin de modéliser leur comportement. Étant donné que les paramètres hyperélastiques sont sensibles à la multi-axialité du champ de déformation et de contrainte, plusieurs essais de caractérisation sont menés pour identifier les paramètres du modèle, typiquement la traction uniaxiale, la traction équi-biaxiale ou la compression et le cisaillement (pur ou simple). L'identification est menée à partir des différents jeux de paramètres obtenus.

Récemment, une autre approche a été proposée [2]. Il s'agit d'effectuer un seul essai, à la condition qu'il soit suffisamment hétérogène pour reproduire les trois essais précédents. Plusieurs méthodes d'identification ont été proposées, comme la méthode des champs virtuels (MCV) ou la méthode des éléments finis (FEMU). Cependant pour chacune de ces méthodes, les conditions aux limites doivent être connues, ce qui peut être complexe à mesurer voire non réalisable dans certaines situations. L'objectif de cette étude est de proposer une méthode qui permette l'identification à l'échelle locale, c'est-à-dire à partir de grandeurs locales, sans connaître les conditions aux limites du problème.

Obtention des sources de chaleur

La première méthode permettant de reconstruire le champ de source de chaleur est basée sur l'équation de diffusion de la chaleur. En considérant que la conduction thermique suit la loi de Fourier, l'équation de diffusion de la chaleur peut s'écrire dans la configuration lagrangienne [3] :

$$\rho_0 C \dot{T} - \text{Div}(\mathbf{K}_0 \text{Grad } T) = S + R$$

Avec ρ_0 la masse volumique du matériau, C sa capacité thermique, \mathbf{K}_0 le tenseur de conductivité thermique, T la température absolue, S les sources de chaleur produites par le matériau et R les sources de chaleur provenant d'éléments extérieurs (les rayonnements). Cette formulation peut être simplifiée en adoptant plusieurs hypothèses successives : premièrement, la température est supposée homogène dans l'épaisseur de l'éprouvette, ensuite la conduction thermique est supposée se faire de manière isotrope, et enfin, les rayonnements extérieurs sont supposés être constants dans le temps. Avec ces hypothèses, l'équation de la chaleur peut se réduire à :

$$S = \rho_0 C \left(\dot{\theta} + \frac{\theta}{\tau} \right) - k_0 \Delta_{2D} \theta$$

Avec θ la variation de température, τ une constante de temps représentant l'échange de chaleur avec l'environnement par convection, k_0 la conduction thermique du matériau et Δ_{2D} l'opérateur Laplacien dans le plan.

La seconde méthode est basée sur le choix d'un modèle hyperélastique. En effet, dans le cas où le matériau ne produit pas de dissipation intrinsèque et qu'aucun autre couplage thermomécanique n'est actif, comme par exemple la cristallisation sous tension, les sources de chaleur produites par le matériau s'expriment :

$$S = T \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial T} : \dot{\mathbf{F}}$$

Avec \mathbf{F} le tenseur de gradient de la déformation et \mathbf{P} le tenseur de Piola-Kirchhoff de première espèce. Pour le modèle hyperélastique Néo-Hookéen, en supposant le matériau incompressible et que le coefficient de biaxialité ne change pas au cours du temps, on obtient :

$$\mathbf{S} = 2C_{NH}(\lambda + B \lambda^{2B-1} - (B + 1)\lambda^{-2B-3}) \frac{d\lambda}{dt}$$

Avec $C_{NH} = \frac{1}{2}NkT$ le paramètre Néo-Hookéen à identifier, λ l'élongation principale maximale et B le coefficient de biaxialité.

Expérimentation

La Figure 1 représente le dispositif expérimental pour faire la caractérisation d'une éprouvette de nitrile. Celui-ci se compose d'une machine de traction biaxiale, d'une caméra CCD qui va permettre d'obtenir le champ de déplacement en utilisant la méthode de corrélation d'images numériques et d'une caméra thermique qui va permettre de mesurer le champ de température.

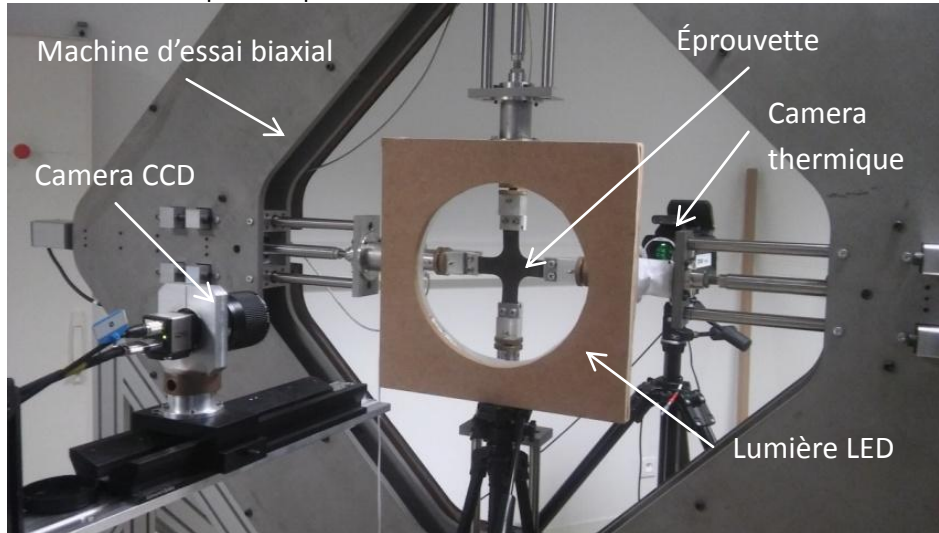


Figure 1 : Dispositif expérimental

Le champ de déplacement mesuré est utilisé de deux manières différentes : d'un côté, il permet de décrire les champs cinématique, et d'un autre côté, il permet de suivre les points matériels sur les images infrarouges. En effet, les fortes déformations subies par le matériau nécessite de mettre en place une technique de compensation de mouvement. Celle-ci consiste à transposer le champ de déplacement sur les images infrarouges. Pour cela, une phase de calibration est nécessaire. Elle est faite à l'aide d'une mire, mise à la place de l'éprouvette dans la machine. La calibration est schématisée sur la Figure 2.

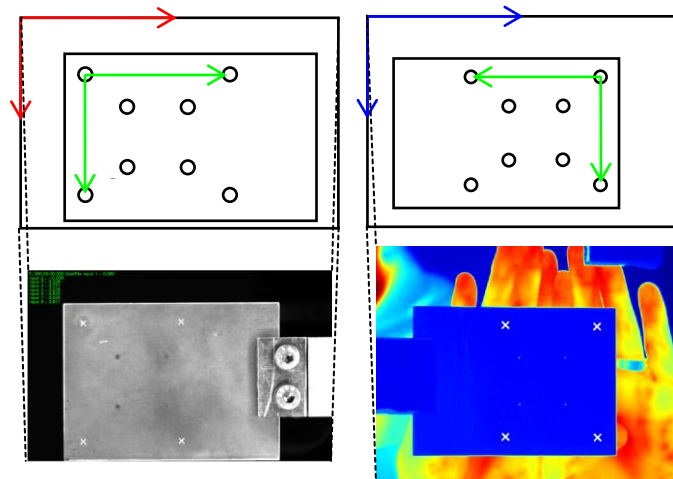


Figure 2 : Schéma de la calibration

Les résultats seront exposés lors de la présentation orale.

Conclusion

Une nouvelle méthode de caractérisation mécanique a été développée. Cette méthode est particulièrement adaptée aux matériaux possédant de forts couplages thermomécaniques, ainsi qu'une faible conductivité

thermique, comme les élastomères. L'intérêt majeur de cette méthode est de permettre une identification à l'échelle locale, c'est-à-dire de cartographier le champ des paramètres constitutifs [4].

[1] Bonet, J., & Wood, R. D. (1997). *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis*. Cambridge university press.

[2] Promma, N., Raka, B., Grediac, M., Toussaint, E., Le Cam, J. B., Balandraud, X., & Hild, F. (2009). Application of the virtual fields method to mechanical characterization of elastomeric materials. *International Journal of Solids and Structures*, **46**(3-4), 698-715.

[3] Balandraud, X., & Le Cam, J. B. (2014). Some specific features and consequences of the thermal response of rubber under cyclic mechanical loading. *Archive of Applied Mechanics*, **84**(6), 773-788.

[4] Charlès, S. & Le Cam, J. B. (2020) Inverse identification of constitutive parameters from heat source fields: A local approach applied to hyperelasticity. *Strain*, **e12334**.