
COUPLAGES DANS LES MATERIAUX ELASTOMERES : APPORT DE LA CALORIMETRIE DE SURFACE PAR IMAGERIE

Jean-Benoît Le Cam^{*1}

¹Université de Rennes - Institut de Physique de Rennes – CNRS, Université de Rennes – France

Résumé

Les premières études sur les propriétés thermomécaniques du caoutchouc remontent au XIXe siècle. Ces recherches pionnières menées par Gough en 1805 (1) puis par Joule en 1857 (2) ont mis en évidence la composante entropique de l'élasticité caoutchoutique. Par la suite, au début du XXe siècle, les études mécaniciennes se sont focalisées sur les caractéristiques de la réponse mécanique sous différents types de chargements. L'un des résultats majeurs a été l'observation par Bouasse et Carrière en 1903 du phénomène d'accommodation de la contrainte sous chargement mécanique cyclique (3). Ce phénomène fut étudié plus précisément par Holt en 1931 (4), puis de manière intensive par Mullins à partir de 1948 (5). On parle généralement d'effet Mullins. En complément de ces premiers résultats, de nombreux autres phénomènes de la déformation ont été mis en évidence, parmi lesquels la cristallisation et la fonte des cristallites, l'anisotropie, la viscosité ou encore le vieillissement qui modifie l'élasticité du réseau et altère sa résistance mécanique. Pour autant, le lien entre ces phénomènes, observés à l'échelle macroscopique, et leur origine à l'échelle du réseau macromoléculaire est encore mal compris et demeure l'objet de nombreuses études. Sachant que la plupart de ces phénomènes dépendent de la température et présentent des signatures thermiques et calorimétriques distinctes, la thermomécanique expérimentale constitue une approche de choix pour enrichir l'analyse purement mécanique de la déformation de ces matériaux.

Dans ce contexte, l'exposé présente l'adaptation et l'utilisation de la calorimétrie de surface dans le cas des grandes déformations homogènes et hétérogènes des milieux élastomères. Dans un premier temps, le cadre thermodynamique adopté est brièvement rappelé. À partir de l'équation tridimensionnelle de diffusion de la chaleur formulée dans la configuration de référence, des hypothèses adaptées à la thermophysique des élastomères permettent d'aboutir à des formulations bi- et uni-dimensionnelles, voire " OD ", applicables à des mesures par thermographie infrarouge. Ces développements fournissent un accès direct au champ de sources de chaleur, plus pertinent que le champ de températures pour l'interprétation thermomécanique et la mise en évidence des différents couplages. Un bilan d'énergie peut également permettre d'identifier la dissipation intrinsèque et de la comparer à l'énergie mécanique stockée dans le matériau, en d'autres termes comprendre comment le matériau utilise l'énergie mécanique pour se déformer.

Dans cet exposé, la contribution des différents phénomènes à la réponse calorimétrique est mise exergue en adaptant la composition chimique des élastomères étudiés ; les effets

*Intervenant

viscoélastiques et l'accommodation de la contrainte sont étudiés avec des réseaux macromoléculaires chargés de noir de carbone, l'origine de l'élasticité quant à elle est caractérisée dans des systèmes non chargés, et la cristallisation sous étirement est étudiée dans des réseaux de chaînes isotactiques. La discussion sur les couplages et la dissipation intrinsèque produite est complétée par l'identification de la part d'énergie mécanique stockée. Ces analyses, réalisées dans le cas d'essais homogènes, fournissent de nombreuses informations auxquelles la mécanique ne donne pas accès.

Cette approche est encore plus intéressante si elle est menée à l'échelle locale, en présence de forts gradients de déformation, typiquement en pointe de fissure. Dans ce cas, le recalage cinématique des champs thermiques est nécessaire pour établir les champs calorimétriques et mener l'analyse. Si ce type de situation soulève des challenges métrologiques conséquents et complexes à traiter, il offre de nombreuses perspectives pour l'étude de la fissuration et plus particulièrement le fonctionnement thermomécanique de la zone d'influence des fissures.

Références

- (1) J. Gough. J. 1805. A description of a property of Caoutchouc or India Rubber. Proc. Lit. Phil. Soc. Manchester, 2nd series 1:288–295.
- (2) Joule J. P.. On some thermodynamic properties of solids. Phil Mag 4th, 14:227, 1857.
- (3) Bouasse H, Carrière Z. 1903. Courbes de traction du caoutchouc vulcanisé. Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse 5:257–283.
- (4) Holt WL. 1931. Behavior of rubber under repeated stresses. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 23:1471–1475.
- (5) Mullins L. 1948. Effect of stretching on the properties of rubber. Rubber Chemistry and Technology 21:281–300.

N.B. :

Cet exposé est adossé à un document de synthèse, réalisé à partir d'une centaine de références, qui reprend les travaux fondateurs en matière de calorimétrie de surface et détaille leur adaptation aux cas des grandes déformations homogènes et hétérogènes. Les principaux résultats obtenus dans le cas des élastomères et les perspectives offertes par ce type de technique expérimentale y sont également présentés. Le lien vers ce document sera communiqué à l'occasion de l'exposé.