

# CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ÉLASTOMÈRES MAGNÉTORHÉOLOGIQUES

S. Hermann<sup>1,2</sup>, P. Butaud<sup>2</sup>, J-F. Manceau<sup>2</sup>, C. Espanet<sup>1</sup>, G. Chevallier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moving Magnet Technologies, Département de Recherche et Développement, 25000 Besançon, France

<sup>2</sup>Univ. Bourgogne Franche-Comté FEMTO-ST, CNRS/UFC/ENSMM/UTBM, 25000 Besançon, France

## 1. Introduction

Les élastomères magnétorhéologiques (MRE, magnetorheological elastomers) sont des matériaux composites composés d'une matrice viscoélastique et de particules magnétiques. Pour faire varier les propriétés mécaniques de ces composites, un chargement volumique peut être appliqué via un champ magnétique externe. La raideur du matériau et la quantité d'énergie dissipée augmentent avec l'intensité du champ magnétique [1]. Dans un composite, l'anisotropie du matériau peut être contrôlée en appliquant un chargement mécanique ou magnétique dans différentes directions [2] et/ou à différentes intensités [3]. L'énergie potentielle fournit un cadre général pour modéliser les comportements mécanique et magnétique ainsi que leur couplage. Les équations constitutives dérivant de ce potentiel lient les grandeurs physiques décrivant les phénomènes mécaniques et magnétiques [4].

## 2. Caractérisation expérimentale

Le matériau utilisé dans le cadre de ce travail est un composite à base de silicone *NuSil MED 4014* et de particules de NdFeB. Ces particules sont magnétiquement dures, leur taille moyenne est de  $D_{50} = 5 \mu\text{m}$  ; elles sont distribuées de façon homogène dans la matrice. L'élaboration consiste à mélanger le silicone et les particules, la réticulation est ensuite effectuée dans un moule à chaud et sous pression. Il est par ailleurs possible d'effectuer une polarisation du composite, pour cela les particules sont exposées à un champ magnétique après réticulation du silicone. La membrane composite possède alors un champ rémanent dont l'ordre de grandeur dépend du taux de charge.

Une première étape dans la caractérisation du matériau consiste à évaluer sa structuration interne, indispensable pour la définition d'un volume élémentaire représentatif (VER). La mésostructure du composite est observée par microscopie numérique, deux taux de charge en NdFeB sont étudiés, 12 vol.-% (Figure 1a) et de 36 vol.-% (Figure 1b). La démarche prévue pour établir une première formulation du VER est l'analyse statistique des images via la comparaison des niveaux de gris. Outre le nombre et la taille moyenne des particules, une information importante est leur distribution dans la matrice. À partir d'une analyse par Transformée de Fourier spatiale des images, il est possible de savoir si l'hypothèse de périodicité peut être appliquée ou si une approche statistique est plus adéquate.

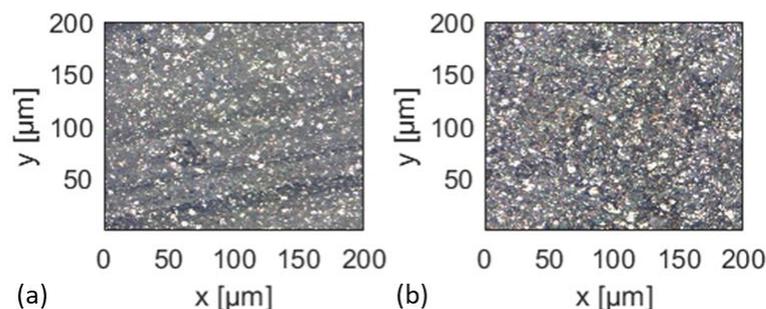


Figure 1 : Polymère magnétorhéologique sous microscope numérique Keyence (grossissement x200), taux de charge du matériau (a) 12 vol.-% et (b) 36 vol.-%.

La deuxième étape de la partie expérimentale consiste à analyser le comportement mécanique du matériau et l'influence du magnétisme sur ses caractéristiques. L'outil utilisé pour la caractérisation est un analyseur mécanique dynamique (*DMA Bose Electroforce 3230* Figure 2a). Le setup expérimental comporte une enceinte thermique (1), dans laquelle la température est contrôlée par un thermocouple (2). Le dispositif de fixation de l'échantillon (3) est composé d'un axe mobile (4) auquel l'éprouvette (8) est fixée à l'aide d'un mors (5). Un deuxième mors (6) est connecté à un axe fixe lié à un capteur de force. Une déformation quasi-statique ou dynamique est imposée à l'échantillon. L'extensométrie est déportée sur l'actionneur électromagnétique. La force de réaction résultante est mesurée par un capteur de force  $\pm 22$  N. Pour une déformation inférieure ou égale à 1 % et une vitesse de 0.005 mm/s, le comportement reste quasi linéaire. Les essais sont effectués à température ambiante, dans l'état caoutchoutique (transition vitreuse entre  $-39$  °C et  $-42$  °C à 1Hz pour le silicone pur). Dans une première série de mesures, quatre types de composite sont soumises à un test de traction cyclique. Au total, 10 cycles de déformation de 1 % sont appliqués au silicone sans particules et des MRE avec le même taux de charge en NdFeB. Les particules sont soit sans polarisation, soit polarisées perpendiculairement à la direction de chargement ou dans la direction parallèle à celle du chargement. Un résumé des caractéristiques dynamiques obtenu de cet essai est présenté sur la Figure 2b. Ces résultats semblent être des tendances même si les valeurs absolues varient dans le lot des échantillons. On peut noter que l'ajout des particules augmente le module de stockage  $E'$  et le module de perte  $E''$  ainsi que le facteur de perte  $\tan(\delta)$ . L'aimantation d'un composite transverse à la direction de chargement n'a pas une influence sur les caractéristiques mécaniques. L'aimantation parallèle à la direction du chargement augmente le module de stockage  $E'$ .

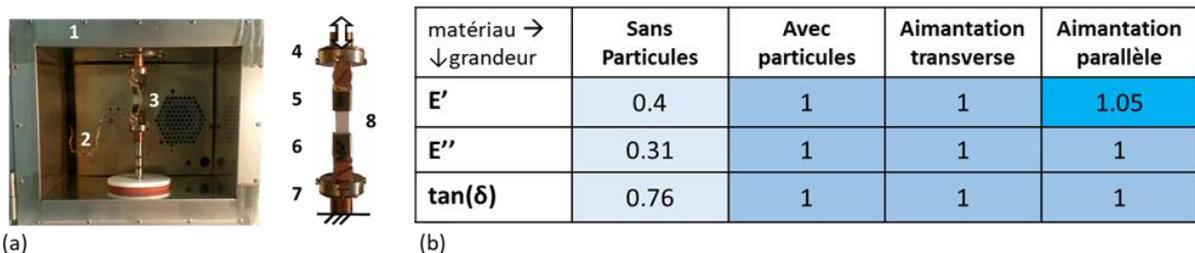


Figure 2 : Caractérisation mécanique du polymère magnétorhéologique, (a) setup expérimental, (b) comparaison des caractéristiques dynamiques obtenues pour quatre types de composites.

### 3. Discussion

L'objectif de cette caractérisation expérimentale est d'élaborer des modèles mathématiques puis numériques de comportement. Pour retrouver la loi de comportement magnétomécanique, le principe fondamental de la dynamique et les équations de Maxwell vont être appliquées. Les questions de départ concernent la mésostructure du matériau. La répartition des particules doit-elle être considérée comme périodique ou comme aléatoire ? Quel indicateur en terme de traitement des images de microscopie peut-il nous permettre de conclure ? Comment traiter cette hétérogénéité en terme de modélisation ? D'autres questions concernent le comportement mécanique. La polarisation des particules permet-elle de contrôler l'anisotropie du matériau ? Le comportement mécanique du silicone peut-il être considéré comme linéaire, non seulement pour des tests quasi-statiques mais aussi en essais dynamiques ? Quelles sont les domaines d'applicabilité de cette hypothèse ? Enfin, comment caractériser et modéliser les couplages magnétomécaniques à l'échelle macroscopique ? La présentation sera l'opportunité pour répondre et discuter des questions de caractérisation et de modélisation évoquées ci-dessus.

#### Références

- [1] – Norouzi, M., Gilani, M., Sajjadi Alehashem, S.-M., Vatandoost, H., IEEE Trans. Mag., **53(9)**, (2017).
- [2] – Schrittmesser, B., Major, Z., Filipcsei, G., J. Phys.: Conf. Ser., **149**, 012096 (2009).
- [3] – Psarra E., Bodelot L., Danas K., Soft Matter, **13 (37)**, 6576-6584 (2017).
- [4] – Lefèvre V., Danas K., Lopez-Pamies O., J. Mech. Phys. Solids, **107**, 343-364 (2017).