

Élaboration et caractérisation expérimentale du comportement mécanique d'un élastomère magnétorhéologique

S. HERMANN ^{a,b}, P. BUTAUD ^a, G. CHEVALLIER ^a, J.F. MANCEAU ^a,
C. ESPANET ^b

a. Univ. Bourgogne Franche-Comté FEMTO-ST, CNRS/UFC/ENSMM/UTBM, Besançon, France,
svenja.hermann@femto-st.fr

b. Département de Recherche et Développement, Moving Magnet Technologies SA, Besançon, France

Résumé :

Les élastomères magnétorhéologiques (MRE) sont des matériaux composites composés d'une matrice polymère et de particules magnétiques. Le matériau étudié dans cet article est un composite à champ magnétique rémanent généré par des charges magnétiquement dures de NdFeB. Une analyse de l'influence du magnétisme sur les caractéristiques mécaniques dynamiques du composite, le module de stockage et le facteur de perte, est effectuée. Les résultats de mesure sont comparés avec le comportement observé sur des MRE magnétiquement doux.

Abstract :

Magnetorheological elastomers are composite materials consisting of a polymer matrix and magnetic particles. The composite studied in the following has a remanent magnetic induction since it contains magnetically hard NdFeB particles. The influence of the magnetism on the dynamic mechanical characteristics of the composite material (storage modulus and loss factor) is analyzed and the measurement results are compared to the behavior known from magnetically soft MRE.

Mots clefs :

élastomères magnétorhéologiques (MRE), couplage magnéto-mécanique, analyse mécanique dynamique (DMA)

Keywords :

magnetorheological elastomers (MRE), magneto-mechanical coupling, dynamic mechanical analysis (DMA)

1 Introduction

Les élastomères magnétorhéologiques (MRE, magnetorheological elastomers) sont des matériaux composites composés d'une matrice viscoélastique et de particules magnétiques. Les particules peuvent être distribuées aléatoirement dans la matrice (composite isotrope) ou alignées en chaînes (composite isotrope transverse). Dans de nombreux cas, des particules magnétiquement douces comme du fer ou des oxydes de fer sont utilisés ; dans ce cas on peut parler des S-MRE (soft-magnetic magnetorheological elastomers). Les propriétés de S-MRE peuvent être modifiées en appliquant un champ magnétique externe. Une rigidification du matériau ainsi qu'une augmentation de la dissipation d'énergie sont constatées expérimentalement avec l'application d'un champ magnétique externe [1–4].

Des analyses du comportement magnéto-mécanique des MRE magnétiquement dures (H-MRE, hard-magnetic magnetorheological elastomers) sont plus difficiles à trouver. Quelques premiers constats sur l'influence de la microstructure et la présence d'un champ magnétique externe ont été faits sur la base de travaux expérimentaux [5]. L'équilibre interne du matériau composite fait intervenir les contraintes d'origine magnétique S^m et d'origine élastique $C : \varepsilon$. S^m dépend du champ magnétique B qui dépend de la géométrie du domaine. Il est donc sensible aux déformations du domaine ce qui fait de S^m une contrainte non-linéaire. La question qui se pose est de savoir si les ordres de grandeurs respectifs des contraintes magnétiques et élastiques sont comparables, de sorte que le comportement du matériau composite soit affecté en termes de rigidité par la présence des forces magnétiques. Dans ce contexte, l'influence de l'induction rémanente des particules magnétiques sur la rigidité et la capacité d'amortissement du composite est analysée dans cette contribution.

2 Travail expérimental

2.1 Matériaux et élaboration

Les deux matières premières utilisées pour le composite sont un élastomère silicone de NuSilTM et des particules magnétiques de MagnequenchTM dont la distribution granulométrique, souvent nommée PSD (Particle-Size Distribution), est de $5 \mu\text{m}$ en moyenne. Le composite magnétorhéologique est fabriqué sous forme de plaques dans lesquelles des éprouvettes sont découpées. La première phase d'élaboration est le mélange des particules magnétiques avec l'élastomère. Les particules sont dispersées de manière aléatoire dans la matrice, la teneur volumique de NdFeB est de 19.4 %. La réticulation du composite est ensuite effectué à 160°C dans un moule en aluminium sous une pression de 50 kN pendant 10 minutes. Les éprouvettes sont ensuite découpées à l'emporte-pièce (Figure 1a, (Figure 1b).

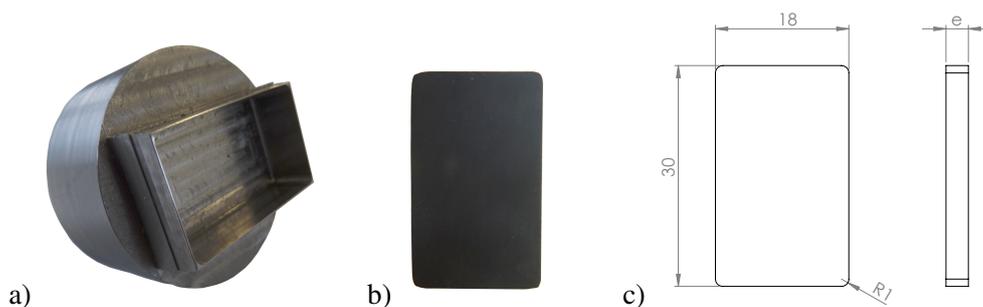


FIGURE 1 – Emporte-pièce en vue en perspective (a), éprouvette découpée (b) et schéma d'une éprouvette découpée (c) en vue de dessus et en vue de côté.

L'épaisseur e mesurée pour les éprouvettes varie entre $3.11 \text{ mm} \leq e \leq 3.16 \text{ mm}$. Chaque valeur est une moyenne des mesures sur trois points sur la longueur de l'éprouvette. La section d'une éprouvette A est calculée par $e \cdot 18 \text{ mm}$. La largeur de l'éprouvette est donnée par l'emporte-pièce. La longueur entre les mors est mesurée avant l'essai. Les caractéristiques magnétiques du composite sont pilotées par celles des particules de NdFeB qui imposent un comportement magnétique dur au composite. Le composite a donc un comportement hystérétique et une aimantation rémanente peut être générée. Pour aimanter le composite, ce dernier est exposé à un champ magnétique de forte intensité (4 T). L'induction rémanente dépend du taux de charge en particules, pour le matériau composite testé elle est de 0.14 T.

2.2 Montage expérimental et démarche

La caractérisation mécanique est effectuée à l'aide d'un analyseur mécanique dynamique (DMA Metravib +300, Figure 2a). L'éprouvette est fixée dans des mors de traction (Figure 2b). Le mors supérieur est lié à un axe fixe sur lequel la force de réaction F est mesurée par un capteur de force dans l'intervalle $\pm 300 \text{ N}$. Le mors inférieur fait partie d'un axe mobile par lequel un déplacement est imposé à l'échantillon. L'extensométrie est déportée sur l'actionneur électromagnétique qui génère le mouvement de l'axe mobile. La température est contrôlée, l'ensemble mécanique se trouvant dans une enceinte thermique. L'éprouvette est fixée d'abord dans le mors mobile et ensuite dans le mors fixe pour minimiser les déformations pendant la mise en place.

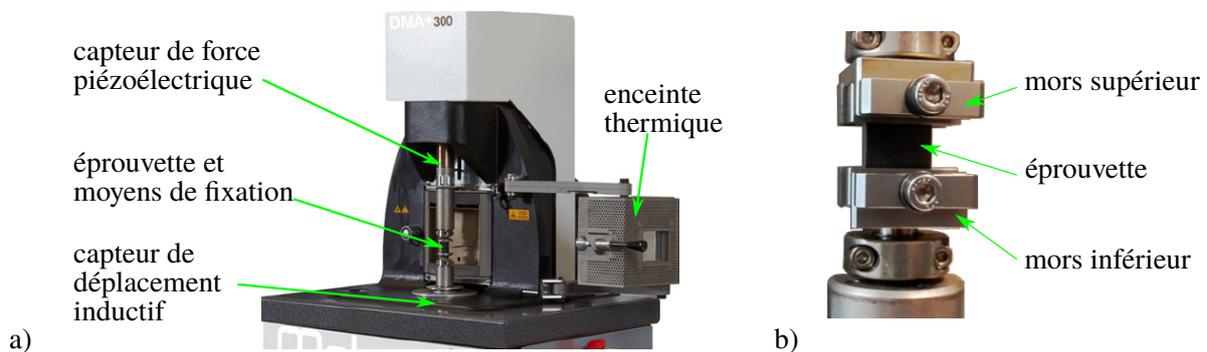


FIGURE 2 – Analyseur mécanique dynamique (DMA) (a) et échantillon mis en place dans le DMA (b).

Les essais sont pilotés avec une déformation ε sinusoïdale d'amplitude de 1 % imposée à l'échantillon. La fréquence de sollicitation est de 1 Hz. La consigne de température dans l'enceinte thermique est de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une montée en température de $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Cette température est maintenue pendant 10 minutes. Ensuite, le chargement sinusoïdal est appliqué à l'échantillon. Après une phase de précyclage de la machine, 30 oscillations sont effectuées. À partir de ces résultats de mesure, les caractéristiques mécaniques dynamiques sont calculées. Le comportement du composite magnétorhéologique est caractérisé par le module de stockage E' et le facteur de perte $\tan(\delta)$:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E'(1 + j \tan(\delta)) \varepsilon \quad (1)$$

Pour analyser l'influence du magnétisme sur les caractéristiques mécaniques du composite, chaque éprouvette passe deux phases de test. Premièrement, l'éprouvette est soumise à l'essai de traction dynamique trois fois dans un état non-aimanté. Entre chaque essai, l'éprouvette est enlevée de la machine et remise en place. Tous les échantillons sont testés de cette façon et ensuite aimantés : une moitié des éprouvettes est aimantée suivant la longueur et l'aimantation est donc parallèle à la direction de

sollicitation mécanique ; l'autre moitié des éprouvettes est aimantée suivant l'épaisseur et donc perpendiculairement à la direction de chargement mécanique. Dans la suite, \parallel signifiera le parallélisme entre la direction du chargement mécanique et la direction d'aimantation du composite et \perp l'orthogonalité.

3 Résultats

Les caractéristiques mécaniques dynamiques en valeur absolu sont données dans le tableau ci-dessous. Nous observons une différence pour les valeurs moyennes qui est due à la fabrication. Pour faciliter la comparaison des caractéristiques dynamiques entre les essais dans l'état non-aimanté et ceux dans l'état aimanté, des valeurs relatives sont analysées. Le module de stockage de l'éprouvette 1, par exemple, a été mesuré trois fois avant l'aimantation. Les valeurs du module de stockage relatif E'_{rel} dans la Figure 3a (cercles gris) représentent le ratio entre les valeurs mesurées et la moyenne de ces trois mesures :

$$E'_{rel_k} = \frac{E'_k}{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m E'_n}, \quad k = 1, 2, 3 \quad m = 3 \quad (2)$$

Les modules obtenus par les essais après aimantation (cercles rouges) sont comparés avec la même valeur moyenne. Les modules relatifs sont calculés de la même façon pour les sept autres éprouvettes.

caractéristique mécanique		plaque 1 éprouvettes 1,2,5,6	plaque 2 éprouvettes 3,4,7,8
E'_{pa} [MPa]	min	2,29	2,44
	max	2,50	2,59
E'_{\parallel} [MPa]	min	2,39	2,51
	max	2,52	2,65
E'_{\perp} [MPa]	min	2,38	2,41
	max	2,49	2,48
$\tan(\delta)_{pa}$	min	0,137	0,144
	max	0,143	0,156
$\tan(\delta)_{\parallel}$	min	0,141	0,149
	max	0,154	0,154
$\tan(\delta)_{\perp}$	min	0,131	0,136
	max	0,133	0,140

TABLE 1 – Caractéristiques mécaniques dynamiques du composite (pa - pas aimanté).

La Figure 3a montre E'_{rel} pour les éprouvettes 1 à 4. Ces éprouvettes sont aimantées parallèlement à la direction de chargement mécanique. Le résultat de chaque mesure avant et après aimantation est montré (marqueurs gris et rouges respectivement). La moyenne et l'écart-type sont calculés et représentés par les barres à côté des mesures sur les deux graphiques Figure 3a et Figure 3b. Une tendance de rigidification suite à l'aimantation est visible sans être significative. Les résultats pour les éprouvettes 5 à 8, aimantées perpendiculairement à la direction de chargement mécanique sont présentés sur la Figure 3b. Les marqueurs gris représentent E'_{rel} avant aimantation et les marqueurs bleus E'_{rel} après aimantation. Le module après aimantation tend à être plus faible qu'avant aimantation, mais la tendance n'est pas significative. En comparant les deux évolutions on peut remarquer que la tendance de rigidification est plus présente que celle d'assouplissement. Par ailleurs la dispersion de E'_{rel} dans l'état aimanté est plus grande pour les éprouvettes 1 à 4 que pour les éprouvettes 5 à 8.

Les résultats pour le facteur de perte $\tan(\delta)$ sont également comparés en valeurs relatives, $\tan(\delta)_{rel}$ est calculé pour chaque éprouvette. Dans la Figure 4, $\tan(\delta)_{rel}$ est représenté de la même façon que E'_{rel}

dans la Figure 3. La Figure 4a montre qu'il n'y a pas de tendance significative pour le changement du facteur de perte suite à l'aimantation. Par contre la dispersion des résultats augmente fortement, l'écart type quadruple. L'aimantation perpendiculaire ne fait également pas varier le facteur de perte de façon significative comme le montre la Figure 4b. La dispersion des résultats n'est pas très différente entre les deux états magnétiques. La dispersion des résultats est plus grande pour l'aimantation parallèle par rapport à celle de l'aimantation perpendiculaire. Mais les résultats dans l'état non-aimanté sont plus dispersés pour les éprouvettes 1 à 4 que pour 5 à 8.

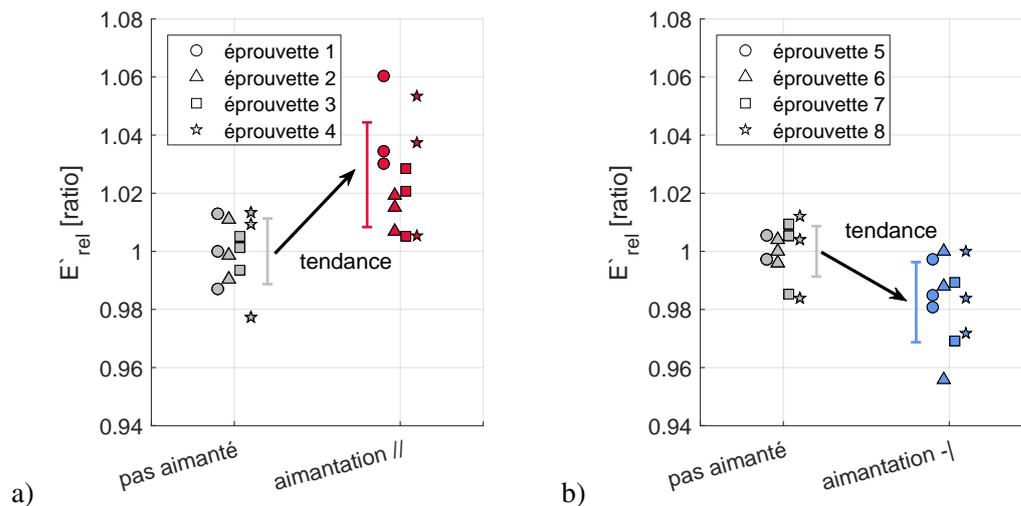


FIGURE 3 – Module relatif E'_{rel} avant et après aimantation des éprouvettes 1 à 4, aimantées parallèlement à la direction du chargement mécanique, (a) et des éprouvettes 5 à 8, aimantées perpendiculairement à la direction du chargement (b).

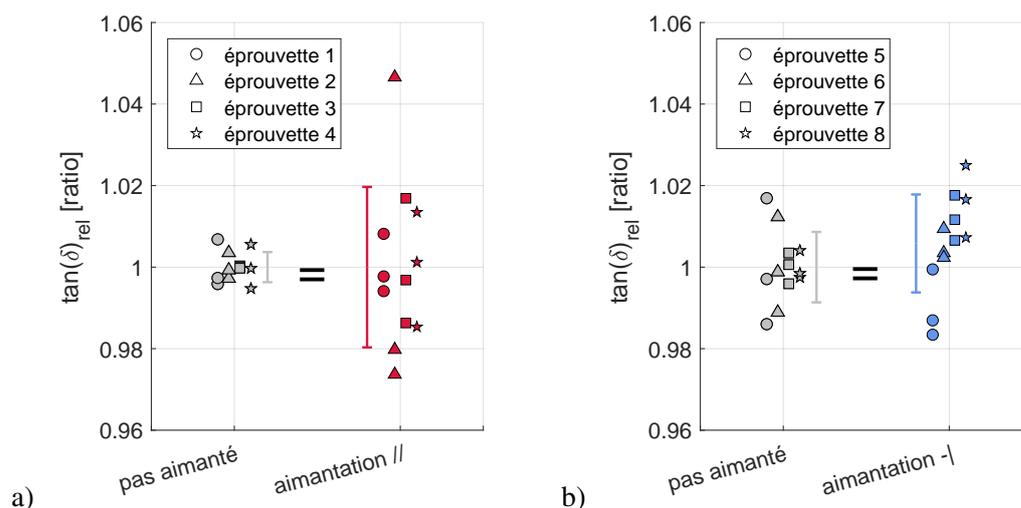


FIGURE 4 – Facteur de perte $\tan(\delta)$ avant et après aimantation des éprouvettes 1 à 4, aimantées parallèlement à la direction du chargement mécanique, (a) et des éprouvettes 5 à 8, aimantées perpendiculairement à la direction du chargement (b).

4 Discussion

Des tendances de rigidification sont observées pour la magnétisation d'une éprouvette dans la direction du chargement mécanique, au contraire une aimantation perpendiculaire à la direction de chargement semble assouplir le composite magnétorhéologique. Cependant ces tendances ne représentent pas des changements significatifs du module comme cela a pu être observé sur les S-MRE anisotropes soumis à un champ magnétique externe [2, 3]. Le facteur de perte ne semble pas changer, donc le composite aimanté ne dissipe pas plus d'énergie malgré les interactions que nous aurions pu imaginer entre les particules. En considérant le composite à l'échelle microscopique, les différents états magnétiques pour un H-MRE aimanté et un S-MRE dans un champ magnétique externe deviennent visibles.

Entre les particules magnétiques douces dans un S-MRE il n'y a que des forces d'attraction. Dans un H-MRE, les particules sont aimantées, il peut donc y avoir forces de répulsion entre elles. La Figure 5 montre les résultats d'une modélisation magnétomécanique [6] : deux particules aimantées de façon unidirectionnelle (flèche noire) sont organisées dans trois configurations différentes dans un matériau élastomère. La force résultante entre les particules (flèche rouge clair) et le couple résultant (flèche rouge foncé) dépendent de la position relative des particules l'un par rapport à l'autre. Dans l'éprouvette isotrope est aimantée, les particules se trouvent dans des configurations différentes les unes par rapport aux autres et de plus ces configurations peuvent changer lors de la sollicitation mécanique de l'éprouvette. L'intégralité des forces magnétiques ne s'oppose donc pas nécessairement à la sollicitation mécanique dans un composite à distribution aléatoire des particules et il n'y a conséquemment pas nécessairement un changement significatif des caractéristiques mécaniques.

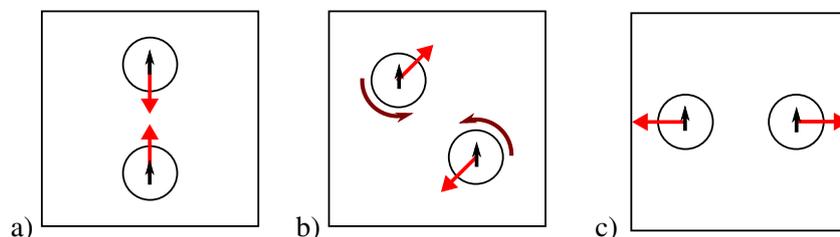


FIGURE 5 – Schéma de particules magnétiquement dures aimantées de façon unidirectionnelle (flèche noire) dans une éprouvette ainsi que force et couple résultant (flèche rouge clair et foncé respectivement) sur les particules provenant de l'aimantation.

Références

- [1] B. Schrittester, Z. Major, G. Filipcsei, Characterization of the dynamic mechanical behavior of magneto-elastomers, *J. Phys. : Conf. Ser.*, 149 (2009) 012096.
- [2] M. Norouzi, M. Gilani, S.-M. Sajjadi Alehashem, H. Vatandoost, Dynamic Characterization and Modeling of Isotropic Magnetorheological Elastomers Under Tensile-Compressive Loadings, *IEEE Trans. Mag.*, 53(9) (2017) 2900412.
- [3] M. Kukla, J. Gõrecki, I. Malujda, K. Talaška, P. Tarkowski, The determination of mechanical properties of magnetorheological elastomers (MREs), *Procedia Engineering*, 177 (2017) 324 – 330.
- [4] L. Bodelot, J.P. Voropaieff, T. Pössinger, Experimental investigation of the coupled magneto-mechanical response in magnetorheological elastomers, *Exp. Mech.*, 58(2) (2018) 207-221

- [5] Q. Wen, Y. Wang, X. Gong, The magnetic field dependent dynamic properties of magnetorheological elastomers based on hard magnetic particles, *Smart Mater. Struct.* 26 (2017) 075012.
- [6] S. Hermann, C. Espanet, P. Butaud, G. Chevallier, J.F. Manceau, L. Hirsinger, Modelization of the coupled behavior of a magnetically hard magnetorheological elastomer, *European Conference on Constitutive Models of Rubber (ECCMR)*, 25 - 27 Juin 2019, Nantes, France.