

Comportement magnéto-mécanique : approche expérimentale et modélisation multi-échelle

A. Ouaddi^{a,b}, O. Hubert^a, J. Furtado^b, D. Gary^b, S. He^c

a. LMT (ENS Paris-Saclay / CNRS / Université Paris Saclay), 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France. achraf.ouaddi@airliquide.com

b. Air-liquide R&D, Paris Innovation Campus, 1 chemin de la Porte des Loges, BP126, Les Loges-en-Josas, 78350 Jouy-en-Josas Cedex, France.

c. Pôle Universitaire Léonard de Vinci, 92916 Paris La Défense Cedex, France.

Mots clés : Couplage magnéto-mécanique ; effet piézo-magnétique ; modélisation multi-échelle.

Résumé

Le travail présenté ici porte sur l'étude du couplage magnéto-élastique en tant que méthode de contrôle non destructif. Cette communication rapporte les mesures expérimentales hystériques et piézo-magnétiques effectuées sur un acier dual-phases soumis à différentes conditions de champ magnétique et de contrainte. L'effet du champ magnétique et de la contrainte mécanique, compte tenu des amplitudes statiques ou variables, est discuté. Enfin, Une nouvelle modélisation multi-échelle de l'hystérésis piézo-magnétique est proposée.

1. Introduction

Dans les matériaux ferromagnétiques, l'application d'un champ magnétique peut provoquer une déformation de l'échantillon. C'est ce qu'on appelle la magnétostriction. Inversement, une contrainte appliquée à un matériau initialement aimanté, même faiblement, peut modifier l'état magnétique du matériau. C'est l'effet Villari, découvert au milieu du 19^{ème} siècle [1]. Cet effet est jugé physiquement important puisqu'on considère la contrainte comme un des trois facteurs majeurs pouvant affecter l'aimantation avec le champ magnétique et la température. Le comportement magnétique est ainsi sensible à tout chargement mécanique. L'évolution observée du comportement magnétique sera différente en fonction du niveau de chargement, de sa direction et de sa nature [2]. Depuis lors, de nombreux travaux ont été menés en vue de comprendre, maîtriser et utiliser le couplage magnéto-mécanique dans des applications industrielles particulièrement dans les techniques du contrôle non destructif (CND)[3].

Les méthodes de contrôle par piézo-magnétisme ont connu des développements récents [4,5] mais se heurtent à des difficultés de modélisation, en particulier lorsqu'aucun champ magnétique maîtrisé n'est pas appliqué [6]. Le développement, la mise en place et la généralisation de telles techniques passent, d'une part, par la mise en place d'expériences permettant de mettre en évidence le phénomène de couplage magnéto-élastique dans un cadre maîtrisé, et d'autre part par le développement de modélisations innovantes. Ces deux aspects seront détaillés dans cette communication. Les mesures présentées se rapportent au comportement piézo-magnétique cyclique [7] d'un acier dual-phase obtenu sous différentes conditions de champ magnétique et de contrainte. Nous proposons ensuite une modélisation du comportement hystérique magnétique et piézo-magnétique basée sur un modèle multi-échelle [8].

2. Protocole expérimental

Le matériau d'étude est un acier dual phase. Sa microstructure est composée de 30%.vol de martensite et 70%.vol de ferrite. De point de vue magnétique, le comportement magnétique du matériau peut être considéré, en première approximation, similaire à celui du fer pur, même si la martensite présente une susceptibilité magnétique non nulle, elle est beaucoup plus faible que la susceptibilité du matériau. Le montage expérimental utilisé est présenté dans la figure (Fig.1) (Les détails concernant le montage sont explicités dans [4]). Les essais réalisés consistent à mesurer la réponse magnétique du matériau sous contrainte mécanique statique et à champ magnétique variable ainsi que les cycles piézomagnétiques sous chargement mécanique cyclique et à champ magnétique constant.

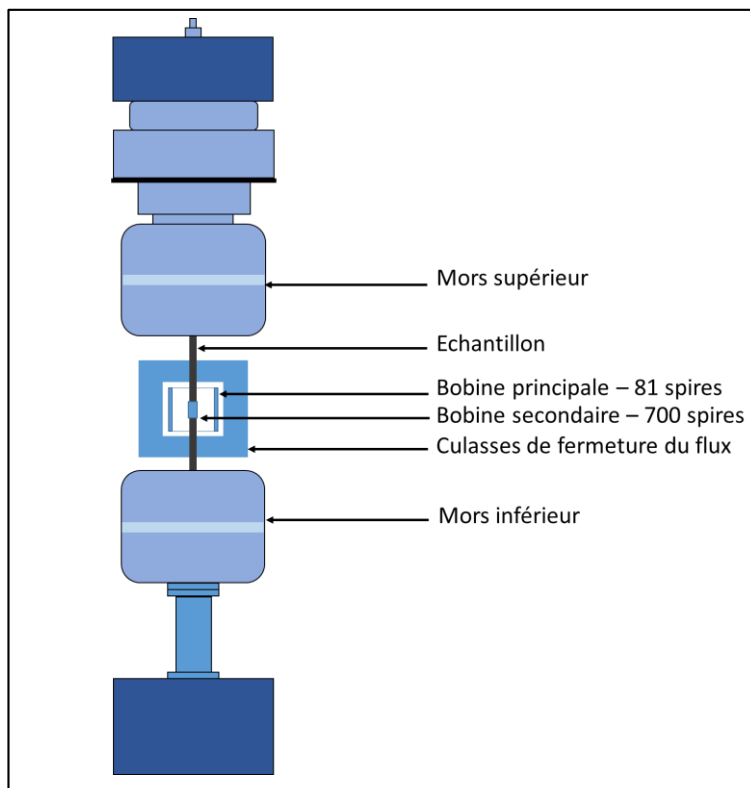


Figure 1: Montage expérimental.

3 Résultats expérimentaux

3.1 L'hystérésis magnétique

La procédure expérimentale consiste à : 1- Appliquer la contrainte mécanique statique $\sigma_{stat} \in [-100 \ 300] MPa$; 2- Désaimantation du matériau par l'application d'un courant sinusoïdal à amplitude décroissante ; 3- Application du champ magnétique variable par la bobine principale et mesure de la tension induite à l'aide de la bobine secondaire ; 4- Enregistrement des mesures.

Les mesures magnétiques rapportées sur la figure 2 présentent les cycles hystériques sous contrainte uniaxiale. Les mesures conduisent à des résultats conventionnels pour un acier bas carbone à savoir: une dégradation globale de l'aimantation due à la contrainte de compression à champ magnétique donné (diminution de la susceptibilité magnétique), une amélioration due à la contrainte de traction et à l'effet d'inversion de Villari [9].

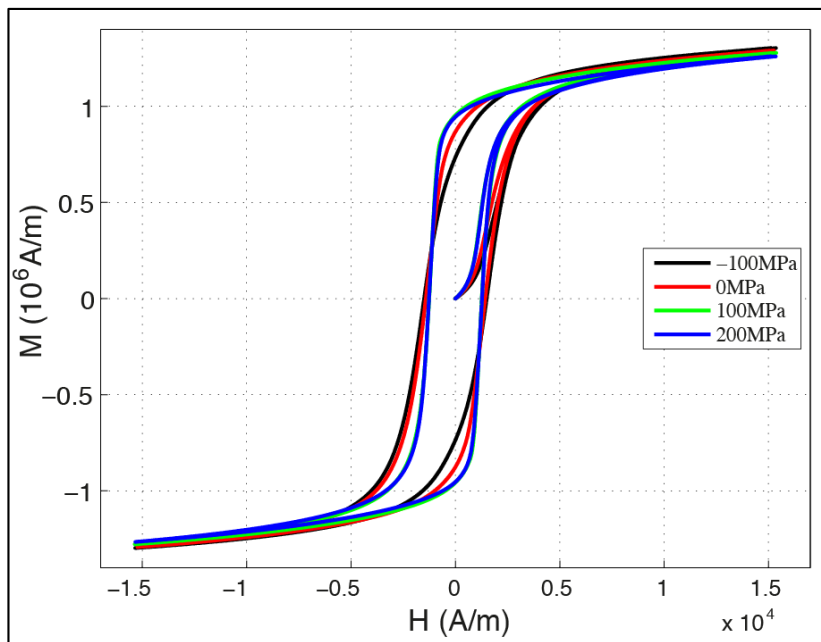


Figure 2: Evolution d'un cycle hystérétique pour différentes contraintes mécaniques appliquées.

3.2 L'hystérésis piézomagnétique

La procédure expérimentale se compose des étapes suivantes: 1- Application du chargement mécanique cyclique; 2- Application du champ magnétique statique après désaimantation; 3- Mesure des cycles piézomagnétiques après stabilisation de la tension induite; 4- Enregistrement des mesures.

La figure 3 présente les variations de l'aimantation du matériau avec la contrainte mécanique et sous différents niveaux du champ magnétique. Pour faciliter la comparaison des résultats on considère l'état d'aimantation à 300MPa comme état de référence des mesures. Comme le montre la figure, les cycles piézomagnétiques sont non monotones et non symétriques : une contrainte positive conduit à une situation quasi réversible et une contrainte négative augmente la surface du cycle. L'application d'un champ magnétiques élevé conduit à une pente négative et quasi constante. De plus, le comportement piézomagnétique devient quasi réversible.

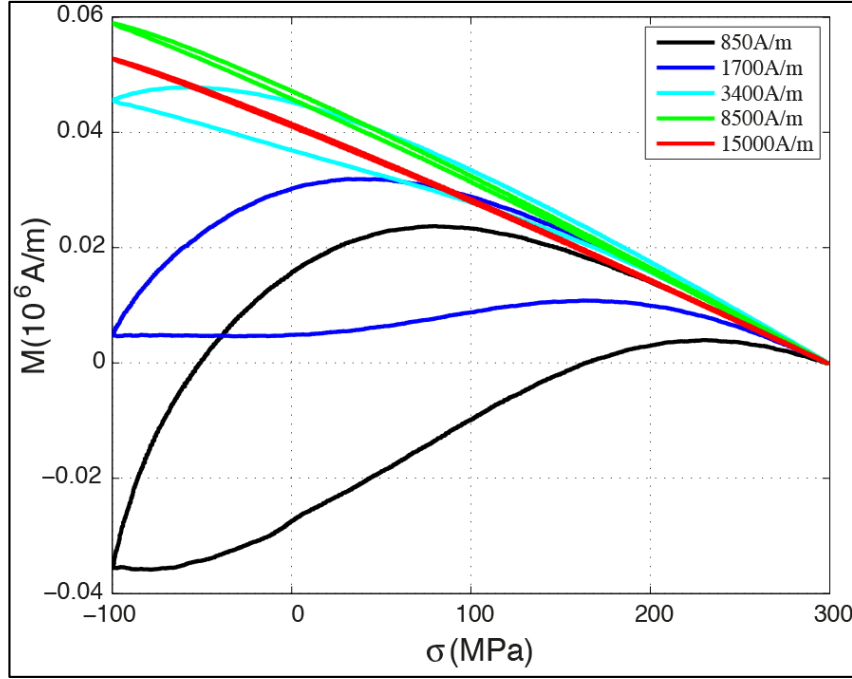


Figure 3: Comportement piézomagnétique à différents niveaux de champ magnétique.

4 Modélisation multiéchelle

Le modèle est inspiré d'une description du comportement magnétoélastique réversible [10][11] étendu récemment à l'hystérésis magnétique [12]. Cette description repose sur la définition de l'énergie libre de Gibbs à l'échelle du domaine magnétique et sur l'estimation des fractions de volume des domaines à l'aide d'une approche stochastique à l'équilibre à l'échelle du grain. Certaines règles de transition d'échelles sont utilisées pour définir le comportement à l'échelle polycristalline considérée comme un volume élémentaire représentatif (VER). La densité d'énergie libre de Gibbs $g_\alpha(\vec{H}, \sigma)$ est écrite à l'échelle d'une famille de domaine magnétique α . Le lecteur peut trouver dans [11] une explication détaillée et les hypothèses complètes sur la construction de cette énergie fonctionnelle. A l'échelle du domaine magnétique l'aimantation \vec{M} et la déformation de magnétostriction ϵ_α^μ peuvent être considérées homogènes et on peut écrire :

$$\vec{M}_\alpha = M_s \cdot \vec{\gamma}_\alpha \text{ et } \epsilon_\alpha^\mu = \begin{pmatrix} \lambda_{100}(\gamma_1^2 - \frac{1}{3}) & \lambda_{111}\gamma_1\gamma_2 & \lambda_{111}\gamma_1\gamma_3 \\ \lambda_{111}\gamma_2\gamma_1 & \lambda_{100}(\gamma_2^2 - \frac{1}{3}) & \lambda_{111}\gamma_2\gamma_3 \\ \lambda_{111}\gamma_3\gamma_1 & \lambda_{111}\gamma_3\gamma_2 & \lambda_{100}(\gamma_3^2 - \frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

M_s est l'aimantation à saturation et λ_{100} , λ_{111} les déformations à saturation suivant les directions cristallographiques $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ respectivement. Les coefficients $\gamma_i, i \in \{1,2,3\}$ sont les cosinus directeurs de l'aimantation.

Sous ces hypothèses (contrainte homogène, champ homogène) l'énergie libre de Gibbs peut s'écrire sous la forme :

$$g_\alpha(\vec{H}, \sigma) = K_1(\gamma_1^2\gamma_2^2 + \gamma_1^2\gamma_3^2 + \gamma_2^2\gamma_3^2) - \mu_0\vec{H} \cdot \vec{M} - \sigma : \epsilon_\alpha^\mu \quad (2)$$

μ_0 est la perméabilité du vide et K_1 une constante magnétocristalline. En utilisant une approche stochastique à l'équilibre on peut déterminer les fractions volumiques de chaque famille de domaines magnétiques f_i [13]. Ce calcul est complété par la minimisation de l'énergie libre de Gibbs de chaque famille de domaines magnétiques pour calculer la direction de l'aimantation $\vec{\gamma}_\alpha$. Ensuite des opérations

de calcul de moyenne clôturent le processus comme exprimé dans l'équation (3) et (4) pour calculer l'aimantation et la déformation de magnetostriction macroscopiques :

$$\vec{M} = \frac{1}{N_g} \sum_g \sum_i f_i \vec{M}_i \quad (3)$$

$$\epsilon^\mu = \frac{1}{N_g} \sum_g \sum_i f_i \epsilon_i^\mu \quad (4)$$

Où N_g est le nombre d'orientations cristallines utilisées dans le calcul.

Ce calcul est par construction un calcul anhystérétique (comportement réversible). La dissipation est prise en compte par l'introduction d'une composante irréversible H_{irr} pour compléter la contribution du champ magnétique H . La définition de H_{irr} est inspiré des travaux de Hauser [8] et étendue au chargement magnéto mécanique par l'introduction d'une composante irréversible de la contrainte σ_{irr} pour le calcul piézomagnétique.

Le modèle de Hauser est basé sur une approche physique et probabiliste de la description de la distribution volumique des familles de domaines magnétiques. Sous certaines hypothèses simplificatrices on peut écrire :

$$H_{irr} = \delta(H_c + a|H|)[1 - \kappa \exp(-\frac{\kappa_a}{\kappa} |M - M_{prev}|)] \quad (5)$$

$$\sigma_{irr} = \delta(\sigma_c + a'|\sigma|)[1 - \kappa' \exp(-\frac{\kappa_{a'}}{\kappa'} |\epsilon^\mu - \epsilon_{rev}^\mu|)] \quad (6)$$

Où H_c (respectivement σ_c) est la valeur du champ magnétique (de la contrainte) coercitif et M_{prev} (respectivement ϵ_{prev}^μ) est la valeur de l'aimantation M (la déformation ϵ^μ) au dernier renversement de chargement. Les autres paramètres sont des paramètres d'ajustement. La valeur du champ magnétique (respectivement de la contrainte) devient $H + H_{irr}$ (respectivement $\sigma + \sigma_{irr}$).

5. Comparaison expérimentation - modèle

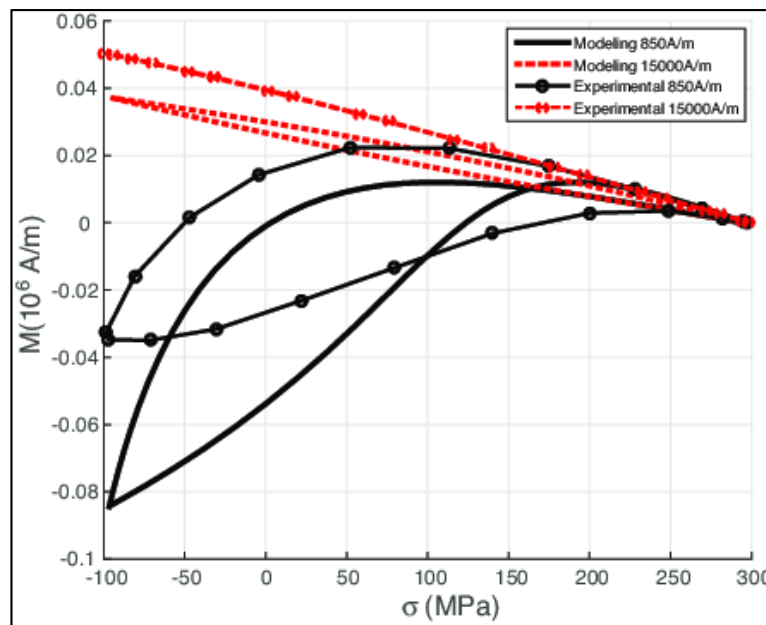


Figure 4: Le comportement piézomagnétique mesuré et calculé par le modèle.

Les figures 6 présentent une comparaison entre les mesures expérimentales et les résultats de la modélisation des comportements d'hystérésis piézomagnétique. Le modèle tend à sous-estimer l'aimantation du matériau. Cependant, les tendances générales des cycles pour les différentes conditions du chargement mécanique et/ou magnétique ainsi que l'effet de la contrainte sur le comportement magnétique sont correctement reproduits.

3. Conclusion

Le sujet de ce travail était l'étude du comportement hystérétique et piézomagnétique d'un acier dual-phase. Les mesures hystérétiques et piézomagnétiques ont été effectuées dans différentes conditions de chargement (mécanique et magnétique). Les résultats expérimentaux sont cohérents avec les résultats de la littérature. Ils mettent en évidence l'effet de la contrainte uniaxiale et du niveau du champ magnétique sur l'aimantation du matériau. La modélisation multiéchelle a été utilisée pour calculer à la fois le comportement hystérétique magnétique et piézomagnétique. Le modèle multiéchelle semble capable de décrire correctement l'effet d'une contrainte appliquée et d'un champ magnétique externe sur l'aimantation. Cependant, certaines lacunes du modèle sont notées vu qu'il considère que le chargement magnétique et mécanique homogènes à l'échelle du VER. En plus, le comportement n'est vu qu'à travers la configuration des domaines magnétiques ce qui négligeant certains effets de frontière et d'interface.

Références

- [1] E. Villari, "Change of magnetization by tension and by electric current" *Ann. Phys. Chem.*, 126 (1865), 87-122.
- [2] R. M. Bozorth, "Ferromagnetism", New York: Ed. Van Nostrand, 1951.
- [3] J. Dumont-Fillon, "Mesures – Analyses / Contrôle non destructif", *Techniques de l'ingénieur*, 1996.
- [4] L. Lolloz, S. Pattofatto and O. Hubert, "Application of piezo-magnetism for the measurement of stress during an impact", *J. of Electrical Engineering*, 57 8 (2006) 15-20.
- [5] O. Hubert, K. J. Rizzo, "Anhysteretic and dynamic piezomagnetic behavior of a low carbon steel". *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 20 (2008), 979-982.
- [6] S. Bao, T. Erber, S.A. Guralnick, W.L. Jin, "Fatigue, Magnetic and Mechanical Hysteresis" *Strain*, 372-381, 2011.
- [7] K.J. Rizzo, O. Hubert and L. Daniel, "A multiscale model for piezomagnetic behavior", *European Journal of Electrical Engineering*, 12 4 (2009) 525-540.
- [8] H. Hauser. "Energetic model of ferromagnetic hysteresis: Isotropic magnetization". *Journal of Applied Physics*, 96 5, (2004), 2753-2767.
- [9] O. Hubert, S. Lazreg, "Two phase modeling of the influence of plastic strain on the magnetic and magnetostrictive behaviors of ferromagnetic materials", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 424 2 (2017) 421-442.
- [10] L. Daniel, O. Hubert, N. Buiron and R. Billardon, "Reversible magneto-elastic behavior: a multiscale approach", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56 (2008), 1018-1042.
- [11] O. Hubert, "Multiscale magneto-elastic modeling of magnetic materials including isotropic second order stress effect", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 491 (2019), pp.165564.
- [12] L. Daniel, M. Rekik, O. Hubert "A multiscale model for magneto-elastic behavior including hysteresis effect", *Archive of Applied Mechanics*, 84, 9 (2014), 1307-1323.
- [13] X. Chang, K. Lavernhe-Taillard, O. Hubert, "Stochastic multiscale modeling of the thermomechanical behavior of polycrystalline shape memory alloys", *Mechanics of Materials* (2019), 144, (2020), 1-27, 103361.