

Caractérisation et modélisation de matériaux et composants magnétiques sous contrainte thermique

Fabien SIXDENIER, Marie-Ange RAULET, Christian MARTIN, Laurent MOREL, Thibaut CHAILLOUX, Oualid MESSAL, Alaa HILAL

Université de Lyon, Université Lyon 1, CNRS UMR5005 AMPERE, 43, Bld du 11 Novembre 1918, Villeurbanne, F69622 FRANCE

RESUME – Cet article a pour but de présenter une synthèse des études faites autour de la caractérisation et de la modélisation des matériaux et composants magnétiques sous contrainte thermique. Les études présentées sont notamment, mais pas exclusivement, issues des travaux du laboratoire AMPERE et plus particulièrement de l'équipe « matériaux pour le génie électrique ».

MOTS-CLES – Matériaux magnétiques doux, hystérésis, composants magnétiques, haute température,....

1. Introduction

Les convertisseurs de l'électronique de puissance cherchent à travailler à des fréquences de découpage de plus en plus élevées. Cette tendance devrait encore s'accroître avec l'utilisation des composants à semi-conducteur à grand gap (SiC et GaN) qui permettront probablement d'augmenter les fréquences de commutation de la MLI entre 50 kHz et 200 kHz [1][2]. A titre d'exemple, en accord avec la norme NFC 15-100, Legrand dans [3] prévoit le déclassement de certains appareils de protection tels que les disjoncteurs magnétothermiques lorsque la température ambiante dépasse 30°C. La première partie présentera ces évolutions pour 2 grandes familles de matériaux : nanocrystallin recuit sous champ et alliage FeNi. Il est ensuite important de pouvoir reproduire cette évolution des propriétés magnétiques, à l'aide de modèles, tantôt issus de la littérature, mais adaptés aux nouveaux besoins, tantôt des modèles originaux créés spécifiquement pour répondre de la meilleure manière à ces nouveaux besoins. La dernière partie présentera deux applications où la température influe sur les performances.

2. Caractérisation sous contrainte thermique

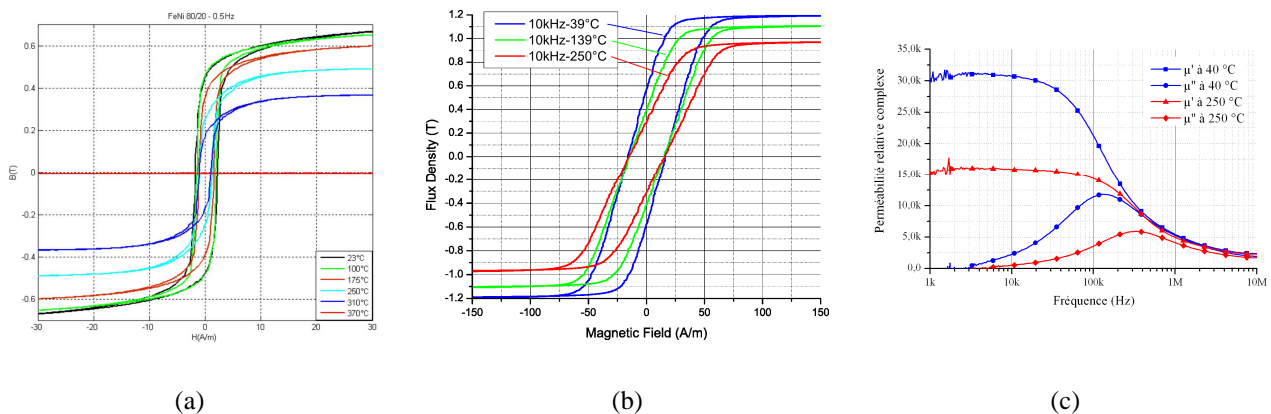


Figure 1 : Caractérisations magnétiques de matériaux.

Nous présentons dans cette section des résultats de caractérisation obtenus sur deux matériaux différents. Le premier est un FeNi78% caractérisé sous forme de tore enroulé ($T_c=350^\circ\text{C}$). Le deuxième est un matériau nanocristallin (N14E1) de perméabilité relative $\mu_r=30000$ ($T_c=600^\circ\text{C}$). La figure 1(a) présente les cycles B(H) quasi-statiques obtenus sur le matériau FeNi78% de la température ambiante jusqu'à une température supérieure à la température de Curie (i.e $T=370^\circ\text{C}$). On remarque bien la disparition du ferromagnétisme si $T>T_c$. La figure 1(b) présente des cycles dynamiques à 10 kHz pour le matériau nanocristallin ($\mu_r=30000$) de $T=39^\circ\text{C}$ jusqu'à 250°C . On remarque pour le matériau FeNi, que la perméabilité relative, dans la partie linéaire a tendance à augmenter avec la température. La tendance est inversée pour le matériau nanocristallin (μ_r diminue avec la température). Cette dernière observation est corrélée par des mesures obtenues à l'impédancemètre (Agilent 4294A) pour mesurer les perméabilités complexes ($\mu_r = \mu' - j \mu''$) sur la figure 1(c). En effet, la partie réelle de la perméabilité complexe a été divisée par deux lorsque la température passe de 40°C à 250°C . Ces 3 figures sont extraites des thèses [4] et [5]

3. Modélisation incluant l'effet de la température

3.1 Modèles statiques

Parmi le nombre conséquent de modèles de matériaux magnétiques, peu tiennent compte de l'influence thermique [6]. Il apparaît qu'un modèle réversible conduit à une représentation satisfaisante du comportement statique de matériaux ayant un champ coercitif très faible. Le modèle Polynomial Par Morceaux (PPM) [7] est par conséquent utilisé pour représenter le comportement du nanocristallin N14E1 dans l'application considérée. De plus ce modèle se prête bien à la prise en compte de la température grâce à l'identification de ses paramètres en fonction de la température. A contrario, la modélisation des matériaux FeNi dont le cycle statique revêt un champ coercitif plus important et variable en fonction de la température, nécessite l'emploi d'un modèle représentant le phénomène d'hystérésis statique (figure 2a). Dans ce cas, le modèle de JA est considéré de par sa commodité de prise en compte de l'influence thermique [8]. Une méthode d'identification spécifique a été développée d'une part pour avoir une bonne précision et d'autre part pour obtenir une évolution des paramètres monotone (cf figure 2b).

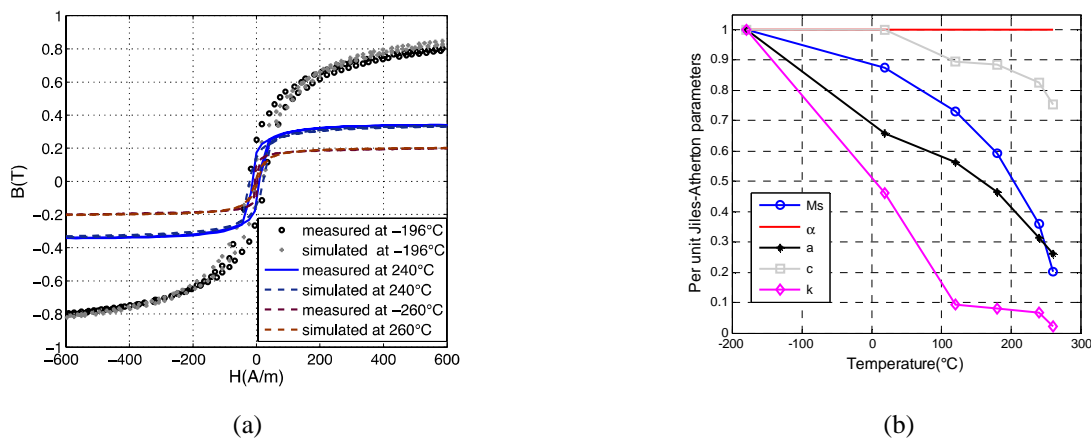


Figure 2 : Cycles mesurés et simulés par le modèle de JA intégrant le modèle de Weiss modifié pour différentes températures pour le matériau PHYTEM260 ($T_c=260^\circ\text{C}$) (a) et évolution des paramètres de JA (b)

3.2 Modèles dynamiques

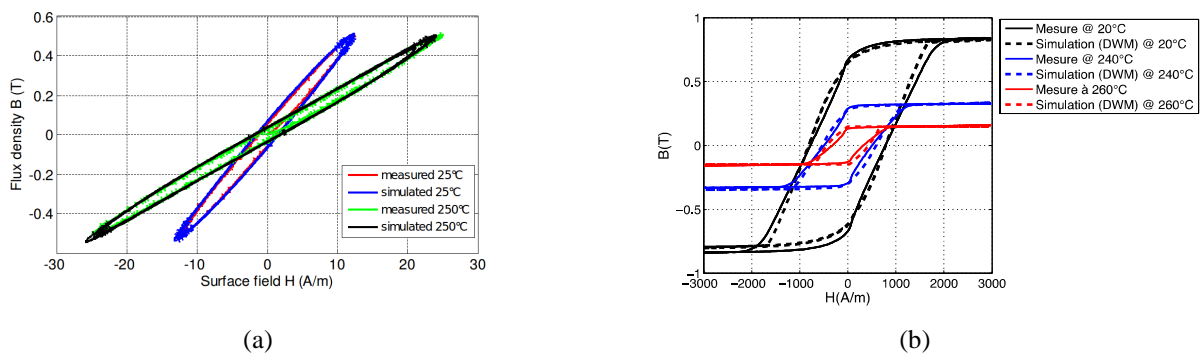


Figure 3 : Cycles dynamiques du matériau N14E1 mesurés et simulés par le modèle de Bertotti à 10 kHz (a) et Cycles dynamiques du matériau Phyterm260 mesurés et simulés par le modèle DWM à 2 kHz (b)

Dans les deux applications visées, les matériaux magnétiques sont soumis à des sollicitations rapides et une représentation dynamique de leur comportement s'avère indispensable. La représentation dynamique du matériau nanocristallin N14E1 pour des fréquences n'excédant pas 10 kHz peut être faite par le modèle global de Bertotti [9]. Ses deux paramètres (le premier lié aux courants de Foucault et le second rattaché aux mouvements de parois) sont identifiés en fonction de la température [10]. Par contre, un modèle diffusif s'avère nécessaire pour la représentation d'effets dynamiques dissipés dans le tore massif en FeNi. Le modèle de courant de Foucault diffusif incluant les effets dynamiques dus aux mouvements de parois (Diffusion and Wall Motion, DWM) est employé.

4. Applications

4.1.1 Relais de disjoncteurs différentiels

Les relais électromagnétiques haute sensibilité utilisés dans les disjoncteurs différentiels à propre courant utilisent généralement des culasses magnétiques en alliage Fe-50%Ni. Les nouveaux alliages FeNi(Cr,Cu) issus du département Recherche et Développement du groupe Aperam permettent de réduire significativement le pourcentage de Ni (donc le coût) vers 30%Ni (Voir Tableau 1 pour les compositions chimiques et les dimensions des échantillons de forme torique).

TABLEAU 1

Coulée-Alliage	D_{int} (mm)	D_{ext} (mm)	Epaisseur (mm)
Supra36/Invar/QJ310 (Fe-36%Ni)	25	36	0.34
SV315 (Fe-31%Ni-2%Cr-6%Cu-0,2%Mn)	25	36	0.6
TD522-5 (bombe) (Fe-30,5%Ni-2%Cr-6,4%Cu-0,2%Mn)	25	36	0.6
SV285/ lingot 10kg (Fe-30%Ni-6%Cu-0,3%Mn)	25	36	0.6
TD565-4 (bombe) (Fe-30%Ni-1%Cr-10%Cu-0,2%Mn)	25	36	0.6

A partir de mesures réalisées sur ces échantillons, nous avons pu identifier les paramètres des modèles de comportement de matériaux présentés au paragraphe 3. Le circuit magnétique du relais est ensuite représenté via des « tubes de flux dynamiques » où l'on peut implanter les différents modèles précédemment énoncés. La simulation de relais virtuels où le matériau de référence (Supra50) serait remplacé par les matériaux du tableau 1 a pu être faite et ainsi prédire quel serait le courant de déclenchement en fonction de la fréquence et de la température. Nous pouvons voir sur la figure 2, que le courant de déclenchement est fortement influencé par le matériau choisi quelle que soit la fréquence. L'augmentation de la température a tendance à rendre le relais beaucoup plus sensible (le courant de déclenchement est plus faible). Ceci pousse à dire que le point critique, en terme de température, pour cette application est le point bas (-25°C).

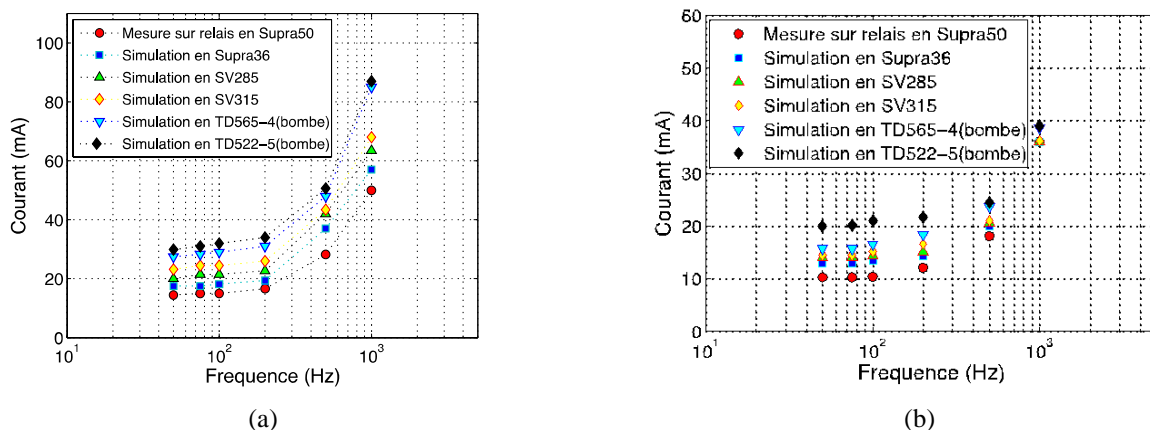


Figure 2 : Simulation du courant de déclenchement de relais différentiels constitué de différents matériaux à 25°C (a) et à 85°C (b).

4.1.2 Filtre CEM

Le matériau nanocristallin de perméabilité relative $\mu_r=30000$ (voir paragraphe 2) a été utilisé pour réaliser l'inductance de mode commun d'un filtre CEM. L'inductance de mode différentiel avait, elle, été réalisée également avec un

matériau nanocristallin, mais avec une perméabilité de $\mu_r=200$. La figure 3 montre la mesure des émissions conduites en entrée du filtre selon la norme DO-160. On peut voir que le filtre permet de scrupuleusement respecter le niveau de perturbations admissibles lorsque $f < 2$ MHz. Quelques fréquences spécifiques sont au-dessus du gabarit de la norme, mais peuvent être corrigées par des retours sur la conception. On peut voir également que l'augmentation de la température a tendance à dégrader, dans toute la gamme de fréquence, les performances du filtre tout en garantissant un niveau de filtrage suffisant. Ceci est principalement dû à la diminution de μ'' lorsque la température augmente (voir paragraphe 2).

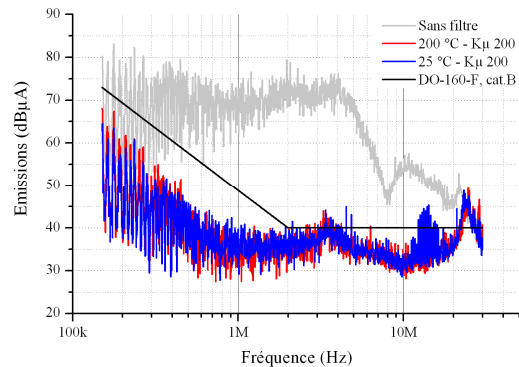


Figure 3 : Emissions conduites selon la norme DO-160-F sur le courant de ligne en entrée du filtre CEM.

5. Conclusion

Nous avons vu, au travers de cet article, que la prise en compte de la température dans le comportement des matériaux magnétiques ainsi que dans les applications utilisant ces derniers requérait un savoir-faire et une maîtrise toute particulière afin de pouvoir prédire les performances du matériau puis du dispositif en fonction de la température. Ceci est d'autant plus vrai, car tous les matériaux n'ont pas le même comportement vis-à-vis de la température (cf paragraphe 2). Il est donc nécessaire de les étudier sous contrainte thermique pour pouvoir connaître leurs propriétés dans ces conditions. Cette connaissance servira ensuite à concevoir des systèmes plus robustes vis-à-vis de la température ou tout du moins à prévoir avec précision les limites de fonctionnement en température du système.

6. Références

- [1] C. J. Cass, Y. Wang, R. Burgos, T. P. Chow, F. Wang, and D. Boroyevich. Evaluation of SiC JFets for a three-phase current-source rectifier with high switching frequency. Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (2007).
- [2] T. Friedli, S. D. Round, D. Hassler, and J. W. Kolar. Design and performance of a 200-kHz all-SiC JFet current dc-link back-to-back converter. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 45, Numéro 5, p1868-1878 (2009).
- [3] La protection des circuits et des personnes. GUIDE PÉDAGOGIQUE EN CONFORMITÉ AVEC LA NF C 15-100 DU 31/05/03. Legrand
- [4] Anh-Tuan BUI, Caractérisation et modélisation du comportement des matériaux magnétiques doux sous contrainte thermique, thèse soutenue à l'Université Claude Bernard - Lyon I (19/04/2011)
- [5] Rémi ROBUTEL, Étude des composants passifs pour l'électronique de puissance à «haute température» : application au filtre CEM d'entrée, thèse soutenue à l'INSA de Lyon (2011)
- [6] Raghunathan, Y. Melikhov, J. E. Snyder, D. C. Jiles. Modeling the Temperature Dependence of Hysteresis Based on Jiles-Atherton Theory. IEEE transactions on Magnetics, Volume 45, Numéro 10, p3954-3957 (2009).
- [7] T. Chailloux, M. A. Raulet, C. Martin, C. Joubert, F. Sixdenier, and L. Morel. Magnetic Behavior Representation Taking Into Account the Temperature of a Magnetic Nanocrystalline Material. IEEE Transactions on Magnetics, Volume 48, Numéro 2, p455-458 (2012).
- [8] Oualid Messal, Fabien Sixdenier, Laurent Morel, Noël Burais, Temperature Dependent Extension of the Jiles-Atherton Model: Study of the Variation of Microstructural Hysteresis Parameters, IEEE Transactions on Magnetics 48, 10 (2012) pp2567 – 2572
- [9] G. Bertotti, General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, IEEE Transactions on Magnetics 24, 1 (1988) pp621 – 630
- [10] A. Hilal, M.A. Raulet, C. Martin, Magnetic Components Dynamic Modeling with Thermal Coupling for Circuit Simulators. 21th Soft Magnetic Materials Conference (Septembre 2013)