

Un mode de vortex dans des pétales ferromagnétiques

J. NEIGE - T. LEPETIT - N. MALLÉJAC - A. L. ADENOT ENGELVIN / CEA – Le Ripault
 A. THIAVILLE / Laboratoire de physique des solides, CNRS UMR 8502, Université Paris-Sud, Orsay
 N. VUKADINOVIC / Dassault Aviation, Saint-Cloud

Les composites à base d'inclusions ferromagnétiques sont utilisés comme absorbants électromagnétiques dans de nombreuses applications de télécommunications (antennes, téléphones mobiles). Parmi les nombreuses charges envisageables, les pétales ferromagnétiques ont attiré l'attention de la communauté scientifique en raison de leur rapport de forme qui permet d'obtenir une perméabilité magnétique élevée. Étant donné leur taille, on pourrait s'attendre à ce que ces particules présentent une structure d'aimantation multi-domaines. On observe généralement deux résonances, couramment interprétées de la façon suivante : la résonance basse fréquence, attribuée aux parois de domaines, et la résonance haute fréquence assignée aux domaines. Aucune preuve expérimentale de cette interprétation n'avait toutefois été apportée. Dans ce travail, nous démontrons que la résonance basse fréquence peut être interprétée comme un mode de déplacement de vortex.

Les pétales considérés (**figure 1a**) ont des épaisseurs inférieures à $1\ \mu\text{m}$ et un rapport d'aspect β (rapport de l'épaisseur sur la dimension latérale) entre 1/10 et 1/100 [1]. Des composites ont ensuite été réalisés et des observations en microscopie électronique à balayage (MEB) montrent un alignement préférentiel des pétales parallèlement au plan du composite (**figure 1b**).

La structure magnétique d'un pétale est décrite par la donnée du vecteur aimantation en tout point du pétale. Lorsque le pétale est soumis à un champ magnétique hyperfréquence dans une certaine direction, seule la composante de l'aimantation locale perpendiculaire au champ exciteur contribue au spectre de perméabilité. Un exemple de ce dernier pour des composites à base de pétales ferromagnétiques en $\text{Fe}_{80}\text{Ni}_{15}\text{Mo}_5$ (FeNiMo) et Fe est présenté sur la **figure 2** pour un champ exciteur respectivement parallèle (configuration parallèle) et perpendiculaire (configuration perpendiculaire) au plan des pétales [2]. Ainsi, contrairement au cas du Fe qui ne présente qu'une seule résonance à 320 MHz, on constate la présence de deux pics de résonance à 75 MHz et 2,8 GHz pour l'échantillon en FeNiMo dans le cas où le champ hyperfréquence exciteur est appliqué dans le plan des pétales. On remarque également que la contribution basse fréquence disparaît lorsque le champ exciteur est appliqué perpendiculairement au plan des pétales. La contribution haute fréquence est en revanche bien présente dans les deux cas (bien que légèrement

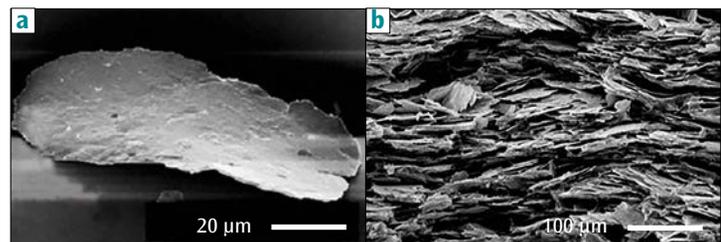


Figure 1. (a) : image MEB d'un pétale ferromagnétique – (b) : image MEB d'un composite réalisé avec ces pétales.

décalée). Ces mesures permettent donc de conclure que le pic basse fréquence est dû à une zone du pétale où l'aimantation est orientée selon la normale au plan de celui-ci : une imagerie magnétique d'un pétale semble donc être la solution à privilégier pour trouver où se situent les zones où l'aimantation peut avoir cette orientation caractéristique.

L'observation par microscopie à force magnétique (MFM) d'un pétale de petite taille permet en effet d'appréhender la structure magnétique de la particule. Sur la **figure 3b**, on constate que la particule est constituée de domaines en hélice au centre desquels évolue un vortex. La zone d'aimantation recherchée étant parallèle à la normale au plan du pétale, il reste deux possibilités : soit un vortex magnétique (**figures 3a et 3b** où l'aimantation du coeur de vortex est normale au plan de la feuille), soit une paroi de

domaine magnétique de type Bloch (schématisée en bleu sur la **figure 3b**) où l'aimantation pointe également de façon locale perpendiculairement au plan du pétale.

L'observation des fréquences de résonance ainsi que des simulations micromagnétiques nous ont conduits à écarter la piste de résonance de paroi. Afin d'évaluer la pertinence de l'hypothèse du vortex, nous avons utilisé un modèle de résonance de vortex [3]. Dans ce modèle, le coeur du vortex est assimilé à une particule qui décrit un mouvement de précession circulaire autour du centre de la particule à la pulsation propre ω_0 (**figure 3a**) sous l'action du champ magnétique excitateur et de la force de rappel générée par le champ démagnétisant. Ce dernier est associé aux charges magnétiques apparaissant sur le bord du domaine circulaire lors du déplacement du coeur de vortex.

Ce modèle décrit très bien les courbes expérimentales de la fréquence de résonance basse fréquence en fonction du rapport de forme β , du champ statique appliqué et même de la composition du pétale.

Ces travaux représentent une avancée significative dans la compréhension des composites à base de pétales ferromagnétiques. Par ailleurs, il a été montré que la perméabilité de composites à base de pétales ferromagnétiques s'explique principalement par la perméabilité d'un pétale isolé [4]. Une ingénierie de la résonance basse fréquence est maintenant envisageable sur la base du modèle de résonance de

vortex. Il faut souligner qu'un tel mode de vortex n'avait, jusqu'à présent, été mis en évidence que dans le cas de nanoplots magnétiques spécialement fabriqués. L'existence et la stabilité de modes de vortex dans des particules aussi imparfaites que des pétales ferromagnétiques est une observation remarquable.

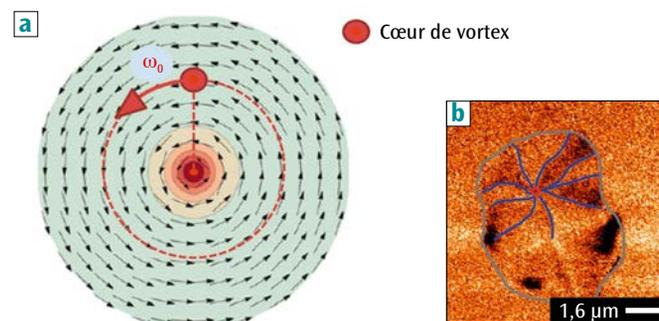
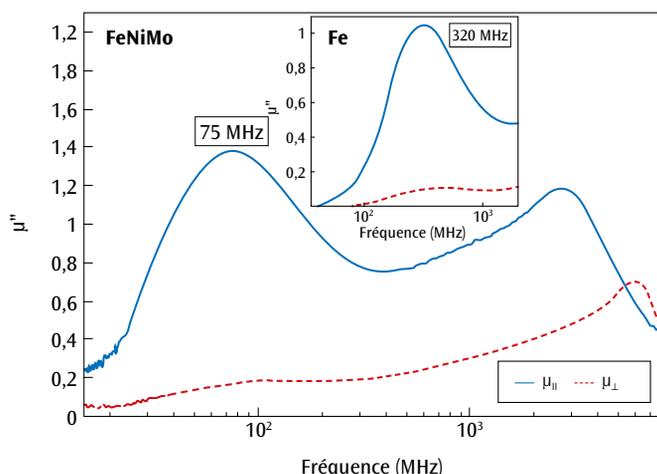


Figure 1. (a) : schéma illustrant le déplacement du coeur de vortex dans le modèle [3] – (b) : image MFM d'un pétale sur laquelle ont été schématisés le coeur de vortex (point rouge au centre) et les parois des domaines en hélice (en bleu). Dans ces deux zones du pétale, l'aimantation pointe perpendiculairement hors du plan.

Figure 2. Spectre de perméabilité de composites à base de pétales pour deux compositions de pétale (FeNiMo et Fe).



Références

- [1] R. M. WALSER, W. WIN, P. M. VALANJU, "Shape-optimized ferromagnetic particles with maximum theoretical microwave susceptibility", *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1390 (1998).
- [2] J. NEIGE, T. LEPETIT, N. MALLÉJAC, A.-L. ADENOT-ENGELVIN, A. THIAVILLE, N. VUKADINOVIC, "Evidence of an embedded vortex translation mode in flake-shaped ferromagnetic particle composites", *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 242401 (2013).
- [3] K. Y. GUSLIENKO *et al.*, "Eigenfrequencies of vortex state excitations in magnetic submicron-size disks", *J. Appl. Phys.*, **91**, 8037 (2002).
- [4] J. NEIGE, *Élaboration, caractérisation et modélisation d'un composite à base de pétales ferromagnétiques pour des applications hyperfréquences*, Thèse de l'Université François Rabelais de Tours (2013).