

# Mesure de l'induction rémanente d'un aimant par méthode d'extraction

Abderraouf Ouazib<sup>1,2</sup>, Mathieu Domenjoud<sup>1,2</sup> et Laurent Daniel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, , 91192 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup>Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, , 75252 Paris, France

**RESUME** – La mesure de l'induction rémanente des aimants permanents peut se réaliser par diverses techniques de caractérisation. Parmi les différentes méthodes de mesure d'induction, la méthode d'extraction peut être citée comme l'une des plus simples à utiliser dans le cas général, mais elle présente des difficultés de mise en place pour les échantillons de faibles dimensions. Ce travail présente une variante de cette méthode, adaptée pour les échantillons de faible longueur et simple à mettre en œuvre. La méthode est validée par comparaison avec la méthode de mesure d'induction en circuit fermé. Une bonne correspondance entre les deux méthodes a été observée. Une application directe est effectuée pour estimer l'induction rémanente d'aimants à terres rares.

*Mots-clés*—Aimant permanent, Aimantation rémanente.

## 1. INTRODUCTION

La méthode fluxmétrique à circuit fermé est l'une des plus utilisées pour la caractérisation du comportement des matériaux ferromagnétiques. Cependant, les champs coercitifs des aimants permanents peuvent être très élevés (environ  $1,5 \times 10^6$  A/m, voire plus pour les aimants à base de terres rares) et les champs de saturation de l'ordre de  $5 \times 10^6$  A/m, ce qui limite l'application de cette méthode pour ce type de matériaux [1].

Des méthodes à circuit ouvert spécifiques à la caractérisation des aimants sont proposées dans la littérature. Les principales méthodes de caractérisation des matériaux durs et les différents problèmes surgissant lors de l'application de ces méthodes peuvent être trouvés dans [2][3]. On s'intéresse ici aux méthodes permettant la mesure de l'induction rémanente des aimants sans application de champ magnétique, parmi lesquelles on trouve la méthode d'extraction. Cette méthode est applicable principalement pour des échantillons de forme cylindrique ou parallélépipédique, mais devient difficilement réalisable pour des échantillons de faible longueur à cause de la difficulté à réaliser un bobinage adéquat.

On propose dans ce travail une modification de cette méthode, applicable pour les échantillons de faible longueur, et adaptée aux dispositifs de caractérisation magnétique en circuit fermé. On commencera par présenter la méthode classique d'extraction, pour pouvoir décrire la variante proposée. Ensuite, on décrira la technique retenue pour définir le coefficient démagnétisant  $N_d$ , nécessaire pour l'application de cette méthode. Finalement, on présentera les résultats de validation en comparant les résultats obtenus par la méthode d'extraction avec ceux mesurés par la méthode fluxmétrique. De plus, on exposera également les résultats d'application de la méthode d'extraction sur des échantillons où la mesure fluxmétrique n'a pas pu être réalisée.

## 2. MÉTHODE D'EXTRACTION

La méthode d'extraction permet la mesure de l'induction rémanente d'un aimant permanent. Dans sa version classique, l'aimant est déplacé d'une position de repos, où il est complètement inséré dans une courte bobine de détection, à un endroit éloigné de la bobine, où le flux créé par l'aimant et traversant la bobine est nul [1]. Si la section de la bobine de mesure est ajustée pour être identique à la section de l'échantillon, le flux initial sera égal à  $\Phi_i = \mu_0 (M_r - H_d) S$  où  $S$  est la section de l'échantillon,  $M_r$  l'aimantation rémanente à mesurer,  $\mu_0$  la perméabilité du vide et  $H_d$  le champ démagnétisant moyen dans l'aimant.

Le champ démagnétisant  $H_d$  est lié à l'aimantation de l'échantillon par le coefficient démagnétisant  $N_d$  (ce coefficient n'est rigoureusement défini que dans le cas où l'aimantation  $M$  et le champ démagnétisant  $H_d$  sont uniformes, ce qui n'est pas le cas pour des échantillons cylindriques ou parallélépipédiques). Un coefficient démagnétisant moyen sur la section médiane de l'aimant (coefficient démagnétisant fluxmétrique  $N_d^f$ ), applicable pour le cas d'une courte bobine de détection, est défini. Il permet de relier le champ démagnétisant moyen dans la section médiane et l'aimantation moyenne via la relation  $H_d = -N_d^f M_r$ . Considérant que le flux final (lorsque l'échantillon est suffisamment éloigné de la bobine de mesure) est nul, la variation de flux à travers la bobine s'écrit :

$$\Delta\Phi = \mu_0 M_r (1 - N_d^f) S \quad (1)$$

La solution proposée dans la littérature pour le cas d'échantillons de faible longueur est d'utiliser le principe de réciprocité qui permet de mettre en relation l'aimantation de l'échantillon et la variation de flux dans une bobine de détection. La variation de flux est générée par le déplacement de l'échantillon depuis la zone d'essai (définie par les dimensions de la bobine avec une uniformité de champ d'au moins 1%) vers une zone où

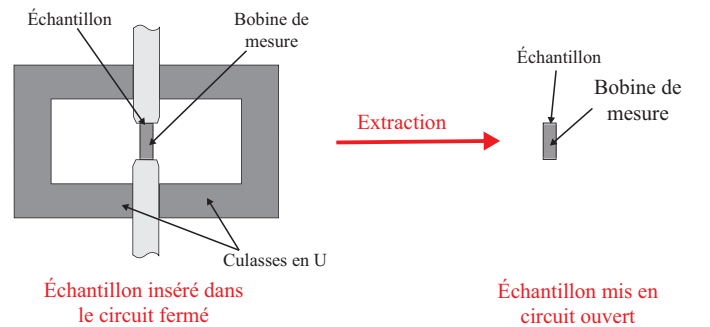


FIG. 1. Procédure d'extraction.

le flux traversant la bobine est nul. Cette solution nécessite une calibration de la bobine de détection et une détermination précise de la constante de champ magnétique sur l'intensité de courant de la bobine ( $k_h = \frac{H}{I}$  où  $H$  est l'intensité du champ magnétique généré pour un courant  $I$  circulant à travers la bobine), ainsi qu'une détermination précise de la zone d'essai [4].

Une variante de cette méthode est illustrée sur la figure 1. Celle-ci consiste en la mesure des variations du flux à travers une bobine enroulée autour de l'aimant permanent (couvrant toute sa surface latérale) lors de l'extraction de l'ensemble bobine et aimant d'un circuit fermé (constitué de deux colonnes qui sont refermées à travers deux culasses, le tout en fer doux). Cette configuration permet l'élimination du mouvement relatif de l'échantillon par rapport à la bobine.

Le flux initial correspond à  $\Phi_i = \mu_0 M_r S$  (en circuit fermé, on suppose l'absence totale d'effet démagnétisant). Le flux final correspond à  $\Phi_f = \mu_0 M_r (1 - N_d^m) S$ , car l'échantillon est mis en dehors du circuit et son aimantation est diminuée à cause du champ démagnétisant.  $N_d^m$  est défini dans ce cas (cas d'une bobine qui couvre toute la surface latérale de l'échantillon) comme le coefficient démagnétisant moyen sur tout le volume de l'échantillon (coefficient démagnétisant magnétométrique). La variation de flux mesuré correspondra aux différences entre ces deux flux. L'induction rémanente peut être déduite de la variation de flux mesurée :

$$B_r = -\frac{\Delta\Phi}{N_d^m S} \quad (2)$$

La valeur de l'induction rémanente est ainsi définie par la mesure de la variation de flux  $\Delta\Phi$  et l'estimation du coefficient démagnétisant  $N_d^m$ . La mesure de  $\Delta\Phi$  est faite par intégration numérique de la tension induite relevée aux bornes de la bobine enroulée autour de l'échantillon. L'estimation de  $N_d^m$  passe par le calcul de la moyenne du champ démagnétisant  $H_d$  sur le volume de l'échantillon.

### 3. ESTIMATION DU COEFFICIENT DÉMAGNÉTISANT

La valeur de  $N_d^m$  dépend des dimensions de l'échantillon étudié et de la perméabilité du matériau qui le constitue. Sous l'hypothèse d'une distribution uniforme de l'aimantation et d'une perméabilité relative  $\mu_r = 1$ , des techniques pour calculer

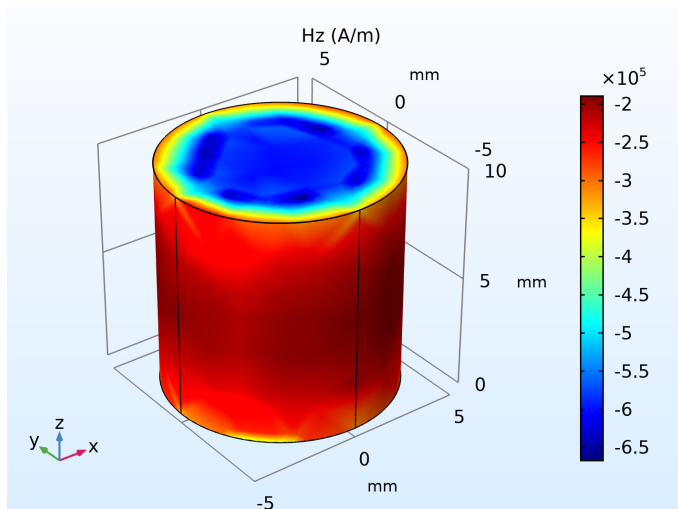


FIG. 2. Distribution du champ démagnétisant dans un aimant cylindrique ( $M_r = 1.073 \text{ MA/m}$  et  $\mu_r = 1$ ).

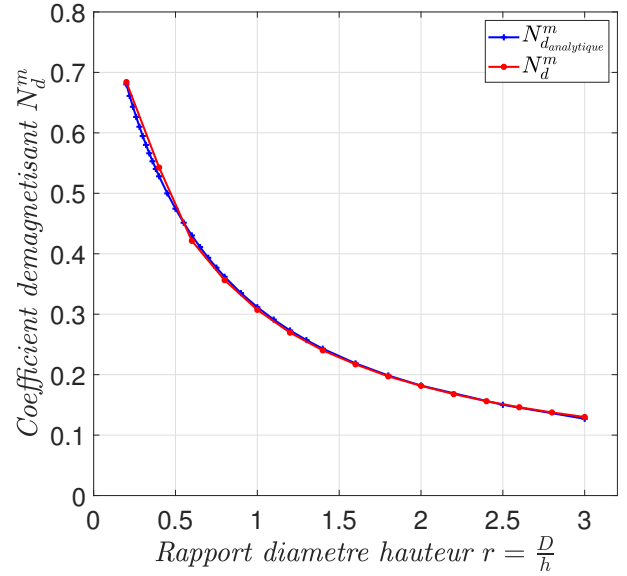


FIG. 3. Comparaison entre l'évolution du coefficient démagnétisant calculé analytiquement (en bleu) et de celui calculé par éléments finis (en rouge) en fonction du rapport diamètre sur hauteur.

analytiquement le champ démagnétisant sont proposées dans la littérature [5]. Les facteurs de démagnétisation fluxmétrique (balistique) et magnétométrique, pour les cylindres en fonction de la perméabilité et du rapport de la longueur au diamètre ont ainsi été évalués. En utilisant des modèles analytiques 1D ou 2D selon le rapport diamètre sur hauteur.

Le facteur démagnétisant peut aussi être estimé à l'aide d'une simulation par éléments finis en calculant la distribution du champ démagnétisant  $H_d$  sur un échantillon placé dans le vide, et en calculant le rapport entre la moyenne de ce champ et l'aimantation  $M_r$  de l'aimant. Le calcul a été réalisé, dans notre cas, par le logiciel de calcul COMSOL, sous l'hypothèse d'une distribution uniforme de l'aimantation  $M_r = 1.073 \text{ MA/m}$  et une perméabilité relative égale à  $\mu_r = 1$ . Les résultats de [5] sont comparés à ceux obtenus par cette méthode. La distribution du champ magnétique dans l'aimant calculée par éléments finis est représentée sur la figure 2. Cette distribution n'est pas homogène, malgré l'uniformité de l'aimantation, ce qui explique l'impossibilité de bien définir le coefficient démagnétisant.

Le calcul de  $N_d^m$  a été fait par extraction des valeurs du champ démagnétisant sur un maillage régulier à partir de la distribution calculée par éléments finis. Le rapport entre ce champ démagnétisant moyen  $H_d$  calculé sur ce maillage et l'aimantation  $M_r$  donne  $N_d^m$ . La simulation a été faite pour différentes dimensions (différents rapports diamètre sur longueur) et les coefficients estimés ont été comparés avec les résultats du calcul analytique réalisé dans [5]. Les résultats de comparaison sont représentés sur la figure 3. Une concordance presque parfaite entre les deux graphes est observée.

Dans le cas où le ratio  $r$  entre la hauteur et le diamètre du cylindre vaut 1, qui correspond à la configuration d'essai, le calcul par éléments finis indique  $N_d = 0.3072$ , et la valeur analytiquement calculée dans [5] est  $N_d = 0.3116$ .

L'écart relatif trouvé entre le calcul éléments finis réalisé et les données de [5] ne dépasse pas 3%. L'évaluation de cet écart relatif permet de valider notre méthode de calcul basée sur les éléments finis. La méthode éléments finis est retenue pour le

calcul de  $N_d^m$ . Elle permet de calculer ce coefficient quelles que soient les dimensions et la perméabilité de l'échantillon.

#### 4. VALIDATION DE LA MÉTHODE

La validation de la méthode est réalisée en choisissant un matériau dont l'induction rémanente peut être mesurée à travers une méthode fluxmétrique. Les Ferrites dures ont été choisies, car ce matériau possède un champ coercitif assez élevé pour qu'il soit résistant à son propre champ démagnétisant, mais assez faible pour réaliser un cycle majeur en circuit fermé.

Le dispositif expérimental utilisé est constitué de deux colonnes magnétiques en Permendur entre lesquelles l'échantillon est placé, et de deux culasses en Ferrites doux en forme de U pour assurer le retour du flux à travers un circuit fermé. L'aimantation du matériau est obtenue en appliquant un champ magnétique généré par des bobines enroulées autour des colonnes centrales et des culasses. Plus de détails sur le dispositif expérimental peuvent être trouvés dans [6]. Ce circuit constituera le circuit fermé qui permet la réalisation de la mesure d'extraction. L'échantillon est placé entre les deux colonnes et la variation de flux est mesurée lorsqu'il est sorti du circuit. Ce dispositif permet en outre d'aimanter le matériau et de mesurer des cycles d'hystérésis.

La validation est effectuée en comparant l'induction mesurée par extraction à celle obtenue à partir d'un cycle.

Une troisième mesure (par aimantation) consiste, à partir d'un échantillon désaimanté, à mesurer la première aimantation jusqu'à saturation et le retour à l'état rémanent. La valeur finale de l'induction correspondra à l'induction rémanente.

La mesure par cycle majeur consiste à mesurer les variations d'induction sur un cycle majeur parcouru comme indiqué sur la figure 4. La valeur de l'induction rémanente correspondra à  $B_r = -\frac{1}{2}\delta B_{max} - \delta B_i$  où  $\delta B_i$  représente la variation d'induction mesurée entre  $H = 0$  et  $H_{max}$ , et  $\delta B_{max}$  la variation d'induction mesurée entre  $H_{max}$  et  $-H_{max}$  ( $H_{max}$  est le champ appliqué maximal).

La figure 5 présente les résultats de la mesure de l'induction rémanente selon les trois méthodes.

Les résultats obtenus par cycle majeur sont les plus fiables, car seule la faible erreur d'intégration numérique due au bruit sur la tension mesurée par la bobine d'induction altère la mesure. Les résultats de mesures obtenus par extraction sont ré-

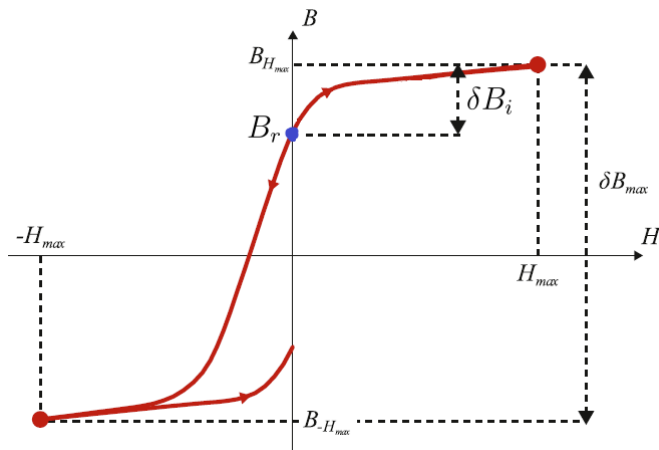


FIG. 4. Caractérisation par cycle majeur.

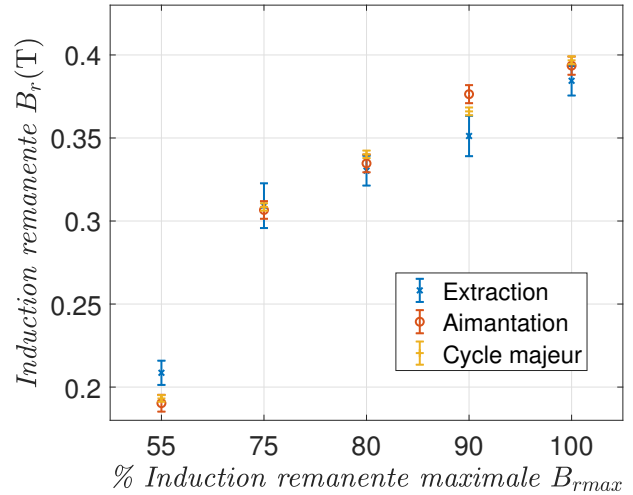


FIG. 5. Comparaison des résultats de la mesure obtenus par extraction avec ceux en circuit fermé pour un échantillon en Ferrites dures.

pétibles avec un rapport écart type sur valeur moyenne qui ne dépasse pas 4%. En se référant à la mesure par cycle majeur, les résultats de l'extraction présentent des écarts relatifs inférieurs à 4% pour les inductions proches de l'induction rémanente maximale. Une surestimation du résultat (8%) est observée à faible induction, ce qui peut s'expliquer par l'hétérogénéité de distribution de l'aimantation et donc l'expression de  $N_d$  qui perd en validité.

#### 5. EXEMPLE D'APPLICATION

Le Tableau 1 présente la comparaison entre des mesures réalisées par la méthode d'extraction proposée sur un échantillon de chacun des deux types d'aimants (Néodyme-Fer-Bore NdFeB et Samarium-Cobalt SmCo), et les valeurs indiquées par le fabricant.

TABEAU 1. Induction mesurée par extraction sur deux aimants terres rares.

Type d'aimant	Induction rémanente mesurée $B_r$ (T)	Données constructeur $B_r$ (T)
NdFeB	$1,38 \pm 0.01$	$1.37 - 1.42$
SmCo	$0,99 \pm 0.01$	$0.96 - 1.04$

Les résultats obtenus par la méthode proposée sont conformes à la plage de valeurs donnée par le constructeur, ce qui confirme la validité de la méthode.

#### 6. CONCLUSION

Ce travail décrit la mise en place d'une méthode de mesure de l'induction rémanente des aimants permanents sans altération de leur état d'aimantation. Elle est facile à mettre en place et produit des résultats de bonne précision, avec des erreurs relatives qui ne dépassent pas 4% par rapport à une méthode fluxmétrique, dans le cas où elle a pu être mis en œuvre.

#### 7. RÉFÉRENCES

- [1] Fiorillo, F., *Characterization and measurement of magnetic materials*, Academic Press., 2008.
- [2] Grössinger, R. "Characterisation of hard magnetic materials", J. Electr. Eng. Technol., vol. 59, p. 15-20, 2008.

- [3] Liu, Y., "Discussion on several principal problems aroused from measuring high performance permanent magnetic materials", *Int. J. Appl. Electromagnet. Mech.*, vol. 55, p. 453-479, 2017.
- [4] CEI IEC 60404-14 Première édition 2002-06, Matériaux magnétiques Partie 14 : Méthode de mesure du moment magnétique coulombien d'une éprouvette de matériau ferromagnétique par la méthode du retrait ou la méthode par rotation.
- [5] Chen, D.-X., Brug, James A., et Goldfarb, Ronald B. "Demagnetizing factors for cylinders", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, p. 3601-3619, 1991.
- [6] Domenjoud, M., Berthelot, É., Galopin, N., Corcolle, R., Bernard, Y., et Daniel, L., "Characterization of giant magnetostrictive materials under static stress : influence of loading boundary conditions", *Smart Mater. Struct.*, vol 28, p. 095012, 2019.