Remarques sur la mesure des constantes d'anisotropie magnétocristalline

William Simonet, Max Paulus

► To cite this version:

William Simonet, Max Paulus. Remarques sur la mesure des constantes d'anisotropie magnétocristalline. *Revue de Physique Appliquée*, 1969, 4 (4), pp.539-542. 10.1051/rphysap:0196900404053900 . jpa-00243326

HAL Id: jpa-00243326

<https://hal.science/jpa-00243326>

Submitted on 1 Jan 1969

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

REMARQUES SUR LA MESURE DES CONSTANTES D'ANISOTROPIE MAGNÉTOCRISTALLINE

Par WILLIAM SIMONET et MAX PAULUS,

Laboratoire de Magnétisme et de Physique des Solides, C.N.R.S., 1, place A.-Briand, 92-Bellevue (France).

(Reçu le 17 septembre 1969.)

Résumé. — Les cristaux cubiques ferro ou ferrimagnétiques, présentant une anisotropie uniaxe, induite par traitement thermomagnétique, peuvent, à l'état vierge, être divisés en régions magnétiquement uniaxes. L'ignorance de cette division entraîne des erreurs sur la détermination de K_1 qui peuvent aller jusqu'au changement apparent du signe de K_1 .

Abstract. — The cubic ferro or ferrimagnetic crystals, which exhibit an uniaxial anisotropy induced by thermomagnetic treatment, may be, in the virgin state, subdivided into uniaxial magnetic regions. Determination of K_1 , without to be aware of this division, leads to errors which may be sufficient to change, apparently, the sign of K_1 .

I. Introduction. — Lors de la détermination des coefficients K_1 et K_2 d'anisotropie magnétocristalline d'un cristal cubique, dans lequel on peut faire apparaître une anisotropie induite par traitement thermomagnétique, on admet, en général, que seuls K_1 et K_2 contribuent à l'anisotropie du cristal si celui-ci est vierge. En fait, sauf cas de trempe ou de refroidissement dans un champ tournant, le cristal est toujours soumis à un traitement thermomagnétique au cours de tout refroidissement lent depuis sa température de Curie, l'axe d'anisotropie induite étant parallèle à la direction locale de l'aimantation.

La présence d'une anisotropie uniaxe induite, en l'absence de toute cause extérieure (champ magnétique, contraintes...), a pour effet de diviser un même monocristal en régions ayant un comportement magnétique uniaxe d'autant plus marqué que l'anisotropie induite est grande par rapport à l'anisotropie cubique. Nous appelons région uniaxe, d'axe Δ_i , l'ensemble des domaines d'un cristal dont les directions d'aimantation sont parallèles à l'axe Δ_i . L'axe magnétique de chaque région est une des directions de facile aimantation. Ces régions sont elles-mêmes subdivisées en domaines magnétiques limités par des parois de Bloch classiques à 180° et, sous certaines conditions, par des parois plus complexes (parois $k\pi$) [1-2-3].

Ainsi, un tel monocristal cubique est donc formé d'un ensemble de régions uniaxes dont les axes magnétiques Δ_i sont parallèles aux directions $\langle 100 \rangle$ si $K_1 > 0$ et $\langle 111 \rangle$ si $K_1 < 0$ ⁽¹⁾.

II. Détermination des constantes d'anisotropie magnétocristalline. — Nous allons montrer que l'existence

de ces régions à caractère uniaxe peut, sous certaines conditions, entraîner une erreur sur la détermination de K_1 . Nous supposons :

1) Que, au cours de tout refroidissement depuis la température de Curie, le signe de K_1 reste constant de telle sorte que les directions de l'aimantation, stabilisées par anisotropie induite, soient encore des directions stables à basse température.

2) Que l'on fasse intervenir deux termes d'anisotropie induite purement uniaxes, d'ordre 2 et 4, dans l'expression classique de la densité d'énergie magnétocristalline cubique. On a alors ⁽²⁾ :

$$E = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \sum_i v_i(K_{T_1}\sin^2\Phi_i + K_{T_2}\sin^4\Phi_i) \quad (1)$$

α_i et β_i : cosinus directeurs de l'aimantation et de Δ_i rapportés à un trièdre orthonormé fixe, lié au cristal.

K_{T_1}, K_{T_2} : constantes d'énergie volumique d'anisotropie induite.

$\Phi_i = (M_s, \Delta_i)$: angle que font la direction de l'aimantation et le $i^{\text{ème}}$ axe Δ_i d'anisotropie induite du cristal.

v_i : coefficient de pondération tenant compte du volume de chaque région : $\sum_i v_i = 1$.

⁽²⁾ Lorsque l'aimantation reste dans les trois plans principaux $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$, l'expression mathématique classique [5] de la densité d'anisotropie induite : $-F \sum_i \alpha_i^2 \beta_i^2 - G \sum_{i>j} \alpha_i \alpha_j \beta_i \beta_j$ complétée des termes d'ordre supérieur peut se réduire à $K_{T_1} \sin^2 \Phi + K_{T_2} \sin^4 \Phi$.

⁽¹⁾ En ne tenant pas compte du cas encore jamais rencontré où les directions de facile aimantation sont $\langle 111 \rangle$ avec $K_1 > 0$, et $-\infty < K_2 < -9K_1$ [4].

Deux cas sont à considérer :

- 1) Les volumes des différentes régions sont égaux;
- 2) Les volumes des régions sont inégaux.

1. ÉGALITÉ DES VOLUMES DES DIFFÉRENTES RÉGIONS.
— Le tableau I regroupe les différentes expressions du travail réversible à fournir pour aimanter à saturation un cristal de volume unité dans les trois directions cristallographiques principales lorsque $K_1 > 0$ et lorsque $K_1 < 0$, les volumes correspondant à chacun des axes Δ_i étant égaux. Ces équations mettent nettement en évidence que la détermination de K_1 à partir de $E_{\langle 100 \rangle}$, $E_{\langle 110 \rangle}$ et $E_{\langle 111 \rangle}$ peut être très fortement influencée par la présence de K_{T_2} (K_{T_1} n'intervient pas). Suivant la valeur de K_1 par rapport à K_2 et K_{T_2} , le classement par ordre de valeurs décroissantes de $E_{\langle 100 \rangle}$, $E_{\langle 110 \rangle}$, $E_{\langle 111 \rangle}$ change.

Ainsi, quoique K_1 soit positif, l'analyse des courbes d'aimantation conduit à K_1 négatif lorsque :

$$K_1 < \frac{2}{3} K_{T_2} - \frac{4}{9} K_2 \quad \text{si } K_2 > 0$$

ou lorsque $K_1 < \frac{2}{3} K_{T_2}$ si $K_2 < 0$, car ces relations entraînent $E_{\langle 100 \rangle} > E_{\langle 110 \rangle} > E_{\langle 111 \rangle}$. Mais l'obser-

vation de la structure en domaines permet de s'apercevoir que la direction de l'aimantation est bien $\langle 100 \rangle$ et que le cristal est divisé en régions uniaxes. Si, dans un cristal vierge de tout traitement thermomagnétique, on ignore cette division, donc l'existence d'une anisotropie induite, et si la connaissance du cristal se limite à celle des trois courbes d'aimantation, leur interprétation amène à trouver une valeur que l'on croit être celle de K_1 , soit K'_1 , qui s'exprime, pour $K_1 > 0$, en fonction de K_1 et K_{T_2} :

$$K'_1 = K_1 \left(1 - \frac{2}{3} \frac{K_{T_2}}{K_1} \right). \quad (2)$$

De même, lorsque $K_1 < 0$, si $|K_1| < \frac{4}{9} (K_{T_2} + K_2)$ et $|K_1| < \frac{4}{9} K_{T_2}$, on a $E_{\langle 111 \rangle} > E_{\langle 110 \rangle} > E_{\langle 100 \rangle}$ (donc on peut croire K_1 positif) et l'on arrive à la relation (3) analogue à la relation (2) du cas précédent :

$$K'_1 = K_1 \left(1 - \frac{4}{9} \frac{K_{T_2}}{|K_1|} \right). \quad (3)$$

On retrouve évidemment une situation semblable pour les équations des courbes de couple (tableau I),

TABLEAU I

TRAVAIL D'AIMANTATION ET COUPLE DANS UN CRISTAL DONT LES VOLUMES DES RÉGIONS SONT ÉGAUX

$K_1 > 0$, 3 RÉGIONS	$K_1 < 0$, 4 RÉGIONS
$E_{\langle 100 \rangle} = K'_0 = \frac{2}{3} K_{T_1} + \frac{2}{3} K_{T_2}$	$E_{\langle 100 \rangle} = K''_0 = \frac{2}{3} K_{T_1} + \frac{4}{9} K_{T_2}$
$E_{\langle 110 \rangle} = K'_0 + \frac{1}{4} K_1 - \frac{1}{6} K_{T_2}$	$E_{\langle 110 \rangle} = K''_0 + \frac{1}{4} K_1 + \frac{1}{9} K_{T_2}$
$E_{\langle 111 \rangle} = K'_0 + \frac{1}{3} K_1 - \frac{2}{9} K_{T_2} + \frac{1}{27} K_2$	$E_{\langle 111 \rangle} = K''_0 + \frac{1}{3} K_1 + \frac{4}{27} K_{T_2} + \frac{1}{27} K_2$
$L_{\{100\}} = - \left(\frac{1}{2} K_1 - \frac{1}{3} K_{T_2} \right) \sin 4\theta$	$L_{\{100\}} = - \left(\frac{1}{2} K_1 + \frac{2}{9} K_{T_2} \right) \sin 4\theta$
$L_{\{110\}} = - \left(\frac{1}{4} K_1 - \frac{1}{6} K_{T_2} \right) \left(\sin 2\theta + \frac{3}{2} \sin 4\theta \right) + c$	$L_{\{110\}} = - \left(\frac{1}{4} K_1 + \frac{1}{9} K_{T_2} \right) \left(\sin 2\theta + \frac{3}{2} \sin 4\theta \right) + c$
$L_{\{111\}} = 0 - \frac{1}{18} K_2 \sin 6\theta$	$L_{\{111\}} = 0 - \frac{1}{18} K_2 \sin 6\theta$
$c = \frac{K_2}{64} (\sin 2\theta - 4 \sin 4\theta - 3 \sin 6\theta)$	

Le travail $E_{\langle hkl \rangle}$ est égal à la différence des énergies libres correspondant à l'état saturé dans la direction $\langle hkl \rangle$ et à l'état désaimanté. Dans cette expression, nous ne faisons intervenir, à côté de l'anisotropie induite, que l'énergie d'anisotropie magnétocristalline.

$L_{\{hkl\}}$ est l'équation du couple de torsion dans le plan $\{hkl\}$. θ est l'angle que fait la direction d'aimantation avec la projection, sur le plan de mesure d'un des axes Δ_i pris comme référence, soit $[001]$ pour $K_1 > 0$ et $[111]$ pour $K_1 < 0$.

TABLEAU II

TRAVAIL D'AIMANTATION DANS UNE DIRECTION $[hkl]$
DANS LE CAS EXTRÊME OU LE CRISTAL NE CONTIENT QU'UNE RÉGION D'AXE $[100]$ POUR $K_1 > 0$

$$K_1 > 0, \quad \Delta = [100]$$

$$\begin{aligned} E_{[100]} &= 0 \\ E_{[010]} = E_{[001]} &= K_{T_1} + K_{T_2} \\ E_{[110]} = E_{[101]} = E_{[1\bar{1}0]} = E_{[10\bar{1}]} &= \frac{1}{4}K_1 + \frac{1}{2}K_{T_1} + \frac{1}{4}K_{T_2} \\ E_{[011]} = E_{[01\bar{1}]} &= \frac{1}{4}K_1 + K_{T_1} + K_{T_2} \\ E_{[111]} = E_{[\bar{1}11]} = E_{[1\bar{1}1]} = E_{[11\bar{1}]} &= \frac{1}{3}K_1 + \frac{1}{27}K_2 + \frac{2}{3}K_{T_1} + \frac{4}{9}K_{T_2} \end{aligned}$$

dans les trois familles de plans principaux, où l'on reconnaît la même influence de K_{T_2} sur la détermination de K_1 et de son signe.

2. INÉGALITÉ DES VOLUMES DES DIFFÉRENTES RÉGIONS.

— Dans tout ce qui précède, nous avons montré que seul K_{T_2} modifie la valeur apparente de K_1 , mais tout notre développement était basé sur l'égalité des volumes correspondant à chaque axe Δ_i . Si le volume correspondant à l'un des axes devient prépondérant, les égalités du tableau I sont modifiées et le terme en K_{T_1} intervient dans la détermination de K_1 , ainsi le tableau II donne le travail d'aimantation dans une direction $[hkl]$, comme dans le tableau I, mais dans le cas extrême où il n'y a plus qu'une seule région, d'axe $\Delta = [100]$ pour $K_1 > 0$.

Il est clair que, dans le cas de l'inégalité des volumes des différentes régions, on ne peut plus déterminer K_1 et K_2 sans tenir compte de K_{T_1} , K_{T_2} , du volume relatif et de l'orientation des différentes régions d'axes Δ_i . La même remarque vaut aussi pour la détermination de K_1 et K_2 à partir des mesures de couple.

En pratique, l'inégalité des volumes des régions est la règle générale, soit du fait de la division naturelle en domaines dans la zone de température de diffusion, soit du fait du découpage du cristal lors de la préparation de l'échantillon de mesure.

III. Conséquences expérimentales. — On comprend ainsi que la détermination des valeurs de K_1 et K_2 sur des matériaux pouvant présenter de l'anisotropie uniaxiale induite, mais vierges de tout traitement ther-

momagnétique, conduise à des résultats assez dispersés, à des courbes de couple dissymétriques et variables d'une expérience à l'autre. Dans ces matériaux, seule la connaissance des volumes relatifs correspondant à chaque région, de K_{T_1} et de K_{T_2} , permet de déterminer correctement K_1 et K_2 .

Cependant si, avant la mesure, le cristal a été porté au-dessus de sa température de Curie puis, soit trempé, soit refroidi dans un champ tournant dans l'espace, de fréquence convenable, alors l'anisotropie induite n'est plus dirigée, il n'y a plus de région uniaxe et l'on peut déterminer K_1 et K_2 sans tenir compte de K_{T_1} ni de K_{T_2} .

Les cristaux ordonnés du type Pt-Co sont eux aussi subdivisés en régions uniaxes [6], mais dans ce cas les régions proviennent d'une déformation quadratique du réseau cristallin et non de l'existence d'une anisotropie induite. La détermination de K_1 et de K_2 , pour être exacte, doit donc, là aussi, tenir compte du volume des régions.

Conclusion. — Un matériau, pouvant présenter de l'anisotropie induite, est subdivisé, à l'état vierge, en un ensemble de régions magnétiquement uniaxes. Si K_1 est positif, le cristal est composé d'au plus trois régions et si K_1 est négatif, d'au plus quatre, le cas le plus probable étant que les volumes de ces régions ne soient pas égaux.

1) Si l'on suppose que les volumes des régions uniaxes sont égaux entre eux, il est nécessaire, pour rendre compte de l'anisotropie magnétocristalline d'un tel cristal, d'introduire dans l'expression phénoméno-

logique de « E » deux termes d'anisotropie uniaxe supplémentaires. En effet, si l'on néglige ces termes, on interprète de façon erronée les résultats des mesures de couples ou des courbes d'aimantation, l'erreur pouvant aller jusqu'à donner K_1 positif, alors qu'il est négatif (ou inversement) si certaines conditions liant K_1 , K_2 et K_{T_2} sont réalisées.

2) Lorsque, dans le cas général, les régions uniaxes n'ont pas le même volume, il faut tenir compte de la première constante d'anisotropie induite K_{T_1} et pondérer les facteurs de « E » dans (1), pour tenir compte des volumes respectifs de chaque région. Les résultats de mesure sont alors difficilement exploitables de façon simple.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PAULUS (M.), *C. R. Acad. Sci.*, 1957, **245**, 25, 2227-30, et 1960, **250**, 7, 1213-5.
 - [2] SIMONET (W.) et PAULUS (M.), *Phys. Stat. Sol.*, 1967, **22**, 2, K 87-90.
 - [3] PAULUS (M.) et SIMONET (W.), *J. Physique*, 1967, **28** 7-8, 653-60.
 - [4] BOZORTH (R. M.), *Phys. Rev.*, 1936, **50**, 1076.
 - [5] PENOYER (R. F.) et BICKFORD (L. R.), *Phys. Rev.*, 1957, **108**, 2, 271-7.
 - [6] BRISSONNEAU (P.), BLANCHARD (A.) et BARTHOLIN (H.), *I.E.E.E., Mag* 2, 1966, 3, 479-82.
-