



**HAL**  
open science

# TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES ET COMPORTEMENT MAGNETIQUE DES TOLES FERROMAGNETIQUES

Olivier Hubert, Eric Hug, M. Clavel, N Buiron, C Buvat, Florence Ossart, L.  
Hirsinger, R. Billardon

► **To cite this version:**

Olivier Hubert, Eric Hug, M. Clavel, N Buiron, C Buvat, et al.. TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES ET COMPORTEMENT MAGNETIQUE DES TOLES FERROMAGNETIQUES. Colloque National Mecamat, 1999, Aussois, France. hal-02875371

**HAL Id: hal-02875371**

**<https://hal.science/hal-02875371v1>**

Submitted on 19 Jun 2020

**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.

# **TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES ET COMPORTEMENT MAGNETIQUE DES TOLES FERROMAGNETIQUES**

O. HUBERT, E. HUG, M. CLAVEL, N. BUIRON, C. BUVAT, F. OSSART, L. HIRSINGER,  
R. BILLARDON

Centre de recherches de Royallieu  
BP 20529 60206 Compiègne cedex (France)

Laboratoire de Mécanique et Technologie de Cachan  
ENS Cachan / CNRS / Université Paris 6  
61, avenue du président Wilson, 94235 Cachan cedex (France)

## **Introduction**

Les matériaux ferromagnétiques utilisés dans les machines électromagnétiques ont pour but d'amplifier et de canaliser le flux généré par le courant électrique. La qualité du transfert électromagnétique et donc le rendement effectif de la machine sont fonction d'un grand nombre de paramètres, dont les propriétés physiques inhérentes aux matériaux employés ainsi que les technologies d'élaboration, de transformation, de mise en forme et d'assemblage des pièces. Nous discutons ici de quelques aspects des interactions entre procédés de fabrication et propriétés magnétiques des solides ferromagnétiques, en particulier des problèmes de texture et de découpe des alliages fer-silicium [1]. Nous débutons par un exposé général sur les machines électriques utilisant des alliages fer-silicium et la mise en oeuvre de ces alliages. Nous nous intéressons ensuite à l'influence de la texture développée lors de l'élaboration sur le comportement de deux alliages à 3% de Si, l'un à grain orienté (GO), utilisé dans les transformateurs de puissance, l'autre à grains non orientés (NO) utilisé dans les machines tournantes. Nous introduisons à ce propos un modèle de comportement magnétique multiéchelle récemment développé au LMT-Cachan. L'aspect mise en forme par poinçonnage des tôles est abordé dans une troisième partie.

## **1 Constitution d'une machine électrique. Etude des alliages fer-silicium [2-3]**

Une machine électrique représente un système électromagnétique qui se compose de circuits magnétiques et électriques interdépendants. Le circuit magnétique nécessite l'utilisation de matériaux magnétiques afin d'améliorer le couplage magnétique entre les enroulements. Celui-ci consiste en un empilement des tôles isolées électriquement les unes des autres (épaisseur de 0,2 à 1 mm) afin de minimiser les pertes par courants de Foucault. Elles sont généralement poinçonnées à partir de bandes en rouleaux puis assemblées les unes aux autres par serrage, rivetage ou soudage. Leur forme, relativement simple pour les transformateurs se complique rapidement dans les machines tournantes où le bobinage est placé dans les encoches spécialement usinées à cet effet.

La puissance d'une machine électrique dépend de la capacité du matériau à véhiculer un flux magnétique important dans un volume limité. Seuls les matériaux ferromagnétiques doux remplissent cette condition. Un matériau ferromagnétique standard est un alliage polycristallin dont chaque grain est subdivisé en domaines magnétiques à l'intérieur desquels l'aimantation est uniforme et égale à l'aimantation à saturation. L'application d'un champ extérieur provoque un réarrangement des domaines et l'apparition d'une aimantation macroscopique importante. Le matériau ferromagnétique idéal doit alors posséder une aimantation à saturation maximale, une perméabilité magnétique élevée ainsi qu'un champ coercitif le plus faible possible. La matrice métallique doit dans ces conditions comporter un minimum de défauts cristallographiques. Le cycle d'hystérésis d'un tel matériau est étroit, les pertes d'énergie magnétiques, proportionnelles à l'aire de ce cycle, sont alors minimales. Le matériau constitutif des tôles doit par ailleurs être adapté aux techniques classiques de découpe et d'assemblage. La texture du matériau ferromagnétique idéal dépend de son utilisation. Un transformateur est parcouru par un champ de direction constante le long du circuit magnétique. On cherche alors à avoir une direction cristallographique de facile aimantation dans cette direction. Dans le cas d'un moteur ou d'un générateur, le flux est tournant. Seuls le bord extérieur du stator ou encore les dents du rotor sont parcourus par un flux dont la direction est relativement constante. On préférera dans ces conditions utiliser un matériau dont le comportement magnétique est isotrope dans le plan.

## **2 Caractéristiques de deux alliages Fe-3%Si et effet de la texture sur leur comportement magnétique**

Les matériaux industriels utilisés pour leurs propriétés ferromagnétiques ont une composition qui combine un ou plusieurs des métaux ferromagnétiques (Fe, Ni, Co, lanthanides) avec un ou plusieurs éléments d'alliage non ferromagnétiques. Le succès des alliages fer-silicium tient, outre leur coût réduit, aux modifications suivantes du comportement physique du fer liées à l'apport de silicium [4]: l'augmentation de la résistivité électrique, la diminution de la constante d'anisotropie magnétocristalline, ainsi qu'une réduction de la constante magnétostrictive. Le comportement magnétique est amélioré et le bruit machine diminue. Le silicium diminue cependant l'aimantation à saturation du matériau et le fragilise pour une concentration supérieure à 4%. Le domaine d'application d'une tôle de fer-silicium dépend également de la texture développée au cours de son élaboration. On distingue les alliages à grains orientés ou GO et à grains non-orientés ou NO. L'objet de cette partie est de présenter le comportement magnétique obtenu à partir de mesures expérimentales réalisées sur deux de ces alliages ainsi que les résultats d'un modèle multi-échelle, introduit ci-après.

## 2.1 Caractéristiques générales des tôles orientées et non orientées

Les tôles de fer-silicium GO sont produites avec une teneur en silicium d'environ 3%. Le procédé de fabrication employé comprend une succession de laminages à chaud puis à froid entrecoupés de traitements thermiques adaptés [5]. Le traitement final consiste en une recristallisation secondaire qui provoque une croissance préférentielle des grains orientés selon la texture  $\{110\}\langle 001\rangle$  ou texture de Goss [3] générant d'excellentes propriétés magnétiques dans cette direction. L'alliage que nous étudions est un alliage Fe-3%Si GO de 0,23 mm d'épaisseur. La figure 1a donne un aperçu de la structure granulaire. Les grains sont de taille importante (diamètre moyen de l'ordre du millimètre). La technique des figures de Bitter permet de faire apparaître les domaines magnétiques (figure 1b). Il s'agit pour l'essentiel de domaines principaux séparés par des parois à  $180^\circ$  [3, 6]. Une minorité de grains dont l'orientation s'écarte de la texture idéale présentent de nombreuses lancettes. La figure 1c montre les résultats d'une analyse de texture par EBSD de l'alliage où l'orientation de Goss apparaît très clairement.

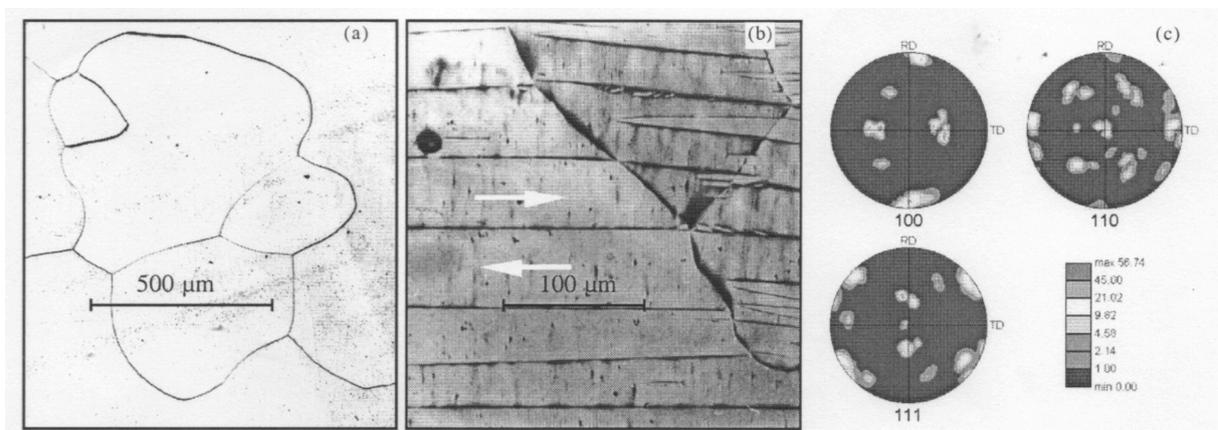


Figure 1: Fe-3%Si GO (a) structure granulaire, (b) domaines magnétiques, (c) figures de pôles.

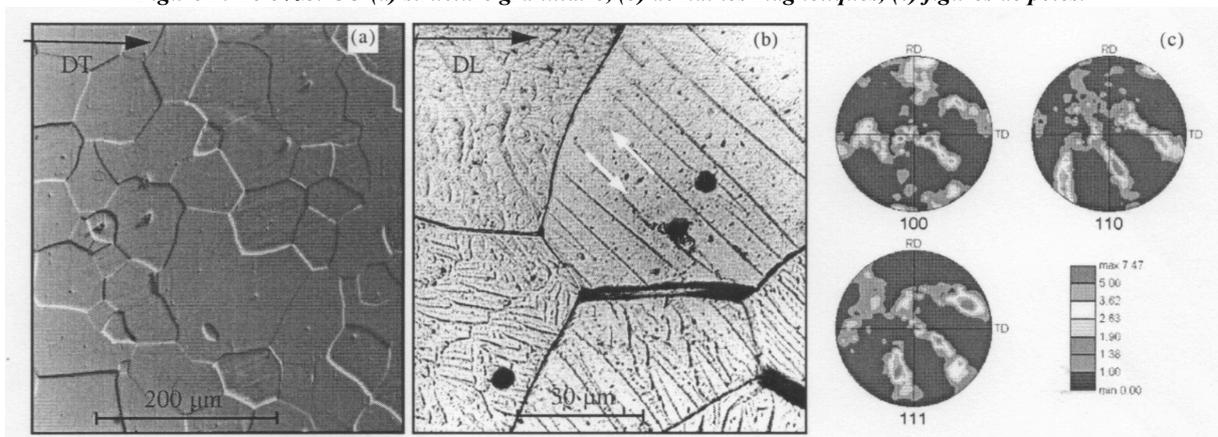


Figure 2: Fe-3%Si NO (a) structure granulaire, (b) domaines magnétiques, (c) figures de pôles.

Il existe deux familles d'alliages fer-silicium NO, issues d'une coulée identique à l'origine. Les tôles de fer-silicium à grains non orientés dites "semi-process" sont livrées à l'état semi-fini (brut de laminage à froid). Le traitement de recuit de recristallisation, nécessaire pour obtenir les propriétés magnétiques, est effectué après la mise en forme de la pièce. Les tôles de fer-silicium à grains non orientés dites "fully-process" ont subi un recuit final de

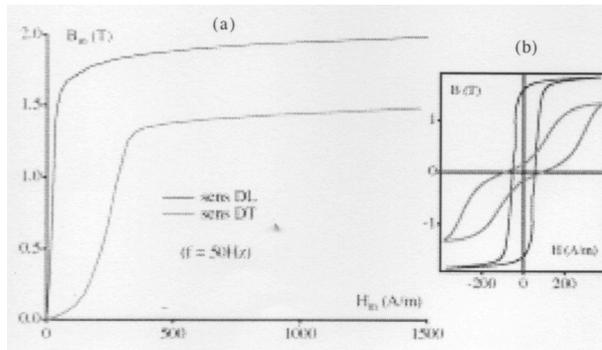
recristallisation après laminage à froid. Cette tôle possède toutes ses caractéristiques magnétiques à l'état de livraison par le sidérurgiste. L'alliage d'étude est un Fe-3%Si NO fully-process. La structure granulaire équiaxe de l'alliage est présentée figure 2a. La dimension des grains est assez hétérogène autour d'un diamètre moyen égale à 75  $\mu\text{m}$ . La figure 2b présente une visualisation des domaines par la technique de Bitter. Peu de grains sont idéalement orientés pour l'observation. Quelques domaines bien alignés, séparés par des parois à 180° sont observables dans un des grains. L'analyse de texture par EBSD pratiquée (figure 2c) confirme l'orientation très aléatoire des grains [7].

## 2.2 Présentation du modèle multiéchelle et simulation des textures

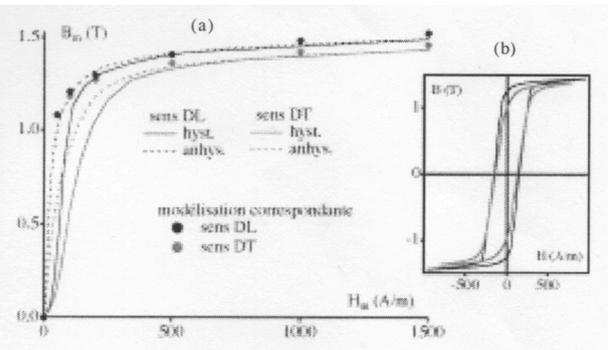
Un modèle de comportement magnéto-mécanique multiéchelle est en cours de développement au LMT-Cachan [8-9]. Il permet d'établir le lien entre le comportement magnétique de monocristaux d'orientation quelconque et le comportement du polycristal. Dans un monocristal l'énergie interne peut s'écrire au niveau de chaque domaine magnétique sous une forme faisant intervenir des termes d'énergie d'anisotropie  $(W_{an})_{\alpha}$ , magnétostatique  $(W_d)_{\alpha}$  et magnéto-mécanique  $(W_{\sigma})_{\alpha}$  :

$$E_{\alpha} = (W_{an})_{\alpha} + (W_d)_{\alpha} + (W_{\sigma})_{\alpha} - \mu_0 \vec{H} \cdot \vec{m}_{\alpha}$$

Dans ce modèle, la structure en domaines magnétiques est décrite de façon statistique en termes de directions d'aimantations et de fractions volumiques associées à partir de l'expression de l'énergie interne  $E_{\alpha}$  dans chaque domaine magnétique du monocristal. Nous utilisons une fonction de distribution des orientations cristallines (angles d'Euler) directement issues des mesures EBSD. Ces orientations sont utilisées pour estimer la structure en domaines magnétiques dans chaque grain du polycristal, et permettent d'obtenir les valeurs globales de l'aimantation et de la déformation de magnétostriction. Pour la déformation, une homogénéisation mécanique est effectuée à l'aide d'un code de calcul par éléments finis. La présence de la texture cristallographique entraîne une anisotropie du comportement magnétique et de la déformation de magnétostriction. Les courbes d'aimantation obtenues sont de type anhystérétique, ne tenant pas compte des défauts de structure [10-11].



**Figures 3: Fe-3%Si GO (a) courbes d'aimantation (b) cycles d'hystérésis caractéristiques, sens DL et DT.**



**Figure 4: Fe-3%Si NO (a) courbes d'aimantation et anhystérétique (b) cycles d'hystérésis caractéristiques, sens DL et DT**

Les mesures magnétiques ont été réalisées dans différentes directions du plan de tôle à l'aide d'un banc expérimental [7]. Les figures 3 et 4 fournissent un aperçu des effets de la texture cristallographique sur le comportement magnétique. La figure 3a montre les courbes d'aimantation du Fe-3%Si GO dans la direction du laminage (DL) et la direction perpendiculaire au laminage (DT). La figure 3b, qui fournit deux cycles d'hystérésis à 50Hz dans les deux directions, met en lumière le très important effet de texture qui caractérise ce matériau (différence d'induction atteinte, de champ coercitif, etc.). Les figures 4a et 4b montrent l'existence d'une faible anisotropie magnétique pour le matériau NO. Les courbes anhystérétiques ont également été obtenues, indiquant les mêmes tendances [12]. Elles sont comparées aux résultats du modèle. Celui-ci génère une anisotropie comparable à celle issue de l'expérience. Les différences observées, qui limitent actuellement l'acuité du modèle, sont probablement liées au surplus d'énergie magnétostatique engendrée par les joints de grains et la surface libre. Ce phénomène est particulièrement important pour les alliages GO ce qui nous empêche de pouvoir réaliser une modélisation correcte.

## 3. Mise en forme et comportement magnétique des tôles Fe-3%Si NO

La mise en forme des tôles magnétiques se fait avec les procédés classiques employés pour les tôles minces : découpage par cisailage ou laser, emboutissage, refendage, poinçonnage. Chacune de ces opérations crée au

voisinage des bords de découpe une zone plastifiée. Comme tout défaut métallurgique affecte les propriétés magnétiques [3], la déformation engendrée en bord de découpe, généralement importante mais localisée, est susceptible de dégrader le comportement magnétique du produit assemblé. Cet effet est en particulier une des raisons pour laquelle les pertes de puissance mesurées dans les machines électriques sont supérieures aux pertes prévues par les modèles actuels, utilisant un paramètre matériau rudimentaire, et ne tenant pas compte des effets mécaniques [13].

Dans des travaux précédents [14] portant sur l'alliage Fe-3%Si NO, nous avons établi une relation empirique entre la microdureté Vickers et le taux de déformation plastique en traction uniaxiale. La dureté de la matrice évolue avec la déformation plastique équivalente (au sens de Von Mises) suivant une loi de puissance classique. En mesurant la dureté en bord de découpe d'une tôle, il est alors possible de à l'allure du profil de déformation plastique équivalente (figure 5). La zone déformée plastiquement n'excède pas 1 mm de profondeur. La déformation est extrêmement forte au voisinage du bord de découpe et décroît de façon exponentielle. En réalité, la majeure partie du volume affecté (80%) subit une déformation plastique équivalente inférieure à 0,02 [14].

La figure 6 montre l'évolution de la courbe d'aimantation du Fe-3%Si NO avec le taux de déformation plastique. On observe une très importante dégradation du comportement magnétique et ceci dès les très faibles niveaux de déformation. Ce phénomène affecte toutes les caractéristiques magnétiques [15]. Lors d'une découpe, la zone dont les propriétés magnétiques sont affectées va alors probablement bien au delà des parties fortement déformées. Les mesures de microdureté ne nous fournissent cependant qu'une description imprécise (particulièrement en ce qui concerne l'étendue de la zone faiblement déformée) et scalaire de l'état de déformation. Or, des travaux récents ont pu montrer que la déformation plastique de l'alliage s'accompagne de la génération d'importantes contraintes internes [16] qui modifient de façon anisotrope le comportement magnétique [17]. L'évolution du comportement magnétique peut même être dans une certaine mesure reliée à l'évolution des contraintes internes, et dans une moindre mesure à l'écroutissage à caractère scalaire [7].

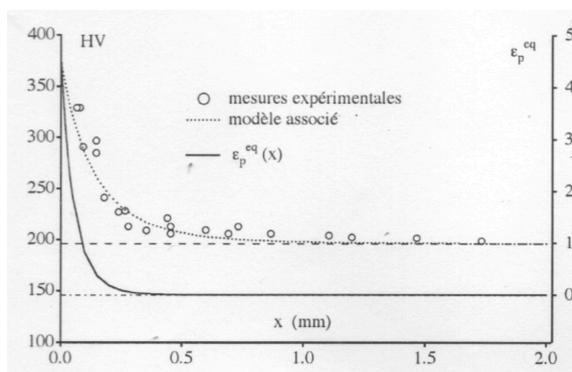


Figure 5: évolution corrélée de la dureté et de la déformation plastique en bord de découpe

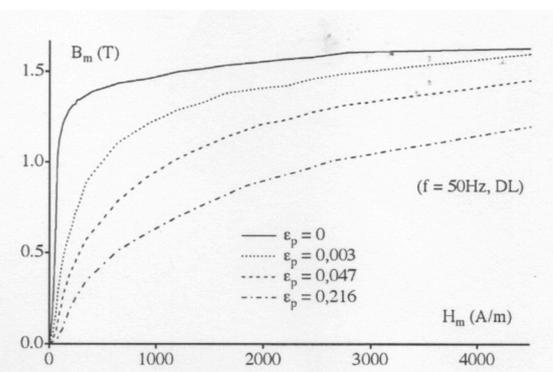


Figure 6: influence d'une déformation plastique en traction sur la courbe d'aimantation (Fe-3%Si NO, sens DL)

## Conclusions

En conclusion, cet exposé rappelle que les propriétés d'usage des matériaux ferromagnétiques doux dépendent non seulement de leur procédés d'élaboration mais également des procédés de mise en oeuvre. En résumé, les propriétés magnétiques sont fortement dépendantes non seulement de la texture initiale du matériau mais aussi des déformations élastiques induites par les procédés d'assemblage des tôles [11] et des écroutissages induits par les procédés de mise en forme et de découpe.

Les modèles multiéchelle ou phénoménologique à variables internes développés au LMT-Cachan constituent deux démarches visant à modéliser ces phénomènes.

## Bibliographie

- [1] P. Brissonneau, Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique, ed. Hermes, Paris, 1997
- [2] J. Degauque, Mem. et Et. Scien. Rev. Métal., vol. 1 (1985), 5.
- [3] B.D. Cullity, Introduction to magnetic materials, ed. Addison-Wesley, N.Y., 1972.
- [4] R.M. Bozorth, Ferromagnetism, ed. D. Van Nostrand Company, N.Y., 1951.
- [5] G. Couderchon, Tôles et alliages magnétiques doux, Techniques de l'Ingénieur, E1750-1.
- [6] E. Hug, J. of Mat. Science, vol.30 (1995), 4417.

- [7] O. Hubert, Influence des contraintes internes et de la structure des dislocations sur les couplages magnétomécaniques dans les alliages Fe-3%Si à grains non orientés, Thèse de doctorat, UTC, 1998.
- [8] N. Buiron, L. Hirsinger and R. Billardon, J. of Magn. and Magn. Mat., vol.196-197 (1999), 868
- [9] N. Buiron, L. Hirsinger, R. Billardon, J. Phys IV France, vol. 09 (1999), 187.
- [10] D.C. Jiles, Introduction to magnetism and magnetic materials, ed. Chapman and Hall, London, 1991.
- [11] C. Gourdin, L. Hirsinger, G. Barbier and R. Billardon, J. of Magn. and Magn. Mat., vol. 1, (1998), 201.
- [12] O. Hubert, L. Hirsinger and E. Hug, J. of Magn. and Magn. Mat., vol. 196-197 (1999), 322.
- [13] E. Hug, F. Dumas, J.M. Biedinger and M. Clavel, Rev. Mét. - CIT/Science et génie des matériaux, (1994) 1857.
- [14] O. Hubert and E. Hug, Mat. Scien. and Tech., vol. 11 (1995), 482.
- [15] E. Hug, O. Hubert and M. Clavel, IEEE Trans. Mag., vol. 1 (1997), 763.
- [16] E. Hug, O. Hubert and M. Clavel., J. Appl. Phys., vol. 8 (1996), 4571.
- [17] O. Hubert, M. Clavel, I. Guillot and E. Hug, J. Phys IV France, vol. 09 (1999) 207.