



HAL
open science

Dispositif de mesure du comportement magnéto-mécanique d'un alliage de fer-silicium sous chargement mécanique multiaxial

Mahmoud Rekik, Olivier Hubert, Laurent Daniel, Bumediene Raka, Pierre Mella, Patrick Aïmedieu

► **To cite this version:**

Mahmoud Rekik, Olivier Hubert, Laurent Daniel, Bumediene Raka, Pierre Mella, et al.. Dispositif de mesure du comportement magnéto-mécanique d'un alliage de fer-silicium sous chargement mécanique multiaxial. 21e Congrès Français de Mécanique 2013, AFM, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-01552415

HAL Id: hal-01552415

<https://hal.science/hal-01552415>

Submitted on 2 Jul 2017

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.

Dispositif de mesure du comportement magnéto-mécanique d'un alliage de fer-silicium sous chargement mécanique multiaxial

M. REKIK^{a,b}, O. HUBERT^a, L. DANIEL^{b,c}, B. RAKA^a, P. MELLA^a, P. AIMEDIEU^a

a. LMT-Cachan, ENS Cachan, CNRS (UMR8535), UPMC, PRES Universud Paris,
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France

b. LGEP, SUPELEC, CNRS (UMR8507), UPMC, Univ Paris-Sud,
11 rue Joliot-Curie, 91192 Gif sur Yvette, France

c. School of Materials, University of Manchester, M1 7HS, Manchester, UK

Résumé :

Les travaux de recherche discutés dans cette communication concernent la conception des générateurs de puissance électrique pour l'aéronautique. L'augmentation de la puissance massique de ces équipements passe par une augmentation des vitesses de rotation, donc une augmentation des contraintes. Un premier point est de s'assurer de la bonne tenue mécanique des matériaux. Un deuxième point est de pouvoir prendre en compte les modifications du comportement magnétique (et donc in fine du couple) lorsqu'ils sont soumis à un état de contraintes multiaxial. L'étude présentée vise en particulier à illustrer l'influence d'états de contrainte biaxiaux sur le comportement magnétique des matériaux constitutifs du rotor. Des essais non conventionnels sont effectués sur des échantillons en forme de croix de manière à s'approcher des contraintes réellement subies par le rotor. Les essais sont effectués sur la machine d'essai triaxiale ASTRÉE du LMT-Cachan. L'état de contraintes est estimé par corrélation d'images et par diffraction des rayons X. Des mesures magnétiques anhystériques et de pertes d'énergie sous contraintes sont reportées.

Abstract :

The research presented in this paper is motivated by the design of rotors for high speed rotating machines. The increased power density of these devices requires a higher rotation speed, leading to higher levels of centrifugal forces and stress in the rotor. A first point is to ensure good mechanical strength of the materials. A second point is to take into account changes in the magnetic behavior (and ultimately torque) when they are subjected to a multiaxial stress state. Non conventional experiments are performed on cross-shaped samples in order to apply biaxial stress representative of the loadings experienced by rotors of rotating machines. These experiments are performed on a multiaxial testing machine, ASTRÉE. Stress level is estimated thanks to digital image correlation and X-rays diffraction. Both anhysteretic and dissipative magnetic responses to magneto-mechanical loadings have been recorded.

Mots clefs : Contrainte biaxiale, corrélation d'images numériques, diffraction des rayons X, magnéto-élasticité, susceptibilité magnétique, pertes, fer-silicium NO

1 Introduction

Les parties électrotechniques d'un avion représentent environ 35 % de la masse des équipements de la chaîne de puissance électrique. Par ailleurs, la puissance électrique que doit délivrer un aéronef de nouvelle génération est multipliée par 4 par rapport à un aéronef conventionnel. Cela induit un accroissement exponentiel du nombre d'équipements électriques, de leur masse globale et de leur encombrement. Pour atteindre les objectifs de réduction de masse, il est impératif de trouver un ensemble de

solutions cohérentes permettant d'optimiser les systèmes électriques embarqués. Une solution consiste à augmenter la puissance massique de ces équipements par une augmentation des vitesses de rotation, donc une augmentation des contraintes [1]. Cette contribution vient s'ajouter à d'autres contraintes telles que celles héritées des processus d'élaboration de la tôle et/ou de la phase d'assemblage (découpe, soudage, ...).

Nous présentons ici une étude expérimentale de l'effet d'un état de contraintes biaxial (représentatif des sollicitations liées aux forces d'inertie) sur le comportement magnétique d'un alliage de fer-silicium à grains non orientés.

2 Dispositif expérimental

La caractérisation du comportement magnéto-mécanique est souvent limitée au cas de sollicitations uniaxiales [2, 3]. Les chargements magnéto-mécaniques biaxiaux peuvent fournir une meilleure compréhension des couplages magnéto-élastiques, mais très peu sont rapportés dans la littérature [4-12].

Le matériau magnétique étudié est un alliage de fer-silicium à grains non orientés $Fe - 3\%Si$ (NO) fourni par Arcelormittal, livré en tôles de 0,5 mm d'épaisseur. Il s'agit d'un matériau standard pour les machines tournantes.

La machine d'essais triaxiale ASTRÉE a été utilisée pour notre étude (figure 1a). Seuls les vérins du plan horizontal sont utilisés pour l'application des efforts. Les quatre vérins sont pilotés de manière à imposer une différence d'effort nulle entre les deux vérins d'une même direction et un déplacement nul du point central.

L'idée de base des essais biaxiaux est d'effectuer une mesure du comportement magnétique sur un échantillon chargé en traction-compression selon deux directions perpendiculaires. A cet effet, un échantillon en forme de croix a été conçu (figure 1b). Réaliser, une compression homogène sur une éprouvette de 0,5 mm d'épaisseur est un exercice difficile. Ceci peut être réalisé grâce à une âme de plus forte épaisseur rapportée à l'échantillon (figure 3a). Une âme en Bakélite a été choisie : ce matériau est amagnétique et non conducteur ce qui est indispensable pour éviter toute interférence avec les mesures magnétiques.

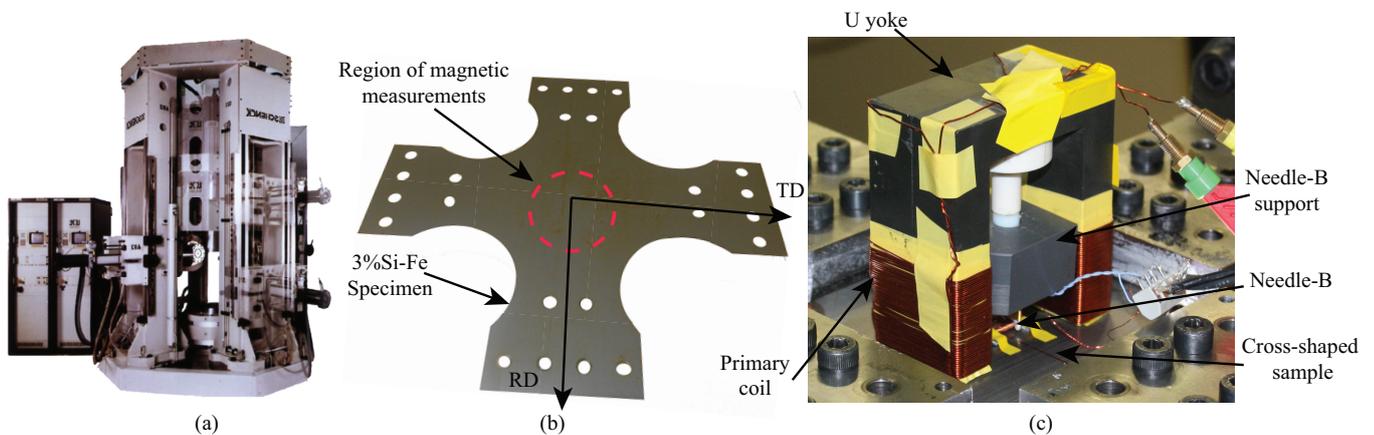


FIGURE 1 – Principe de mesure sous chargement biaxial : (a) Machine triaxiale ASTRÉE ; (b) Géométrie de l'échantillon ; (c) Culasse bobinée en U et capteurs B-pointes.

Le tenseur des contraintes σ est diagonal au centre de l'échantillon. Les composantes (σ_1, σ_2) sont calculées à partir des forces appliquées sur les deux axes de chargement (F_1, F_2) par l'intermédiaire d'une matrice de couplage (non-diagonale) \mathbb{K} ($\sigma = \mathbb{K} \cdot \mathbf{F}$). Les termes de la matrice ont été calculés grâce à une modélisation par éléments finis de l'échantillon.

Dans ce calcul on suppose que l'éprouvette est parfaitement collée, c'est-à-dire que les nœuds appartenant à l'interface entre les matériaux sont supposés confondus.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5, 1.10^{-2} & -4, 3.10^{-4} \\ -4, 3.10^{-4} & 5, 1.10^{-2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Les coefficients de couplage k_{ij} s'expriment en mm^{-2} .

La zone de mesure magnétique est un cercle de 30 mm de diamètre où à la fois la contrainte et le champ magnétique sont assez uniformes (niveau d'hétérogénéité inférieur à 15% [10]). L'homogénéité du champ magnétique a été vérifiée pour la même géométrie dans une étude précédente [12]. Le chargement magnétique est appliqué à l'aide d'une culasse bobinée en U. Le champ magnétique et l'aimantation sont mesurés grâce à une bobine de mesure de champ calibrée (H-coil) et des capteurs B-pointes (voir référence [11] pour plus de détails). La figure 1c est une vue rapprochée de l'échantillon et du dispositif de mesure magnétique placé entre les mors d'ASTRÉE.

La mesure magnétique inclut des courbes anhystériques et des cycles d'hystérésis. Les courbes anhystériques sont construites point par point en appliquant au matériau un champ magnétique alternatif d'amplitude décroissante superposé à un champ magnétique continu. Le matériau est désaimanté après chaque mesure pour éliminer toute influence de l'histoire de chargement dans la mesure.

La mesure des cycles d'hystérésis a été effectuée à différentes fréquences $\{f\}=\{1, 5, 10, 50, 100, 200, 400, 800\}$ Hz. Une forme triangulaire du courant $i(t)$ a été utilisée. L'évolution correspondante du champ magnétique mesuré $H(t)$ est tracée sur la figure 2a et l'induction magnétique $B(t)$ sur la figure 2b. Le champ magnétique est légèrement déformé mais reste approximativement triangulaire tandis que l'induction magnétique est fortement déformée en raison de la non linéarité du comportement magnétique.

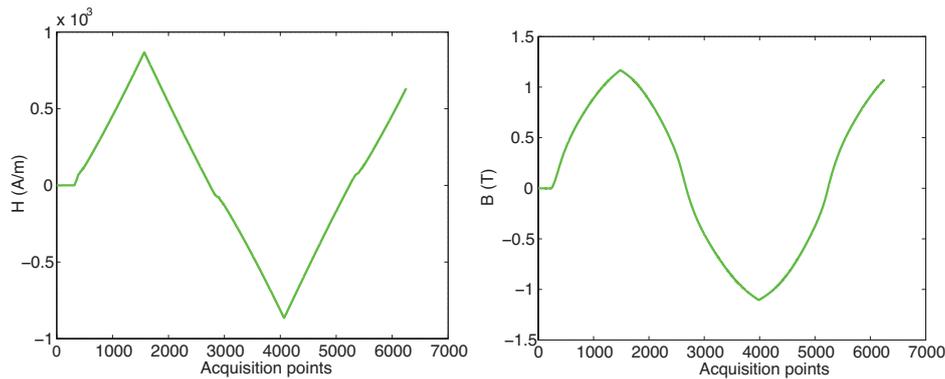


FIGURE 2 – (a) Champ magnétique ; (b) Induction magnétique en fonction du temps.

La procédure de mesure est appliquée pour un état de contraintes (σ_1, σ_2) . Le champ magnétique est appliqué dans la direction parallèle à l'axe 1. 41 chargements biaxiaux ont été testés, pour un niveau de contrainte variant de -100 MPa à +100 MPa.

3 Procédure de validation du chargement multiaxial

3.1 Mesures par la technique de corrélation d'images

L'attention est portée sur la validation du montage, notamment sur le plan de l'homogénéité des champs de déplacements obtenus. Nous utilisons tout d'abord la technique de mesure par corrélation d'images numérique (CIN) sur la Bakélite. La figure 3 présente l'appareillage utilisé pour la CIN.

La région d'étude appelée classiquement ROI (Region Of Interest) a une dimension S fixée à 1230×1230 pixels², la résolution de l'image g est estimée à 0,0358 mm/px, ce qui donne une résolution spatiale $S \times g$ de 44×44 mm². L'imagette ou "Zone Of Interest (ZOI)" a une taille de 64 pixels pour les cartes de déplacements et 128 pixels pour les cartes de déformations. En augmentant la taille des ZOI on réduit considérablement l'incertitude sur les mesures [13]. La figure 4 illustre l'homogénéité du champ de déplacement suivant les deux directions de chargement pour un cas de btraction ($\sigma_1 = \sigma_2 = 100$ MPa).

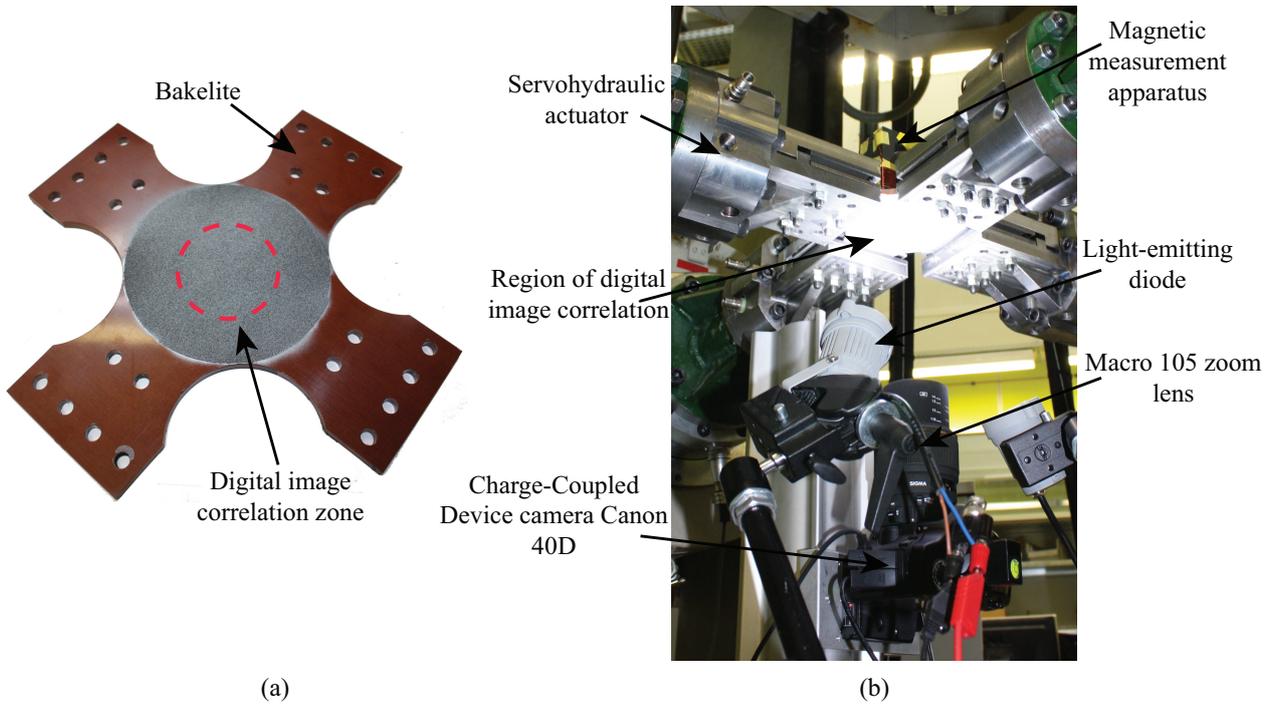


FIGURE 3 – (a) Matériau de l’âme : la Bakélite présentée ici avec le mouchetis utilisé pour la technique de corrélation d’images numériques ; (b) Position des caméras pendant les essais mécaniques.

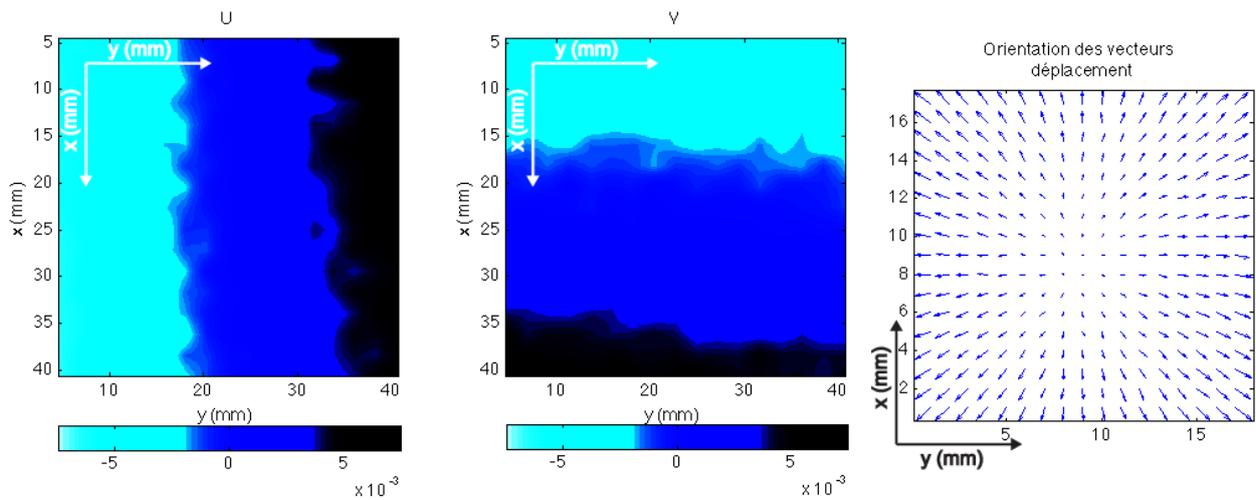


FIGURE 4 – Champs de déplacement (avec soustraction des mouvements de corps rigide) calculés par CORRELI^{Q4} : Champs de déplacements horizontaux (a) et verticaux (b) ; (c) Vecteurs champ de déplacement associés.

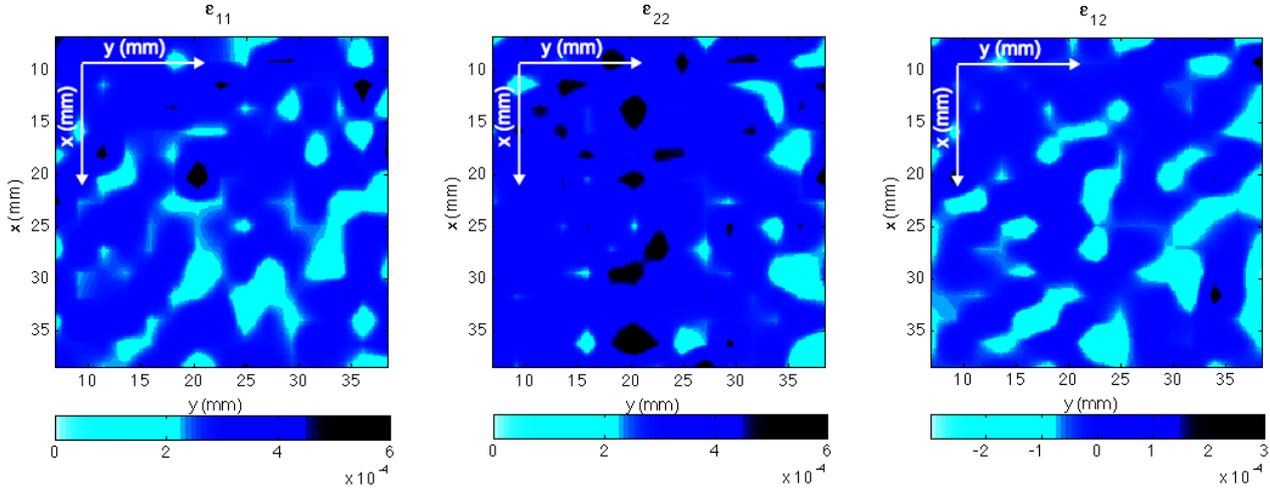
On observe que le déplacement maximal suivant les deux directions de chargement 1 et 2 ne dépasse pas $\pm 7,5 \mu\text{m}$. Les champs de déformation correspondants sont présentés sur la figure 5. La déformation est homogène sur la zone. On trouve pour cet exemple les valeurs de déformations regroupées table1 :

Les contraintes σ_1 et σ_2 peuvent être déterminées à partir des déformations expérimentales en supposant que le matériau a un comportement élastique, homogène et isotrope (Eq. 2). Cela revient à négliger notamment la contribution de la déformation de magnétostriction [14].

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} \tag{2}$$

	ε_{ij}^{min}	ε_{ij}^{max}	Écart-type
ε_{11}	$1.30 e^{-4}$	$4.84 e^{-4}$	$9.9 e^{-5}$
ε_{22}	$1.66 e^{-4}$	$5.13 e^{-4}$	$9.8 e^{-5}$
ε_{12}	$-1.86 e^{-4}$	$1.52 e^{-4}$	$9.4 e^{-5}$

TABLE 1 – Valeurs expérimentales des déformations obtenues par CIN.

FIGURE 5 – Champs de déformations calculés par CORRELI^{Q4} : (a) ε_{11} ; (b) ε_{22} et (c) ε_{12} .

λ et μ sont les coefficients de Lamé du matériau.

Dans la zone de mesure considérée on trouve $\varepsilon_{11} = 2,81 e^{-4}$ et $\varepsilon_{22} = 3,35 e^{-4}$. Les constantes élastiques de l'échantillon (module d'Young $E = 193$ GPa ; coefficient de Poisson $\nu = 0,27$), permettent d'accéder aux états de contrainte dans la direction longitudinale $\sigma_1 = 98 \pm 33$ MPa et la contrainte dans la direction transversale $\sigma_2 = 106 \pm 32$ MPa. Cette comparaison quantitative valide les hypothèses adoptées pour nos essais magnéto-mécaniques biaxiaux. Les résultats pour d'autres états de chargement sont en accord avec les contraintes estimées par calcul.

La différence entre contrainte calculée et contrainte mesurée peut être due aux conditions environnementales de l'essai, qui ne sont pas toujours maîtrisées [15]. Parmi les points clés, on peut citer :

- Les vibrations : la présence des vibrations dues au système hydraulique peut générer des mouvements des caméras (solidarisées avec le bâti de la machine) qui se traduiront par un flou dans les images.
- La température : un équipement de corrélation est composé d'une caméra reliée à la machine à l'aide d'un support mécanique. Une élévation de température pendant un essai induira une dilatation du support qui conduira à une modification des paramètres extrinsèques calculés lors du calibrage.
- La lumière extérieure : dans l'algorithme de corrélation d'images, on fait l'hypothèse que la modification des images entre deux états de l'objet n'est liée qu'aux déplacements. Toute variation d'éclairage de la surface pendant l'essai peut être génératrice d'erreurs de mesure.

3.2 Méthode de mesure par diffraction des rayons X (DRX)

Une étude a été réalisée dans le cadre de notre travail pour examiner l'évolution du niveau de contraintes déterminé par DRX sur le même échantillon, sous l'effet du chargement biaxial imposé (figure 6).

Nous disposons d'un appareil de diffraction des rayons X in-situ qui présente l'originalité de permettre une identification des phases et de mesurer simultanément la déformation élastique multiaxiale en un point de la surface. Ce système peut en outre être solidarisé au vérin supérieur de la machine ASTRÉE. Seul le mode mesure de déformation est employé pour ce qui nous concerne. L'ensemble illustré figure 6b est composé d'un berceau goniométrique portant la source de rayons X (source Chrome) et un détecteur linéaire (mesure du pic $\{211\}$). La position du vecteur diffraction (normale \vec{n} au plan de

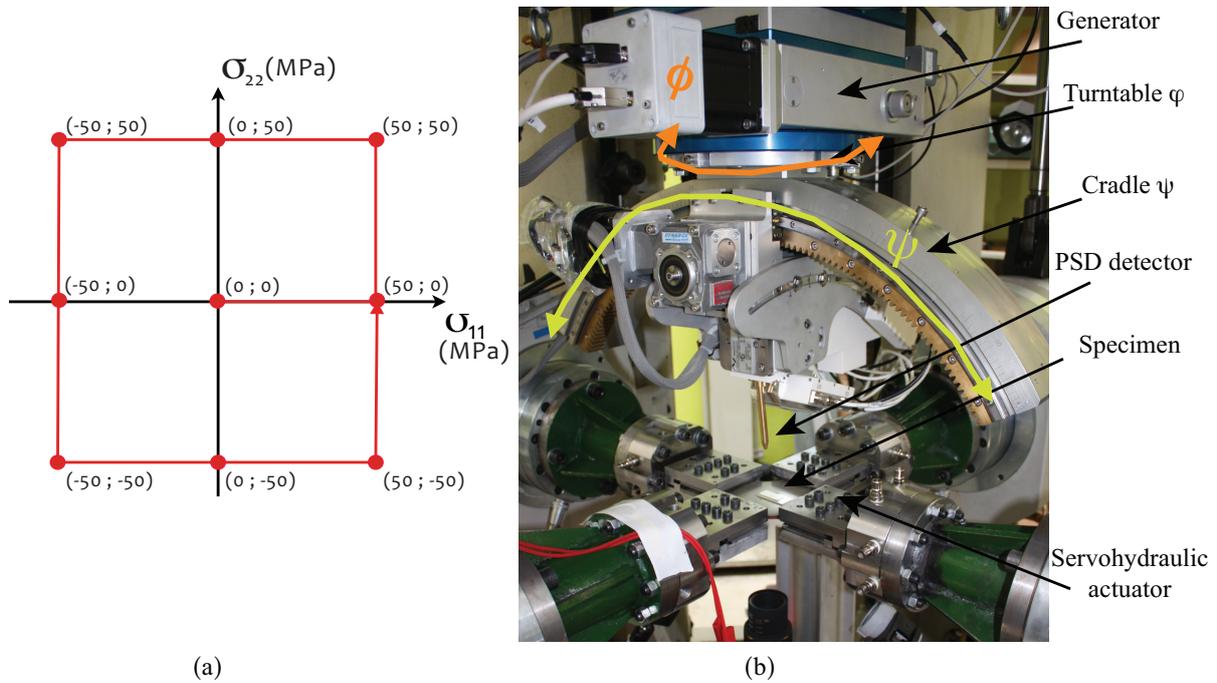


FIGURE 6 – (a) Points de mesure par rayons X dans le plan des contraintes; (b) Vue d'ensemble du dispositif de diffraction par rayons X et ASTRÉE.

diffraction) est définie par deux angles macroscopiques : l'angle ψ défini par la position de l'ensemble source-captur sur le berceau et l'angle ϕ repérant la position du plan du berceau autour de l'axe vertical de la machine. La distance entre le plan du vérin supérieur et le plan de l'éprouvette est asservie de manière à maintenir la tache focale au centre du cercle goniométrique.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \cos\phi \sin\psi \\ \sin\phi \sin\psi \\ \cos\psi \end{pmatrix} \quad (3)$$

Le principe est le suivant : toute déformation du réseau conduit à une modification de la distance interréticulaire Δd et donc de l'angle de Bragg correspondant mesuré par le détecteur linéaire.

La mesure, réalisée point par point, permet la construction d'un champ de déformation élastique. À partir de certaines hypothèses sur les constantes d'élasticité (milieu isotrope, du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν) on remonte à un champ de contrainte plane tel que :

$$\frac{\Delta d}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \sin\psi^2 (\sigma_\phi + \sin 2\phi \cdot \sigma_{12}) - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{avec} \quad \sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2\phi + \sigma_{22} \sin^2\phi \quad (4)$$

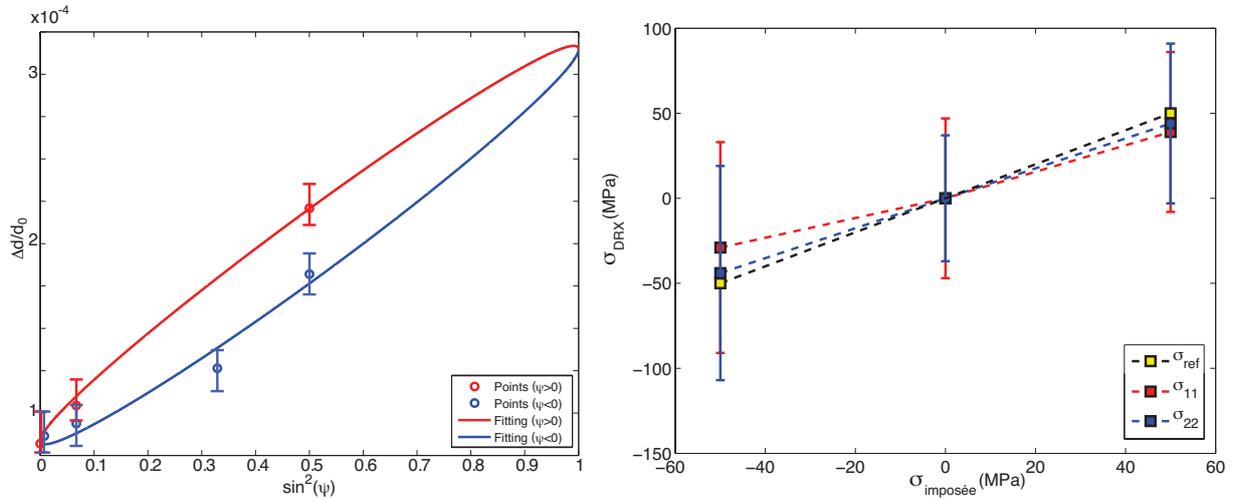
d_0 étant la distance interréticulaire en absence de déformation. Le tracé de la fonction $\frac{\Delta d}{d_0}(\sin\psi^2)$ pour différents angles ϕ donne une ellipse (figure 7a). Sa pente, sa largeur et sa valeur à l'origine permettent d'estimer les contraintes σ_{11} , σ_{22} et σ_{12} (ce dernier terme est normalement nul lors de nos essais).

Les mesures de σ_{11} et σ_{22} reportées table 2 ont été réalisées pour les neuf états de chargement définis (figure 6a). Notons que l'incertitude de mesure a été estimée en moyenne à ± 50 MPa. On aboutit au tracé de la figure 7b.

Même si les tendances sont respectées nous n'obtenons pas une pente de 1 : les contraintes sont sous-estimées. Nous ne disposons pas à l'heure actuelle d'une précision et d'une reproductibilité suffisantes pour les niveaux de chargement recherchés.

σ_1 attendu	-50	0	50	σ_2 attendu	-50	0	50
σ_1 mesuré	-29	0	39	σ_2 mesuré	-44	0	44

TABLE 2 – Valeurs moyennes et recalées des contraintes obtenues par DRX (MPa).

FIGURE 7 – (a) Dépouillement par la méthode des $\sin^2\psi$ (recherche des paramètres suivants : origine, ouverture, pente) pour un état de chargement $(\sigma_1; \sigma_2) = (50; 0)$ MPa; (b) Contrainte mesurée par DRX vs Contrainte appliquée.

4 Mesures magnétiques

4.1 Susceptibilité sécante normalisée χ/χ_0

On définit la susceptibilité sécante : $\chi = M/H$ pour une valeur donnée du champ magnétique H et de l'aimantation M correspondante. La figure 8a présente la susceptibilité sécante dans le plan (σ_1, σ_2) . La susceptibilité sous contrainte est normalisée par la valeur de la susceptibilité au même niveau de champ magnétique sous contrainte nulle. Le niveau de champ magnétique considéré est de 200 A/m. Le champ magnétique est appliqué le long de la direction 1 qui est également la direction de laminage (DL).

Une traction uniaxiale le long de la direction du champ magnétique augmente la susceptibilité et une compression dans la même direction la diminue. Quand une contrainte uniaxiale est appliquée dans la direction perpendiculaire au champ magnétique, l'effet est opposé et atténué. L'asymétrie entre traction-compression est très nette. La btraction augmente la susceptibilité ($\chi_{200}^{100,100} = 1,6.\chi_0$), tandis que la bicompression la diminue ($\chi_{200}^{-100,-100} = 0,7.\chi_0$). Les valeurs les plus basses de χ sont obtenues dans le deuxième quadrant du graphe, correspondant à des situations de cisaillement. Une compression le long de la direction du champ magnétique tend toujours à diminuer la susceptibilité, quelle que soit la valeur de σ_2 .

4.2 Dissipation d'énergie

Cette partie se limitera à l'étude des pertes d'énergie pour $f = 50\text{Hz}$ [16]. Les pertes magnétiques sont calculées à partir de la mesure de l'aire des cycles d'hystérésis. La variation des pertes magnétiques est calculée suivant la relation suivante (Eq.5) :

$$\Delta^r P = 100 \times \frac{P(\sigma_1, \sigma_2) - P(0, 0)}{P(0, 0)} = 100 \times \frac{\Delta P}{P^0} \quad (5)$$

On remarque sur la figure 8b que les pertes magnétiques les plus élevées sont obtenues quand σ_1 est

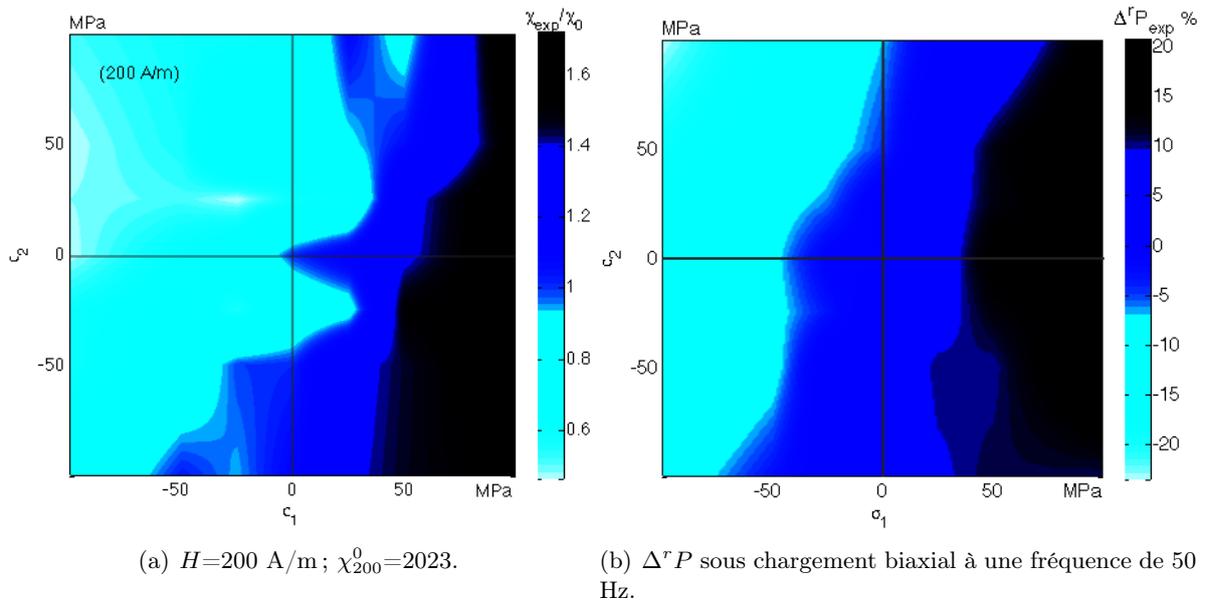


FIGURE 8 – (a) Susceptibilité anhystérétique sécante sous chargement mécanique biaxial ; (b) Pertes d'énergie magnétique.

élevé et positif (+20% de variation). Cet effet est presque indépendant de σ_2 . Les iso-valeurs des pertes sont des lignes presque verticales à 50 Hz.

5 Conclusions

Un dispositif expérimental pour observer l'influence d'une sollicitation biaxiale sur le comportement magnétique des matériaux magnétiques doux a été décrit. Outre un système d'excitation et de mesure magnétique, l'essai est instrumenté avec un système de corrélation d'images et un système de diffraction des rayons X.

L'estimation des contraintes par le biais de la corrélation d'images donne des résultats en accord avec les efforts imposés et l'hypothèse de déformation homogène utilisée. La diffraction des rayons X donne une estimation sous évaluée des contraintes, avec une incertitude élevée.

Les résultats obtenus pour le fer-silicium sont cohérents avec les résultats publiés dans des travaux antérieurs concernant la susceptibilité [9, 11]. Les résultats expérimentaux sur l'évolution des dissipations d'énergie avec la contrainte biaxiale fournissent une contribution nouvelle aux études menées auparavant. Tous les résultats confirment le rôle prédominant de la composante des contraintes parallèle au champ magnétique.

Références

- [1] L. Bernard *et al.*, Effect of stress on switched reluctance motors : a magneto-elastic finite-element approach based on multiscale constitutive laws, *IEEE Trans. Magn.*, **47(9)** : 2171-2178, 2011.
- [2] R.M. Bozorth, Ferromagnetism, Norstand Company, NY, 1951.
- [3] B.D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, Wiley, 2011.
- [4] C.S. Schneider *et al.*, Biaxial magnetoelasticity in steels, *J. Appl. Phys.*, **53** : 8136, 1982.
- [5] K. Kashiwaya, Magnetoelastic effect of 3.25% Si-Fe single crystal under low magnetic field, *J. Appl. Phys.*, **30** : 2932, 1991.
- [6] M.J. Sablik *et al.*, Micromagnetic model for the influence of biaxial stress on hysteretic magnetic properties, *J. Appl. Phys.*, **75** : 5673, 1994.
- [7] M.J. Sablik *et al.*, The effects of biaxial stress on Barkhausen noise signals when the magnetic field is noncoaxial with the stress axes, *J. Appl. Phys.*, **84** : 6239, 1998.

-
- [8] M.J. Sablik *et al.*, Modeling biaxial stress effects on magnetic hysteresis in steel with the field and stress axes noncoaxial, *J. Appl. Phys.*, **85** : 4391, 1999.
- [9] J. Pearson *et al.*, Biaxial Stress Effects on the Magnetic Properties of Pure Iron, *IEEE Trans. Magn.*, **36** : 3251-3253, 2000.
- [10] V. Maurel *et al.*, Setup to test biaxial stress effect on magnetomechanic coupling, *J. Appl. Phys.*, **93** : 7115, 2003.
- [11] O. Hubert *et al.*, A new experimental set-up for the characterization of magneto-mechanical behaviour of materials submitted to biaxial stresses. Application to FeCo alloys, *Przegląd Elektrotechniczny*, **81** : 19, 2005.
- [12] O. Hubert, Influence of biaxial stresses on the magnetic behavior of an iron-cobalt sheet experiments and modelling, *Przegląd Elektrotechniczny*, **83(4)** : 70, 2007.
- [13] F. Hild, S. Roux, Digital Image Correlation : from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties – a Review, *Strain*, **42** : 69–80, 2006.
- [14] L. Daniel, O. Hubert, An analytical model for the DeltaE effect in magnetic materials, *EPJ Appl. Phys.*, **45** : 31101, 2009.
- [15] F. Hild *et al.*, 3D displacement field measurement by digital image correlation – Metrological study and application to composite structures –, *J. N. C. Toulouse 16*, 2009.
- [16] M. Rekik *et al.*, Influence of a multiaxial stress on the reversible and irreversible magnetic behaviour of a 3%Si-Fe alloy, *I. J. of App. Elect. and Mech.* (soumis), 2013.