

Étude de l'Effet Inverse de Magnétostriction. Application à un Dispositif de Contrôle de Force.

Z. Hicham* , A. Laribi **, A .Boulassel ***, N .Kemache **** et M.R. Mekideche*****

*Laboratoire d'études et de modélisation en électrotechnique (LAMEL), Université de Jijel,
Email: hicham_lamel@yahoo.fr

Résumé – Ce document présente une contribution à la modélisation du phénomène complexe de magnétostriction par un outil de calcul basé sur la méthode des éléments finis. Pour cet objet, nous décrivons une nouvelle méthode de contrôle de la force magnétique. Cette méthode emploie un effort mécanique appliqué à un matériau magnétostrictif, afin de contrôler la force attractive entre les parties mobile et fixe d'un circuit magnétique qui comporte un aimant permanent. En connaissant l'état de contrainte exercée sur le barreau magnétostrictif, il sera donc possible de contrôler les forces magnétiques exercées sur l'armature mobile du dispositif [1].

Mots-clés – Effet Inverse de Magnétostriction, Forces Magnétiques, Méthode Des Eléments Finis.

I. INTRODUCTION

Les électroaimants sont des dispositifs essentiels qui permettent de transformer une énergie électrique en énergie mécanique. Ils sont très largement utilisés dans l'industrie et sont des composants essentiels pour la réalisation de disjoncteurs et de relais. Ces électroaimants utilisent un courant électrique pour générer et contrôler des forces magnétiques. L'inconvénient majeur de ces dispositifs est qu'ils nécessitent des courants d'excitation importants. De plus, une partie de l'énergie électrique est transformée en chaleur par effet Joule à cause de la résistance du bobinage d'excitation. Ces pertes énergétiques représentent un désavantage certain, et de plus produisent un échauffement non négligeable du dispositif.

Pour palier ces inconvénients, des chercheurs du laboratoire Higuchi, Torii et Yamamoto de l'université de Tokyo ont mis au point un dispositif compact, à base de matériaux magnétostrictifs, piézoélectriques et d'un aimant permanent.

II. DISPOSITIF DE CONTROLE DE FORCE MAGNETIQUE

A. Description du dispositif et principe de fonctionnement

Ce dispositif, commandé en tension, permet de contrôler les forces magnétiques exercées sur sa partie mobile. Le circuit magnétique de ce dispositif illustré en "Fig. 1," est constitué d'un aimant permanent, d'un matériau à magnétostriction géante : le Terfenol-D et d'une armature mobile. L'application d'une contrainte

(qui sera produite par l'intermédiaire d'un matériau piézoélectrique commandé en tension) sur le matériau magnétostrictif modifie ses propriétés magnétiques et donc change la distribution du flux dans le circuit, produite par l'aimant permanent. Par conséquent, le flux traversant la section du barreau magnétostrictif va diminuer, et augmenter de façon antagonique dans la partie mobile, comme illustré sur la "Fig.1.". Les forces magnétiques exercées sur la partie mobile vont donc augmenter en conséquence. En connaissant l'état de contraintes exercées sur le barreau magnétostrictif, il sera donc possible de contrôler les forces magnétiques exercées sur la partie mobile du dispositif [2].

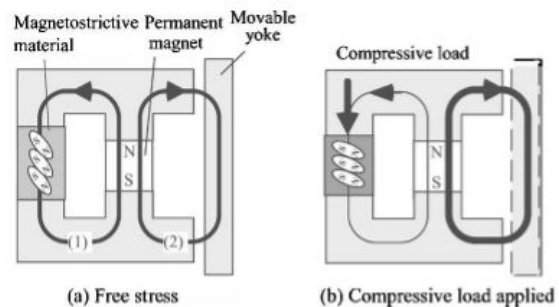


Fig.1 Circuit magnétique pour un effort mécanique imposé nul (a) et à contrainte de compression imposée sur le barreau de Terfenol-D (b).

III. ILLUSTRATION DE LA MAGNETOSTRICTION

La magnétostriction est le phénomène de couplage magnéto-mécanique, qui apparaît dans tous les matériaux magnétiques. Ce phénomène possède deux effets importants :

- 1) *Effet direct*: l'application d'un champ magnétique où sa variation produit une déformation de magnétostriction.
- 2) *Effet inverse*: l'application d'une contrainte mécanique sur le matériau ou sa variation, produit une modification des propriétés magnétiques.

IV. COUPLAGE MAGNETO- MECANIQUE

Le problème couplé magnétique et mécanique a une forme d'équations aux dérivées partielles (EDP), avant d'implémenter ce problème sous éléments finis, les hypothèses essentielles sur lesquelles repose l'étude présentée ici sont [2] :

1) La modélisation du phénomène de magnétostriction est réalisée en régime stationnaire, ce qui implique que l'on se place dans le domaine de la magnétostriction et de l'élastostatique.

2) Les phénomènes magnétiques, mécaniques et de la magnétostriction sont considérés irréversibles (sans hystérésis).

Ces hypothèses impliquent qu'il n'existe pas d'effet dissipatif tel que les pertes par hystérésis, par courant de Foucault ou par frottement mécanique.

A. Lois de comportement couplées magnéto-mécanique

À partir d'une approche énergétique, qui permet d'établir le coefficient de couplage liant les grandeurs mécaniques et magnétiques et, en utilisant une approche phénoménologique afin d'établir la loi de comportement mécanique couplée, nous avons explicité les lois de comportement magnétique et mécanique suivantes [3] :

$$\begin{cases} H(B,S) = H(B,S^\mu) - H^\mu(B,S) \\ \sigma_{ij}(B,S) = C_{ijkl}(S_{kl} - S_{kl}^\mu(B)) \end{cases} \quad (1)$$

$S^\mu(B)$ est la déformation de magnétostriction fonction de l'induction magnétique. Le terme $H(B,S^\mu)$ correspond à la caractéristique magnétique à contrainte nulle.

Le terme $H^\mu(B,S)$ correspond à un champ magnétique coercitif induit par l'effet des contraintes.

Ces deux lois constitutives de matériaux magnétostrictifs prennent explicitement en compte l'effet directe et inverse de la magnétostriction. En effet, au vu des équations ci-dessus, il est directement visible que l'application d'un champ crée une déformation de magnétostriction $S^\mu(B)$, et que l'application d'une contrainte induit une variation du champ de $H^\mu(B,S)$.

B. Formulation du problème magnétique

Après avoir défini les équations de base de la magnétostatique (Equations de Maxwell), nous obtenons la formulation dite forte du problème magnétostatique [2] :

$$\nabla \times [v(B)(\nabla \times A)] = J_s + (\nabla \times H^\mu) \quad (2)$$

La formulation intégrale de l'équation (2) est établie soit par la méthode des résidus pondérés qui fait appel à la notion des distributions, soit par l'approche variationnelle (minimisation de l'énergie potentielle totale du dispositif).

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\nabla \times A') [v(B)] (\nabla \times A') d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \times A') \cdot H^\mu(B,S) d\Omega \\ - \int_{\Gamma_H} A' (H \times n) d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Après discrétisation en éléments finis, nous allons résoudre le système algébrique suivant :

$$[M(B)][A] = [J_s] + [J^\mu(B,S)] \quad (4)$$

C. Formulation du problème mécanique

La théorie de l'élasticité linéaire à pour objectif d'étudier le comportement mécanique des solides déformables, pour un solide S_Ω de volume Ω et de frontière régulière $\partial\Omega$ repéré par le référentiel (X,Y,Z) de coordonnées cartésiennes orthogonales (x,y,z) soumis à l'action des forces volumiques extérieures $[F^\Omega] = [F_x F_y F_z]^t$, l'équation d'équilibre dans le cas statique s'écrit comme suit :

$$\sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} + F_i^\Omega = 0 \quad (5)$$

Selon la démarche utilisée précédemment, la forme intégrale du problème élastostatique est la suivante :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} ([D][U])' [C][D][U] d\Omega - \int_{\Omega} ([D][U])' [C][S^\mu] d\Omega \\ = \int_{\Omega} [U]' [F^\Omega] d\Omega + \int_{\Omega_\sigma} [U]' [F^s] d\Omega_\sigma \end{aligned} \quad (6)$$

Après discrétisation en éléments finis, nous allons résoudre le système algébrique suivant :

$$[K] \cdot [U] = [F] + [F^u(B)] + [F^{mag}(B)] \quad (7)$$

Avec :

[K] : Est la matrice de rigidité mécanique,

[M] : Est la matrice de rigidité magnétique,

$[F^{mag}(B)]$: Est le vecteur des forces magnétiques calculé par l'application locale du principe de travaux virtuels,

[F] : Est le vecteur des forces volumiques extérieurs,

$[F^u(B)]$: Est le vecteur des forces équivalentes de magnétostriction. Elles n'ont aucune origine physique et représentent un terme source équivalent à celui qui générerait une déformation de magnétostriction.

On aboutit finalement au système matriciel algébrique global, qui met en évidence le couplage entre les phénomènes magnétiques et mécanique.

$$\begin{bmatrix} M(B) & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J_s] + [J^\mu(B, S)] \\ [F] + [F^u(B)] + [F^{mag}(B)] \end{bmatrix} \quad (8)$$

On peut facilement remarquer que les systèmes d'équations (4) et (7) sont couplés au travers :

1) Les forces d'origine magnétique, $[F^u]$, $[F^{mag}]$.

2) Une densité de courant induit par l'application d'une contrainte mécanique, $[J^\mu(B, S)]$.

V. APPLICATION ET RESULTATS

Maintenant, nous allons examiner une application spécifiée à l'étude de l'effet inverse du phénomène de magnétostriction. La modélisation de ce phénomène a pour but de comprendre l'impact d'une contrainte mécanique sur le comportement magnétique d'un échantillon magnétostrictif.

Pour cet objet, le dispositif de contrôle de force illustré en "Fig. 1," est modélisé, dans le cadre de l'approximation bidimensionnelle afin de simuler son comportement couplé magnéto-mécanique.

Le domaine d'étude considéré pour l'analyse numérique, ainsi que les conditions aux limites relatives aux problèmes magnétiques et mécaniques sont définies en "Fig.2".

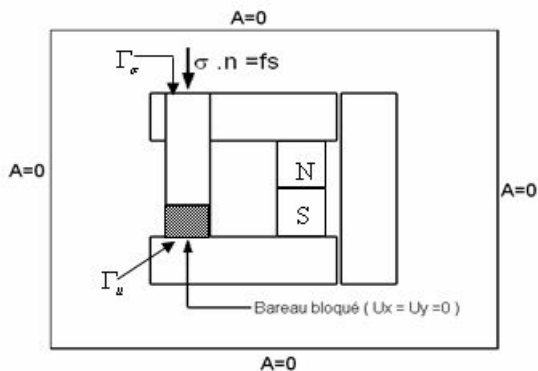


Fig.2 Présentation du domaine d'étude et conditions aux limites.

La "Fig.3," illustre le maillage en éléments finis triangulaires du domaine d'étude à modéliser.

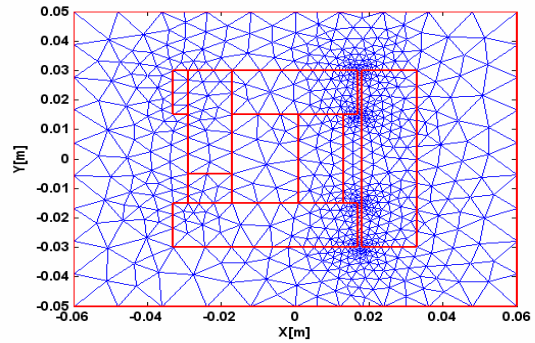


Fig.3 Maillage EF correspondant

La résolution du problème couplé magnéto-mécanique illustré en équation (8) nous donne, pour l'aspect magnétique la répartition du potentiel vecteur magnétique A calculé au niveau de nœuds de maillage, et pour l'aspect mécanique la distribution du champ de déplacement U.

Il est à noter que, la magnétostriction résultante, au sein de matériaux ferromagnétiques, tels que l'alliage de *Terfenol-D* est un phénomène où l'interaction entre les phénomènes magnétiques et mécaniques est assez importante, et pour cette raison, en appliquant le modèle de couplage fort qui permet la détermination simultanée du champ magnétique et celui de déplacement.

La procédure de résolution de ce genre de couplage est illustrée en "Fig.4" :

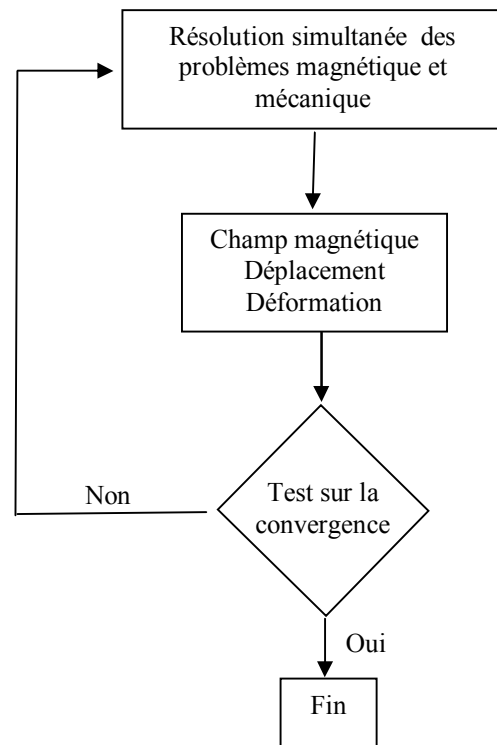


Fig. 4 Schéma de principe pour la résolution du problème couplé magnéto-mécanique.

Les caractéristiques géométriques et physiques des différentes régions appartenant au domaine de calcul numérique, sont récapitulées au tableau I.

TABLEAU I
PROPRIETES MAGNETIQUES ET MECANIQUES
DES MATERIAUX UTILISES.

Matériaux	Terfenol-D	Aimant permanent	Armature en Fer
Longueur L [m]	20 mm	30 mm	60 mm
Diamètre Φ [m]	12mm	12 mm	15 mm
Module de Young E [10^9 N/m ²]	90 GPa	-	-
Coefficient de Poisson ν	0.3	-	-
Caractéristiques magnétiques	$\mu_r = 4$	$B_r = 12$	$\mu_r = 1000$

Les contraintes appliquées par le matériau piézoélectrique, ou bien par la machine de compression, sont prises en compte dans nos modélisations bidimensionnelle par l'intermédiaire d'une pression considérée constante et homogène en tout point de la section d'application, comme le montre "Fig.2".

A. Resultants magnétiques

Pour une épaisseur d'entrefer de 1mm, on obtient la répartition du potentiel magnétique représentée en "Fig.6," par une configuration de 70 lignes équipotentielles (pas de contrainte mécanique).

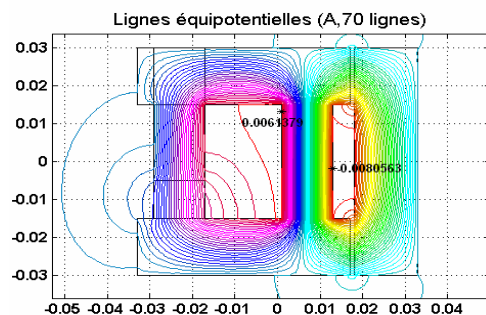


Fig. 6 Solution en potentiel vecteur magnétique

Nous remarquons que, le flux magnétique produit par l'aimant est quasiment réparti entre le barreau magnétostrictif et l'armature mobile.

Nous allons chercher à illustrer l'effet de la contrainte appliquée à l'échantillon magnétostrictif, sur le comportement magnétique de celui-ci. On trace la solution magnétique pour une contrainte appliquée de -6MPa.

Les "Fig.7," et "Fig.8," illustrent le comportement magnétique du dispositif magnétostrictif sollicité par une contrainte de compression de -6MPa.

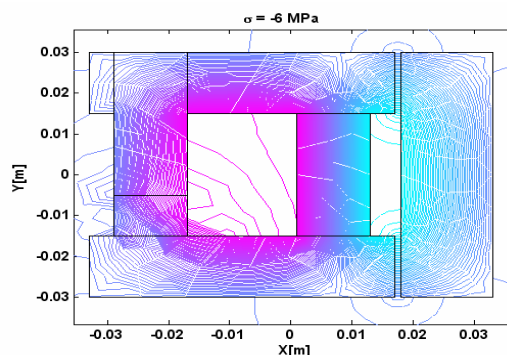


Fig. 7 Solution en potentiel vecteur magnétique pour une contrainte appliquée de -6 MPa.

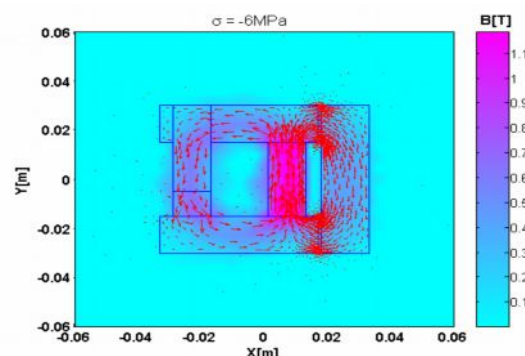


Fig.8 Distribution de l'induction magnétique pour une contrainte appliquée de -6 MPa.

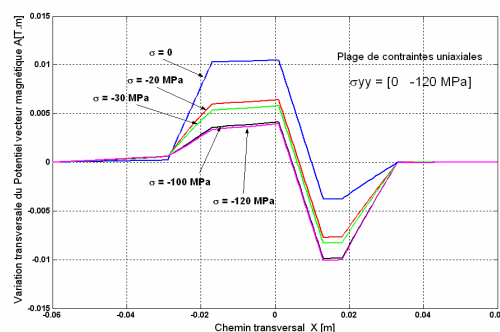


Fig.9 .Variation transversale du potentiel vecteur magnétique (b). Chemin pris sur tout le domaine d'étude: $X = [-0.06 \text{ m } 0.06 \text{ m}]$ et, pour $Y = 0 \text{ m}$.

La "Fig.9," résume le comportement magnétique (potentiel vecteur magnétique) du dispositif suivant un chemin transversal. Ce comportement met en évidence les modifications résultantes de l'application des contraintes. Ces modifications sont au niveau de matériau magnétostrictif, et de l'armature mobile. Au fur et à mesure que la contrainte augmente, les propriétés magnétiques de barreau magnétostrictif sont altérées, et de fait le flux magnétique à travers sa section diminue au détriment de celui de la partie mobile.

La "Fig.10," montre la variation de l'induction magnétique dans le barreau magnétostrictif en fonction de la contrainte appliquée sur le dispositif.

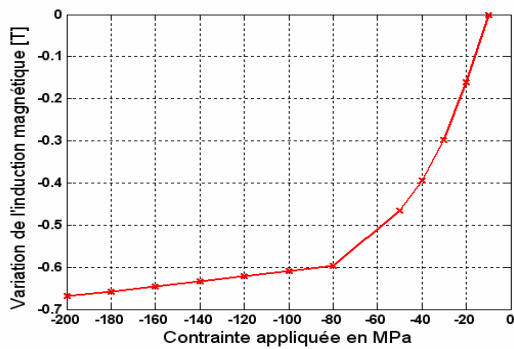


Fig.10. Variation de l'induction magnétique du barreau magnétostrictif, en fonction des contraintes appliquées.

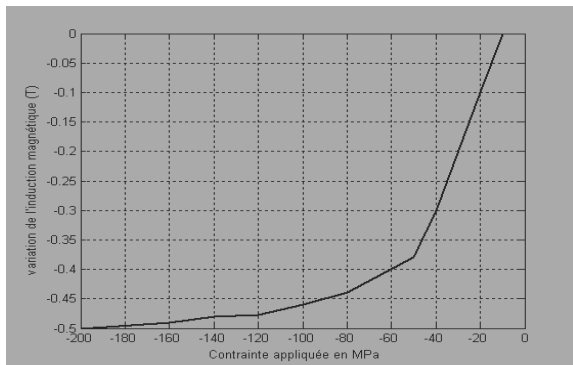


Fig.11. Relevé expérimental de la variation de l'induction magnétique du barreau magnétostrictif, en fonction des contraintes appliquées.

Le principal objectif de cette étude, est de faire contrôler les forces magnétiques exercées sur l'armature mobile, par l'intermédiaire des sollicitations mécaniques imposées (contraintes) sur un matériau magnétostrictif (Terfenol-D).

La "Fig.12," met en évidence la distribution des forces magnétiques exercées sur l'armature mobile :

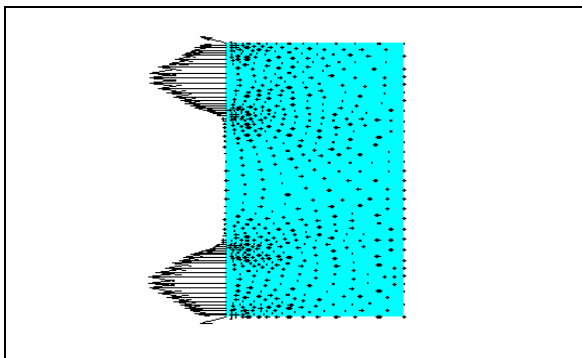


Fig.12. Distribution des forces magnétiques exercées sur l'armature mobile

La "Fig.13," montre l'évolution de la force magnétique globale exercée sur la partie mobile, en fonction des contraintes appliquées évoluant entre -10 MPa et -200 MPa, pour un aimant permanent possédant une induction rémanente de 1,2 T.

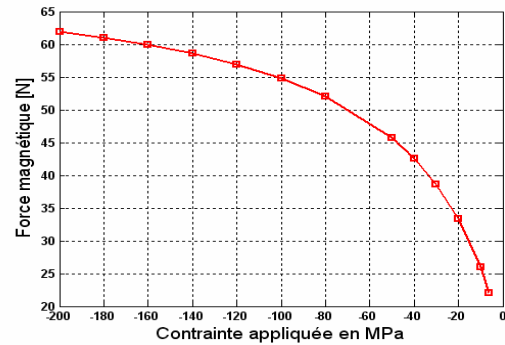


Fig.13. Evolution de la force magnétique globale exercée sur la partie mobile en fonction des contraintes.

Les courbes issues des résultats numériques et expérimentaux ont la même allure avec le bon ordre de grandeur. En effet, à faible contrainte appliquée, on constate une évolution rapide de la force magnétique globale (augmentation de la force et diminution de l'induction magnétique dans le barreau magnétostrictif), et à forte contrainte on observe une saturation progressive de celle-ci (ainsi que de la variation de l'induction magnétique dans le barreau magnétostrictif).

VI. CONCLUSION

Nous avons développé un code de calcul de structure par éléments finis qui permet de modéliser des dispositifs à base de matériaux magnétostrictifs en prenant en considération l'effet inverse de magnétostriction. Cet outil de calcul permet de modéliser des structures où les matériaux magnétostrictifs sont excités magnétiquement et mécaniquement afin qu'ils accomplissent les fonctions d'actionneur ou de capteur.

Nous avons modélisé un dispositif de contrôle de force magnétique basé sur le phénomène de magnétostriction. Une modélisation bidimensionnelle a été réalisée à cet effet. Les résultats numériques ont permis de prédire le comportement magnétique sous différentes contraintes mécaniques appliquées.

VII. REFERENCES

- [1] T. Ueno, J. Qui, J. Tani, "Magnetic force control based on the inverse magnetostriction effect", *IEEE Trans. Industrial on Magnetism*, Vol. 40, N°3, May. 2004, pp. 1601-1605.
- [2] K. Azoum (2005). "Contribution à la modélisation numérique de phénomènes magnéto élastiques : étude de dispositifs à base de matériaux magnétostrictifs". Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, Orsay.
- [3] L. Hirsinger et R. Billardon (1995). "Magneto-elastic finite element analysis including magnetic forces and magnetostriction effects" *IEEE Transactions on Magnetism*, 31(3):1877-1880.