



HAL
open science

MODÉLISATION DE TRANSDUCTEURS MAGNÉTOSTRICTIFS À L'AIDE DU CODE ÉLÉMENTS FINIS ATILA

R. Bossut, J. Decarpigny, F. Claeysen, K. Anifrani

► **To cite this version:**

R. Bossut, J. Decarpigny, F. Claeysen, K. Anifrani. MODÉLISATION DE TRANSDUCTEURS MAGNÉTOSTRICTIFS À L'AIDE DU CODE ÉLÉMENTS FINIS ATILA. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C2), pp.C2-617-C2-620. 10.1051/jphyscol:19902145 . jpa-00230441

HAL Id: jpa-00230441

<https://hal.science/jpa-00230441>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

1er Congrès Français d'Acoustique 1990

MODÉLISATION DE TRANSDUCTEURS MAGNÉTOSTRICTIFS À L'AIDE DU CODE ÉLÉMENTS FINIS ATILA

R. BOSSUT, J.N. DECARPIGNY, F. CLAEYSSEN*, D. BOUCHER* et K. ANIFRANI**

*Laboratoire d'Acoustique, URA, 253 CNRS, Institut Supérieur
d'Electronique du Nord, 41 Boulevard Vauban, F-59046 Lille Cedex,
France*

**Groupe d'Etudes et de Recherches de Détection Sous-Marine, D.C.A.N.
Toulon, Le Brusq, F-83140 Six Fours Les Plages, France*

*** SINAPTEC, CITTN, 121 Rue Chanzy, F-59620 Hellemmes, France*

Résumé

Un modèle mathématique tridimensionnel a été développé pour prendre en compte le phénomène physique de la magnétostriction. Il utilise une formulation variationnelle basée sur un potentiel magnétique scalaire réduit. Cette approche permet de modéliser des transducteurs magnétostrictifs en régime statique ou harmonique, dans l'air ou rayonnant dans un fluide, par la méthode des éléments finis. Cet article décrit brièvement le modèle mathématique, puis son application à l'étude d'un dispositif de caractérisation, pour lequel on dispose d'un modèle d'ondes planes ainsi que de mesures.

Abstract

New magnetostrictive rare earth - iron alloys offer an attractive opportunity for the design of high-power low-frequency transducers. In order to optimize the design of this particular class of transducers, a model based on a new variational principle has been derived, following a classical finite element method approach. This model describes the three-dimensional dynamic behavior of heterogeneous electromechanically coupled structures, in air or acoustically radiating in a surrounding fluid domain. Using a reduced scalar potential formulation of the magnetic field, the model has been implemented within the ATILA finite element code. In this paper, a general view of the method is given and results of the computation on a characterization device are compared to plane-wave model and experimental results.

Introduction

Le regain d'intérêt pour les transducteurs magnétostrictifs, dont l'origine se trouve dans l'exploitation des possibilités des alliages Fer - Terres rares, suscite un besoin nouveau en terme de modélisation. Pour y répondre, un modèle tridimensionnel reposant sur la formulation variationnelle des équations du couplage électromécanique a été développé, exploitant la méthode des éléments finis [1,2,3]. Les hypothèses sur lesquelles repose le modèle retenu sont les suivantes :

- . Les phénomènes sont statiques ou en régime harmonique établi, à des fréquences suffisamment basses pour que les calculs des grandeurs magnétiques relèvent de la magnétostatique. Il n'est pas tenu compte des courants de Foucault.
- . Les sources magnétiques s'expriment directement à partir d'un nombre fini de courants d'excitation. Elles sont homéomorphes à des tores et sont immobiles.
- . Les lois de comportement des matériaux sont linéaires. Les non-linéarités magnétiques, de comportement ou de grands déplacements ne sont pas prises en compte. Cette hypothèse requiert que les matériaux magnétostrictifs soient polarisés de façon à devenir piézomagnétiques.
- . Les effets dissipatifs sont pris en compte soit par rayonnement acoustique, soit par des constantes physiques d'élasticité complexes. Les pertes par hystérésis ou par courants de Foucault ne sont pas prises en compte.

D'autre part, les pièces de perméabilité infinie ne sont actuellement pas modélisables. Ces hypothèses sont assez restrictives, mais permettent toutefois de modéliser efficacement des transducteurs sonar dans leur environnement habituel.

Cette présentation décrit d'abord le formalisme mathématique pour une structure tridimensionnelle, appliquée ensuite à la méthode des éléments finis. Enfin, un transducteur de caractérisation est modélisé, et les résultats sont comparés aux mesures.

I) Formulation théorique

I.1 Modèle mathématique général

Le choix des variables d'état en magnétisme est un problème délicat, car lourd de conséquences sur la formulation. Il est intimement lié à la façon de prendre en compte les sources. La formulation en potentiel scalaire réduit, qui a été retenue, exploite l'idée consistant à extraire la composante rotationnelle H^S du champ magnétique H , solution du problème complet. Cette composante est uniquement due aux sources. L'autre composante, H^M , irrotationnelle, est due à la matière. Elle dérive d'un potentiel magnétique. Cette approche est possible parce que les courants de Foucault ne sont pas pris en compte. Elle possède en outre l'avantage du nombre minimum d'inconnues. Enfin, les algorithmes de calcul et de résolution sont analogues à ceux du modèle lié à la piézoélectricité présent dans le code ATILA [3,4,5]. Le système d'équations représentant les lois constitutives d'un milieu piézo-magnétique qui a été retenu exprime les contraintes T_{ij} et l'induction B_m en fonction des déformations S_{k1} et du champ H_n :

$$\begin{cases} T_{ij} = c_{ijkl}^H S_{k1} - e_{nij} H_n \\ B_m = e_{mkl} S_{k1} + \mu_{mn}^S H_n \end{cases}$$

c_{ijkl}^H désigne le tenseur symétrique des rigidités à champ magnétique constant, μ_{mn}^S désigne le tenseur symétrique des perméabilités à déformation constante, et e_{nij} désigne le tenseur piézo-magnétique. Les déformations S_{k1} et le champ magnétique H_n s'expriment aisément en fonction des variables d'état suivantes : les composantes du déplacement u , le potentiel magnétique réduit Φ_M et les courants I^S traversant les sources d'excitation magnétique :

$$S_{k1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_k} \right) \quad \text{et} \quad H_n = - \frac{\partial \Phi_M}{\partial x_n} + {}^0H_n^S I^S$$

On notera que la matrice $[{}^0H^S]$ exprime la relation entre le champ magnétique d'excitation et les courants traversant les sources, et qu'elle peut être calculée à l'aide d'un programme indépendant, appliquant la loi de Biot et Savart à des spires de géométrie plus ou moins complexes [7]. Les équations d'Euler sont la loi de Newton dans le domaine élastique, l'équation de conservation du flux magnétique dans le domaine magnétique et l'équation du calcul du flux vu par les sources d'excitation :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + \rho \omega^2 u_i = 0, \quad \frac{\partial B_m}{\partial x_m} = 0, \quad Q^V - \int_V B_m {}^0H_m^S dV = 0$$

Ces équations sont assorties de conditions aux limites mécaniques (champ de déplacement imposé ou contrainte normales ou forces F imposées), magnétiques (champ de potentiel magnétique imposé ou induction magnétique normale imposée) ou électriques (courant d'excitation imposé). Par une technique "d'essais et d'erreurs", on peut déterminer une fonctionnelle quadratique dont la stationnarité implique les équations d'Euler ci-dessus [2].

I.2) Application de la méthode des éléments finis au modèle

Par l'application de la méthode des éléments finis au modèle proposé, c'est-à-dire la discrétisation du domaine étudié et la projection sur une base de fonctions d'interpolation des variables fonction des coordonnées spatiales (u , Φ_M , F , B , ${}^0H^S$), on déduit du modèle mathématique le système d'équations suivant, reliant les valeurs nodales des forces extérieures F , le flux Q^V vu par les sources d'excitation magnétique et les valeurs nodales du flux sortant du domaine magnétique, aux valeurs nodales du déplacement u et du potentiel magnétique Φ_M et aux courants d'excitation magnétique I :

$$\begin{pmatrix} [K_{UU}] - \omega^2 [M] & [K_{U\Phi}] & [K_{UI}] \\ [K_{U\Phi}]^T & [K_{\Phi\Phi}] & [K_{\Phi I}] \\ [K_{UI}]^T & [K_{\Phi I}]^T & [K_{II}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U} \\ \underline{\Phi}_M \\ \underline{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{F} \\ \underline{Q} \\ -\underline{Q}^V \end{pmatrix}$$

On peut évidemment étendre ce système d'équations dans le cas où la structure mécanique est en contact avec un domaine fluide. Ce système permet plusieurs types de résolution : l'analyse modale, pour laquelle on considère les modes de résonance (\underline{Q}^V , \underline{Q} , et $\underline{F} = \underline{Q}$) ou les modes d'antirésonance (\underline{I} , \underline{Q} et $\underline{F} = \underline{Q}$), ou l'analyse harmonique, pour laquelle l'excitation est généralement réalisée à courants \underline{I} imposés.

Enfin, il n'est naturellement pas possible de modéliser tout le domaine magnétique, qui est théoriquement illimité. En pratique, on limite ce domaine par une surface suffisamment éloignée de la structure et des sources, sur laquelle on impose un potentiel magnétique nul.

II) Résultats

Le principe de la méthode décrite ci-dessus et les algorithmes associés ont été validés par une série de tests [8,9]. Le test présenté ici est un dispositif de caractérisation constitué d'un système masse-ressort. La masse est inerte et le ressort est constitué d'une paire de barreaux longitudinaux de matériau magnétostrictif, polarisés et excités chacun par une couche de spires jointives. Ces barreaux sont mécaniquement en parallèle avec une paire de tiges de précontrainte. Ce dispositif, réalisé au GERDSM, se prête bien à une modélisation à constantes localisées.

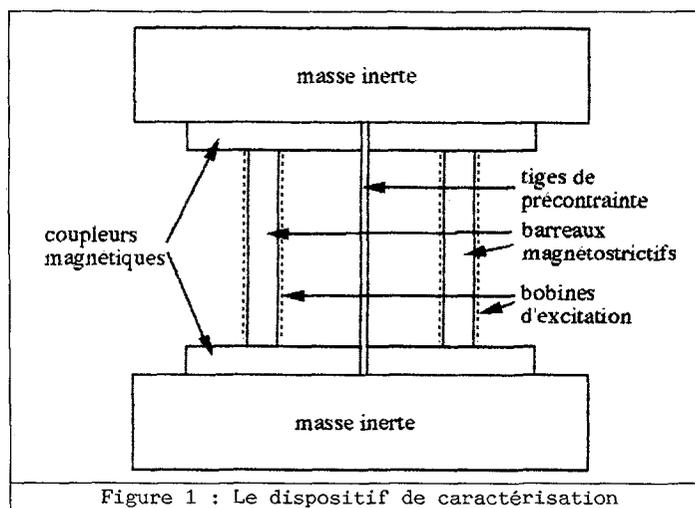
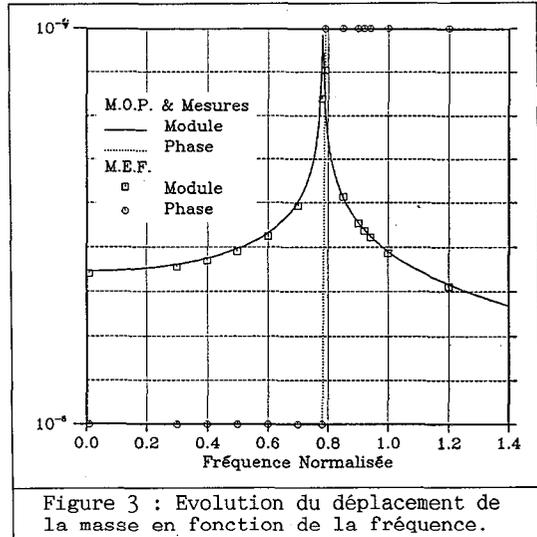
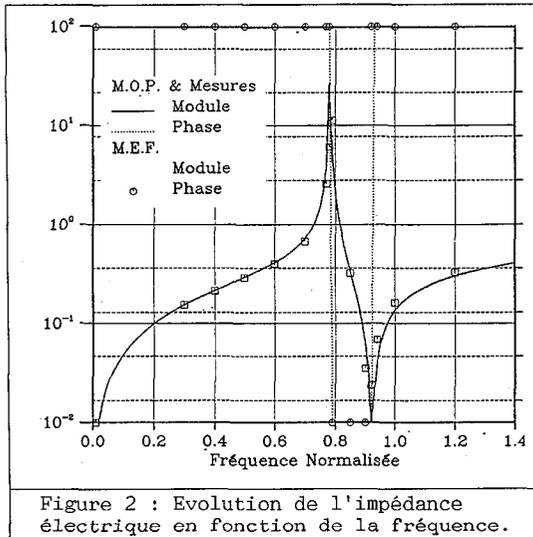


Figure 1 : Le dispositif de caractérisation

La structure est présentée fig. 1. Pour des raisons de symétrie, seul le huitième de la structure est modélisé. Le domaine magnétique est un cylindre englobant largement toute la structure. Le maillage retenu est composé de 1631 noeuds, connectés entre eux par 375 éléments, et il totalise 2804 degrés de liberté. La fréquence de résonance de la structure étant de l'ordre de 800 Hz, l'analyse harmonique est réalisée de 10 à 1200 Hz. Les fig. 2 et 3 comparent respectivement l'impédance électrique relevée aux bornes des bobines d'excitation montées en série, et le déplacement de la masse inerte, obtenus d'une part par le modèle éléments finis, et d'autre part expérimentalement, en fonction de la fréquence. L'accord est très bon.



Conclusion

Un modèle tridimensionnel reposant sur la formulation variationnelle des équations du couplage électromagnétique a été développé avec succès dans le code éléments finis ATILA (éléments magnétiques et piézomagnétiques, algorithmes de résolution associés). Les premiers tests effectués ont montré rapidement l'intérêt d'une modélisation complète, en comparaison avec les modèles ondes planes utilisés jusqu'ici. Ce modèle a été appliqué ici à l'étude d'un dispositif de caractérisation, et les résultats obtenus sont en excellent accord avec les mesures.

Références

- * Actuellement Société CEDRAT, 20 rue du chemin du pré carré, ZIRST, 38240 MEYLAN, France.
- [1] : F. Claysssen, "La modélisation des transducteurs magnétostrictifs par la méthode des éléments finis", GERDSM N°57995 ET/LD (1988)
- [2] : F. Claysssen, "Conception et réalisation de transducteurs sonar basse fréquence à base d'alliages magnétostrictifs Terres rares - Fer", Thèse de Doctorat-Ingénieur, INSA, Lyon (1989)
- [3] : F. Claysssen, D. Boucher, K. Anifrani, R. Bossut, J.N. Decarpigny, "Analysis of magnetostrictive transducers by the ATILA finite element code", GERDSM N° 61771 ET/LD, J. Acoust. Soc. Am. Suppl. 1 Vol. 85 Session LL4 p.S90 (1989)
- [4] : ATILA : Analyse des Transducteurs par Intégration de l'équation de Laplace.
- [5] : J.N. Decarpigny, "Application de la méthode des éléments finis à l'étude de transducteurs piézoélectriques", Thèse de Doctorat d'Etat, USTL, Lille (1984)
- [6] : J.N. Decarpigny, J.C. Debus, B. Tocquet, D. Boucher, "In air analysis of piezoelectric Tonpilz transducers in a wide frequency band using a mixed finite element plane wave method", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 78 p.1499-1507 (1985)
- [7] : Le calcul de $^0H^s$ dans ATILA est réalisé à l'aide du code FLUXLABS développé par J.C. Sabonnadière et al, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, ENSIEG, BP46, 38402 Saint Martin d'Hères, France.
- [8] : R. Bossut, J.N. Decarpigny, "Incorporation au code ATILA d'éléments magnétostrictifs et développement des algorithmes de résolution correspondant", Rapport d'avancement, Convention C.86.48.826.334 avec le GERDSM, bon de commande n°15 (1989)
- [9] : Idem [8], Rapport final (1989)