

THESE DE DOCTORAT
De L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Présentée par

Abed-Djebar BENSALAH

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR De L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Domaine :

ELECTRONIQUE ELECTROTECHNIQUE AUTOMATIQUE

Sujet de la thèse :

Contribution à l'étude théorique et expérimentale de l'effet de magnéto-impédance géante (GMI) dans les alliages nanocristallins, en vue de réaliser des capteurs magnétiques de haute sensibilité.

Thèse présentée et soutenue à Cachan le 17 Novembre 2005 devant le Jury composé de :

Afef KEDOUS-LEBOUC	Directrice de Recherches	Rapporteur et Présidente
Jacek GIERALTOWSKI	Professeur des universités	Rapporteur
Olivier GEOFFROY	Maître de Conférences	Examineur
Jean-Marc DECITRE	Ingénieur de Recherches	Examineur
Jean-Claude PERRON	Directrice de Recherches	Invité
Francisco ALVES	Professeur des universités	Co-encadrant de thèse
Richard BARRUE	Professeur des universités	Directeur de thèse

Les travaux relatifs à cette thèse ont été effectués au **SATIE UMR 8029**

Laboratoire des Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie- ENS de Cachan et
CNAM 61, avenue du Président Wilson 94235 Cachan Cedex

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'effet de magnéto-impédance dans des alliages nanocristallins de composition nominale $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_6\text{Cu}_1\text{Nb}_3$. Cet effet est tout à fait prometteur pour réaliser des capteurs de champ magnétique de haute sensibilité. Ce manuscrit comporte trois chapitres.

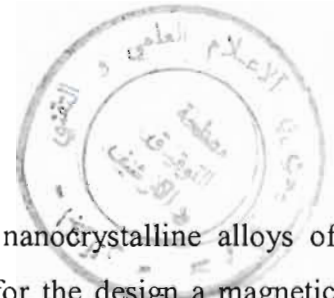
Nous avons, tout d'abord, réalisé une étude bibliographique sur les différentes technologies de capteurs magnétiques en comparant leurs performances par rapport aux capteurs basés sur l'effet de magnéto-impédance géante (GMI). Nous avons également abordé le principe physique des capteurs à magnéto-impédance, les différentes familles de matériaux doux employés et les différentes géométries existantes (ruban, fil, structure sandwich).

Le deuxième chapitre est dédié au développement d'un modèle analytique, afin de mieux comprendre l'origine physique du phénomène de magnéto-impédance et de déterminer les différents facteurs qui peuvent jouer un rôle important dans un tel phénomène.

Le dernier chapitre est, quant à lui, consacré aux mesures expérimentales sur des capteurs réalisés au cours de cette étude. Des traitements thermiques sous contrainte mécanique ont permis d'analyser l'incidence des propriétés magnéto-élastiques sur le phénomène de magnéto-impédance. L'anisotropie de la forme a été également pris en compte dans nos études. Enfin, nous avons exploité les relevés expérimentaux afin de proposer un modèle hybride (analytique-numérique) donnant des résultats plus proches de la réalité par rapport à un modèle analytique. L'intérêt de ce modèle hybride est de pouvoir prédire la réponse de capteurs à magnéto-impédance et ce pour différentes géométries, notamment pour des capteurs en couches minces.

Mots clés : magnéto-impédance, alliages, nanocristallins, anisotropie magnétique, magnétostriction, tenseur de perméabilité, effet de peau.

Abstract



This survey deals with the magneto-impedance effect in nanocrystalline alloys of nominal composition $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_6\text{Cu}_1\text{Nb}_3$. This effect is promising for the design a magnetic high sensitive sensors. This work is composed three chapters.

First of all, we made a bibliographical study on the various technologies of magnetic sensors and compared their performances to the giant magneto-impedance (GMI) sensors. We have also described the physical principle of the magneto-impedance sensors, the various families of soft magnetic materials used and various existing geometries (ribbon, wire, sandwich structure).

The second chapter is dedicated to the development of an analytical model, in order to better understand the physical origin of this phenomenon and to determine the various factors which can play an important part in such a phenomenon.

The last chapter is devoted to experimental measurements on sensors produced during this study. A stress annealing allow us to analyze the incidence of the magnetoelastic properties on magneto-impedance. The shape anisotropy was also taken into account in our studies. Finally, we exploited the experimental data in order to propose a hybrid model giving better results compared to an analytical model. This hybrid model is useful to for predicting the response of magneto-impedance sensors for various geometries, in particular for sensors made with thin layers.

Key words : magneto-impedance, alloys, nanocrystalline, magnetic anisotropy, magnetostriction, permeability tensor, skin effect.

Table de matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les capteurs magnétiques	4
I.1 Introduction	5
I.2 Caractéristiques d'un capteur de champ magnétique	5
I.3 Exemples de capteurs magnétiques	6
I.3.1 Les capteurs à effet Hall	6
I.3.2 Les capteurs magnétorésistifs	8
I.3.3 Les capteurs à vanne de flux (fluxgate)	18
I.3.4 Les capteurs supraconducteurs	20
I.3.5 Les capteurs inductifs	25
I.3.6 Les capteurs à magnéto-impédance	26
I.3.6.1 Structures des capteurs à effet magnéto-impédance	29
I.3.6.1.1 Structures homogènes	29
I.3.6.1.2 Structures non homogènes	30
I.3.6.2 La magnéto-impédance et l'effet de peau	32
I.3.6.3 Matériaux magnétiques pour la magnéto-impédance	34
I.3.6.3.1 Matériaux amorphes	35
I.3.6.3.2 Matériaux nanocristallins	38
I.3.6.4 Les applications de la magnéto-impédance	41
I.3.6.4.1 Les dispositifs de mesure de champ magnétique	41
I.3.6.4.1.1 Technologie des fils	41
I.3.6.4.1.2 Technologie des couches minces	42
I.3.6.4.2 Applications de l'effet GMI pour capteurs de champ ou de position et pour les signatures magnétiques	43
I.3.6.4.3 Applications pour le contrôle non destructif (CND)	45
I.3.6.5 Conclusions	46
BIBLIOGRAPHIE du 1 ^{er} chapitre	48
Chapitre II : Théorie de la magnéto-impédance	54
II-1 Introduction	55
II.2 Calcul de l'impédance	55
II.2.1 Utilisation du vecteur de Poynting	55
II.2.2 Calcul de la magnéto-impédance pour une structure sandwich	58

II.2.2.1 Cas de grandes largeurs du conducteur	58
II.2.2.2 Cas de petites largeurs du conducteur	62
II.2.3 Calcul de la magnéto-impédance pour un ruban ou une couche mince	68
II.2.4 Calcul de la perméabilité relative transversale effective complexe	70
II.2.4.1 Modèle de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)	71
II.2.4.2 Energie libre d'un système ferromagnétique	73
II.2.4.2.1 Energie d'anisotropie magnétocristalline	74
II.2.4.2.2 Energie de Zeeman	75
II.2.4.2.3 Energie magnétostatique	75
II.2.4.2.4 Energie totale	78
II.2.4.3 Etat d'équilibre du système ferromagnétique	78
II.2.4.4 Linéarisation de l'équation (LLG) et calcul tensoriel	80
II.2.4.5 Evolution de la perméabilité transversale effective	88
II.3 Conclusion	94
BIBLIOGRAPHIE du 2 ^{ème} chapitre	95
Chapitre III : Résultats expérimentaux	96
III.1 Introduction	97
III.2 Procédé de fabrication des rubans nanocristallins à base fer (composition FeSiBCuNb)	97
III.3 Le recuit rapide au défilé ou recuit « flash »	98
III.3.1 L'effet du recuit	98
III.3.2 L'origine du recuit « flash »	99
III.3.3 Le processus de nanocristallisation	100
III.3.4 Origine des propriétés magnétiques	101
III.3.5 Procédé du recuit flash	103
III.4 Caractérisation des rubans nanocristallins de composition FeSiBCuNb	103
III.4.1 Diagramme de diffraction de rayons X	103
III.4.2 Mesure de la polarisation à saturation, J_s	105
III.4.3 Mesure du coefficient de magnétostriction à saturation par la méthode SAMR (Small Angle Magnetization Rotation)	106
III.4.4 Influence de la température de recuit sur le champ coercitif	114
III.4.5 Energie induite par contrainte mécanique lors du recuit rapide	115
III.4.6 Visualisation des domaines magnétiques par effet Kerr	116
III.5 La magnéto-impédance dans l'alliage nanocristallin Fe ₇₅ Si ₁₅ B ₆ Cu ₁ Nb ₃	120

III.5.1 Principe de mesure de la magnéto-impédance	120
III.5.2 Incidence de la température de recuit ($\sigma=0$ MPa) sur la magnéto-impédance	121
III.5.3 Effet de la structure en domaines magnétiques sur la magnéto-impédance	126
III.5.4 Effet de la structure du capteur GMI	127
III.5.5 Effet de l'épaisseur du cuivre	128
III.5.6 Effet de la largeur du cuivre	129
III.5.7 Effet de l'anisotropie induite sur la magnéto-impédance	130
III.5.8 Effet de l'orientation du champ extérieur par rapport à l'axe longitudinal du capteur GMI	133
III.5.9 Effet de l'anisotropie de forme	133
III.6 Comparaison entre théorie et expérience	134
III.6.1 L'effet de l'anisotropie	134
III.6.2 Amélioration des résultats théoriques	138
III.7 Perspectives	141
Conclusion générale	144
BIBLIOGRAPHIE du 3 ^{me} chapitre	147
Annexe1	148
Annexe2	152