

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji de Laghouat



Faculté de Technologie

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Électrique

Présentée et soutenue publiquement

Le 04/07/2018

REGAZ AMAR

THÈME

Contribution à l'Etude d'un Actionneur à Matériaux Actifs

JURY :

Président	Mr. Seghier Tahar	Prof	U. Amar Telidji de Laghouat
Rapporteurs	Mr. ZEGNINI Boubakeur	Prof	U. Amar Telidji de Laghouat
	Mr. MAHI Djillali	Prof	U. Amar Telidji de Laghouat
Examineurs	Mr. Hamid Azzedine	Prof	C.U. El Bayadh
	Mr. Boukezzi Larbi	Prof	U. Ziane Achour de Djelfa
	Mr. Lidjici Hamza	Prof	U. Amar Telidji de Laghouat

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents,

À ma petite famille

Et à tous mes amis.

Remerciement

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire d'études et développement des matériaux semi-conducteurs et diélectriques, LeDMaScD, Université Amar Telidji de Lagouat, sous la direction du Prof D. MAHI et Prof B. ZEGNINI, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour l'attention apportée pour l'élaboration de cette thèse, leurs aides précieuses, conseils, leur soutien permanent et pour tous leurs efforts.

Je suis très honoré de la présence de Monsieur T. SEGHIER, Professeur à l'Université Amar Telidji de Lagouat, qui a bien voulu présider le Jury de cette thèse.

Je voudrais exprimer mes remerciements à Monsieur A. HAMID, Professeur à C.U. El Bayadh, et à Monsieur H. LIDJICI, Professeur à L'université Amar Telidji de Lagouat, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements au Prof L. BOUKEZZI, Laboratoire de sciences des matériaux et informatique, LSMI, pour sa disponibilité durant toute la période de réalisation de ce modeste travail.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel des laboratoires LeDMaScD et LSMI pour leur collaboration et leur amabilité.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la concrétisation de ce modeste travail.

ملخص:

المواد الفعالة هي مجال تحول الطاقة، هذا التحول هو ناتج عن اقتران الظواهر الكهرومغناطيسية و الميكانيكية في هذه المواد. كما أن هذه المواد تشكل أساس التشغيل في التطبيقات التي تحتاج إلى تحويل الطاقة سواء في شكل محرك مغناطيسي- ميكانيكي (كهربائي- ميكانيكي) أو على شكل لاقط ميكانيكي- مغناطيسي (ميكانيكي- كهربائي). هذه التطبيقات بصفة عامة تستعمل عنصر فعال واحد. في حين أن الهندسة الجديدة في التصميم المعتمد على المواد الفعالة يمكن أن يجمع عدة عناصر فعالة، لاسيما المواد ذات التمدد المغنطيسي والتمدد الكهربائي. الجمع بين هذه المواد النشطة يقودنا إلى التأثير المقترن المسمى "التأثير المغنطيسوكهربائي". بمعنى إن المواد النشطة المغناطيسوضغطية تنتشوه تحت تأثير حقل مغناطيسي الذي ينتقل إلى المواد الكهروضغطية ويكون أصل القطبية الكهربائية فيها. والعكس صحيح، المواد الكهروضغطية تحت تأثير حقل كهربائي يمكن أن تغير مغنطة المواد المغناطيسوضغطية.

يشمل هذا العمل مساهمة في دراسة و محاكاة ظواهر الاقتران هذه في إطار طريقة العناصر المنتهية لاستطاعتها الكبيرة في الهندسيات المعقدة و سهولة استعمالها، من أجل تسهيل عملية تصميم و تحسين الأشكال. كما قمنا باستعمالها في ميدان تشخيص أعطاب المحركات الكهربائية الامتزازة كأول تطبيق.

الكلمات المفتاحية:

الكهروضغطية، المغناطيسوضغطية، الاقتران الكهروميكانيكي، الاقتران المغناطيسوميكانيكي، طريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد.

Résumé :

Les matériaux actifs sont le siège d'une conversion d'énergie. Cette conversion d'énergie résulte des couplages entre les propriétés électromagnétiques et mécaniques au sein de ces matériaux. Les matériaux actifs sont à la base du fonctionnement d'applications nécessitant soit une conversion de type actionneur magnétique-mécanique (électrique-mécanique) soit une conversion de type capteur mécanique-magnétique (mécanique-électrique). Ces applications emploient généralement un seul élément actif. Cependant, la conception de nouvelles architectures à base de matériaux actifs peut tirer partie d'une association d'éléments actifs, notamment de matériaux à magnétostriction géante et piézoélectriques. L'association de ces matériaux actifs conduit à un effet couplé appelé "effet magnéto-électrique". La présence d'un champ magnétique engendre une déformation du matériau magnétostrictif, qui, transmise au matériau piézoélectrique, est à l'origine d'une polarisation électrique. Inversement, un champ électrique dans un matériau piézoélectrique peut induire une modification de l'aimantation dans le matériau magnétostrictif.

Le présent travail consiste en une contribution à l'étude et la modélisation de ces phénomènes de couplage, dans le cadre de la méthode des éléments finis, puis nous les appliquâmes dans le domaine de diagnostic des machines électriques.

Mots clés :

Piézoélectricité, Magnétostriction, Couplage électromécanique, Couplage magnéto-mécanique, FEM 3D.

Abstract:

Active materials are the seat of energy conversion. This energy conversion results from the coupling between the electromagnetic and mechanical properties within these materials. The active materials are the basis of the operation of applications requiring either a magnetic-mechanical actuator type conversion (electrical-mechanical) or a mechanical-magnetic sensor type conversion (mechanical-electrical). These applications typically use a single active element. However, the design of new architectures based on active materials can benefit from a combination of active elements, including giant magnetostrictive materials and piezoelectric. The combination of these active materials leads to a coupled effect called "magneto-electric effect." The presence of a magnetic field causes a deformation of the magnetostrictive material, which, transmitted to the piezoelectric material, is at the origin of a polarization. Conversely, an electric field in a piezoelectric material may induce a change in the magnetization in the magnetostrictive material.

The present work consists of a contribution to the study and the modeling of these coupling phenomena, within the framework of the finite element method, and then we applied them in the field of diagnostic of electrical machines.

Keywords:

Piezoelectricity, Magnetostriction, Electromechanical Coupling, Magneto-Mechanical Coupling, FEM 3D.

Table des matières

Liste des Figures.....	I
Liste des Tableaux.....	I
Liste des symboles et abréviations.....	II
Introduction générale.....	3

Chapitre I

Piézoélectricité et la magnétostriction, état de l'art

Introduction.....	7
I.1 Phénomène de la piézoélectricité.....	7
I.1.1 Historique.....	7
I.1.2 Effets mis en œuvre dans les matériaux piézo-électrique.....	8
I.1.3 Mis en équations.....	10
I.1.3.1 Les notations utilisées.....	10
I.1.3.2 Les équations constitutives.....	11
a) Mise en évidence du couplage.....	11
b) Expression des contraintes et des déplacements.....	11
c) Fonctionnement quasi-statique.....	13
I.2 Phénomène de la magnétostriction.....	15
I.2.1 Historique.....	15
I.2.2 Le phénomène physique mis en jeu.....	16
I.2.2.1 Les forces de liaison.....	16
I.2.2.2 Aimantation des matériaux.....	17
I.2.2.3 Couplage magnéto mécanique.....	24
I.2.2.4 L'Hystérésis.....	26
I.2.2.5 Magnétostriction inverse.....	27
I.2.3 les principaux phénomènes de la magnétostriction.....	27
a) L'effet Joule longitudinal.....	27
b) L'effet Villari.....	28
c) Effet Joule transversal.....	29
d) Effet Wiedemann.....	29
e) Effet de variation de volume.....	29
f) Effet de variation du module d'Young ou effet ΔE	30

I.2.4 Les matériaux magnétostrictifs.....	31
I.2.4.1 Les métaux.....	32
I.2.4.2 Les terres rares.....	32
a) Température de Curie et magnétostriction.....	33
b) Matériaux amorphes.....	33
c) Alliages polycristallins et Terfenol-D.....	33
Conclusion.....	34

Chapitre II

Actionneurs à matériaux actifs, adaptatifs et intelligents

Introduction.....	36
II.1 Qu'est ce qu'un Actionneur?.....	36
II.2 Avantages économiques des actionneurs.....	36
II.3. Tendances d'évolution.....	37
II.4 Qu'est-ce qu'un matériau actif, adaptatif, "intelligent"?	38
II.4.1 Objectifs de la technologie.....	38
a) Contexte concurrentiel et économique.....	38
b) Exigences relatives aux nouveaux matériaux.....	39
II.4.2. Programmes de recherches.....	39
II.4.3. Recherche en nouveaux matériaux actifs.....	41
II.5. Actionneurs en Alliages à Mémoire de Forme (AMF).....	41
II.5.1. L'effet à Mémoire de Forme.....	41
II.6 Actionneurs piézoélectriques.....	44
II.6.1 L'effet piézoélectrique.....	45
II.6.2 Les actionneurs directs.....	45
II.6.3 Les Actionneurs amplifiés.....	46
II.6.4 Les actionneurs rotatifs piézoélectriques.....	47
a) Moteurs piézoélectriques à onde progressive.....	48
II.7 Actionneurs Magnétostrictifs.....	49
II.7.1 Matériaux magnétostrictifs.....	49
a) Applications ultrasonore et acoustique.....	51
b) Les actionneurs linéaires.....	54
II.7.2 Les moteurs/actionneurs magnétostrictifs.....	56
a) Les moteurs linéaires	56
b) Actionneurs et moteurs rotatifs.....	58

II.8 Notre Expérience.....	64
II.8.1 Optimisation magnétique d'un actionneur magnétostrictif linéaire monobloc.....	64
II.8.2 Etude et simulation d'un actionneur magnétostrictif spiral monobloc.....	65
Conclusion.....	66

Chapitre III

Méthode des éléments finis pour les comportements couplés

Introduction.....	68
III.1 Couplage électromécanique.....	68
III.1.1 Modèle numérique.....	71
III.1.2 Calcul des éléments de la matrice de rigidité.....	71
III.1.3 Application.....	72
a) Polarization de matériau.....	73
b) Conditions aux limites.....	73
c) Propriétés de matériau.....	74
III.1.4 Résultats.....	74
a) Étude stationnaire.....	75
b) Étude fréquentielle.....	78
III.2 Couplage magnéto-mécanique.....	80
III.2.1 Calcul des éléments de la matrice de rigidité.....	84
III.2.2 Application.....	86
III.2.2.1 Polarisation de matériau.....	87
III.2.2.2 Conductions aux limites.....	87
III.2.2.3 Propriétés de matériau.....	87
III.2.2.4 Résultats.....	88
Conclusion.....	89

Chapitre IV

Application : Détection des défauts de la machine asynchrone en utilisant les matériaux actifs, adaptatifs et intelligents

Introduction.....	91
IV.1 Description de la MAS étudiée.....	92
IV.2 Les Lois de comportements.....	92
IV.3 Formulation par éléments finis.....	93
IV.3.1 Magnétostriction dans le stator et le rotor.....	93

IV.3.2 Capteur piézoélectrique.....	94
IV.3.3 Bobinages statoriques.....	95
IV.3.4 Barres rotoriques.....	95
IV.3.5 Entrefer.....	96
IV.4 Résultats.....	96
IV.4.1 Défauts statoriques.....	96
IV.4.1 Défauts rototoriques.....	101
Conclusion.....	104
Conclusion générale.....	106
Références bibliographiques.....	109

LISTE DES FIGURES

Liste des Figures

Fig I. 1: Cristal possédant un centre de symétrie.....	8
Fig I. 2 : Cristal ne possédant pas de centre de symétrie. Le barycentre des charges se déplace, créant une polarisation P_0	8
Fig I. 3: Polarisation d'un morceau de céramique. Le champ E intense force les domaines à s'orienter selon une direction privilégiée	9
Fig I. 4 : Repère associé aux vecteurs contraintes et déformations	10
Fig I. 5: Description de l'élément étudié	13
Fig I. 6 : Allongement du barreau en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs d'effort.....	14
Fig I. 7 : Liaisons entre atomes	16
Fig I. 8 : Réseaux cristallins de Bravais	17
Fig I. 9 : Représentation de structures de matériaux	17
Fig I. 10 : Représentation schématique d'un atome.	18
Fig I. 11 : Structure de bandes d'énergie.....	18
Fig I. 12: Comportement d'un matériau diamagnétique placé dans un champ magnétique. ...	19
Fig I. 13 : Comportement d'un matériau paramagnétique placé dans un champ magnétique. ...	19
Fig I. 14 : Action combinée de la température et d'un champ extérieur sur un matériau paramagnétique (les vecteurs symbolisent les moments magnétiques atomiques).	20
Fig I. 15 : Comportement d'un matériau ferromagnétique dans un champ magnétique H, avec une perméabilité élevée.	21
Fig I. 16 : Répartition des moments magnétiques élémentaires : (a) ferromagnétiques, (b) antiferromagnétiques et (c) ferrimagnétiques.....	21
Fig I. 17 : Représentation théorique de la variation thermique de la magnétisation spontanée M_s dans un matériau ferromagnétique simple (les bulles illustrent l'effet de l'agitation thermique sur les moments).....	22
Fig I. 18 : Domaines magnétiques dans une substance ferromagnétique. Dans chaque domaine, les moments magnétiques atomiques tendent à être alignés. Les parois séparant les domaines sont des zones de moments atomiques non-alignés.	23
Fig I. 19 : Rotation de l'aimantation.	23
Fig I. 20 : Déplacements des parois de Bloch sous l'action d'un champ magnétique extérieur (Si le champ magnétique appliqué est suffisamment intense, un seul domaine occupera tout le matériau).....	24
Fig I. 21 : Magnétostriction due à la forme non sphérique du nuage électronique du matériau.	25
Fig I. 22 : Illustration de la magnétostriction parallèle et perpendiculaire due à une aimantation appliquée suivant un angle θ	26
Fig I. 23 : Cycles d'hystérésis d'élongation en fonction du champ appliqué.....	27
Fig I. 24 : Effet Joule longitudinal de quelques métaux et alliages métalliques en fonction du champ magnétique appliqué H_a	28
Fig I. 25: Illustration des principaux effets magnétostrictifs.....	29
Fig I. 26 : Effet de flexion	30
Fig I. 27: Structure du nuage 4f de quelques Terres Rares.....	32
Fig II. 1.: Illustration de l'Effet à Mémoire de Forme.	42

Fig II. 2: Micro-actionneur AMF linéaire du LAB, Ø 10mm, L 22mm, vitesse de déplacement # 2 mm/s. Micro-robot mobile permettant l'exploration et l'inspection de canalisations de faible diamètre de l'ordre de 8 à 15 mm.	42
Fig II. 3: Actionneur MSM linéaire d'Adaptamat ©, course # 0.6mm, Force bloquée # 3N, F_{max} 300Hz, M= 60g.	43
Fig II. 4: Actionneurs piézoélectriques linéaires standard [20].	46
Fig II. 5: Illustrations d'actionneurs piézoélectriques amplifiés [20].	46
Fig II. 6: Principe d'un moteur piézoélectrique ultrasonore.	47
Fig II. 7: RPM de type roller Tableau II. 3: Résultats expérimentaux d'un RPM.	48
Fig II. 8 Moteurs piézoélectriques à onde progressive de la gamme Shinsei USR : diamètre 60mm.	48
Fig II. 9: Représentation de l'effet bilame sur un micro relais bistable [24].	50
Fig II. 10: Exemples d'applications ultrasonores [14].	52
Fig II. 11: Utilisation de matériaux magnétostrictifs dans le domaine acoustique [14].	53
Fig II. 12: Dispositif magnétostrictif pour forage des puits de pétrole [14].	53
Fig II. 13: Réduction de bruit et de vibrations dans les véhicules de tourisme.	54
Fig II. 14: Exemples d'actionneurs linéaires magnétostrictifs [14].	54
Fig II. 15: Actionneur linéaire, dimensions de l'actionneur: Ø 5 cm, L 10 cm, allongement 100 μ m [20]	54
Fig II. 16: Vue en coupe d'un actionneur linéaire magnétostrictif classique.	56
Fig II. 17: Moteur Kiesewetter (début d'un cycle d'allongement local)	57
Fig II. 18: Visualisation d'une progression d'onde de déplacement du moteur Kiesewetter.	58
Fig II. 19: Vue en coupe du moteur Anatas.	59
Fig II. 20: Moteur de Clark, brevet déposé par la Navy - vue de face -	60
Fig II. 21: Moteur de Clark - vue de profil -	60
Fig II. 22: Moteur magnétostrictif à encoches de Macabee.	61
Fig II. 23: Moteur de Vranish , brevet déposé par la NASA - vue en coupe de dessus -	62
Fig II. 24: Moteur de Vranish : (a) vue latérale (b) vue de la partie active	63
Fig II. 25: Moteur hybride magnétostrictif/piézoélectrique.	64
Fig II. 26. (a) Premier Prototype (b) Deuxième Prototype (c) Prototype Final.	64
Fig II. 27: (a) Prototype (b) Surface Induction magnétique (c) Arc d'induction	66
Fig III. 1 : Géométrie de modèle	73
Fig III. 2 : Conditions aux limites	74
Fig III. 3 : Potentiel électrique appliqué aux bornes de la poutre.	75
Fig III. 4 : la forme de déformation avec le déplacement totale sous une différence de potentiel de 200 V (polarisation z-axe)	75
Fig III. 5 : Forme déformée et déplacement total dû à un différence de potentiel de 200 V (l'axe des coordonnées est polarisé).	76
Fig III. 6 : Variation du déplacement total en fonction de la tension appliquée.	77
Fig III. 7 : Variation du déplacement total en fonction de la fréquence d'alimentation en tension.	78
Fig III. 8 : Variation du déplacement total en fonction de la fréquence pour différentes tensions appliquées	79
Fig III. 9 : Tracé de déflexion obtenu avec "FEM3DPIE"	80
Fig III. 10 : Tracé de déflexion obtenu avec COMSOL-Multiphysics.	80
Fig III. 11 : Algorithme du processus itératif de résolution en couplage faible	81
Fig III. 12 : Algorithme du processus itératif de résolution en couplage fort	81
Fig III. 13 : Géométrie de modèle	86
Fig III. 14 : Conditions aux limites	87

Fig III. 15 : la forme de déformation, la poutre alignée selon l'axe (OX)	88
Fig III. 16 : la forme de déformation, la poutre alignée selon l'axe (OZ)	88
Fig III. 17 : la forme de déformation, la poutre alignée selon l'axe (OY)	88
Fig IV. 1 Géométrie de la machine	92
Fig IV. 2 L'effet d'incorporation de l'actionneur piézoélectrique dans la machine	96
Fig IV. 3 : Distribution de la densité de flux magnétique dans le stator	97
Fig IV. 4 : Déplacement total dans le stator	97
Fig IV. 5 : Position des capteurs dans le stator	97
Fig IV. 6 : Déplacement u selon l'axe (ox) dans le stator	98
Fig IV. 7 : Déplacement v selon l'axe (oy) dans le stator	98
Fig IV. 8 : Distribution de potentiel électrique dans le capteur	99
Fig IV. 9 : Potentiel électrique aux bornes de capteur en fonction de temps où la machine est saine	99
Fig IV. 10 : Tensions obtenues dans les différents défauts statorique.	100
Fig IV. 11 : Densité de flux magnétique dans le rotor.	101
Fig IV. 12 : Déplacement total dans le rotor	101
Fig IV. 13 : Position des capteurs dans le rotor	101
Fig IV. 14 : Déplacement u selon l'axe (ox) dans le rotor	102
Fig IV. 15 : Déplacement v selon l'axe (oy) dans le rotor	102
Fig IV. 16 : Distribution de potentiel électrique dans le capteur	102
Fig IV. 17 Tensions obtenues dans les différents défauts rotorique en fonction de temps. ...	103
Fig IV. 18 : Lignes du flux pour une machine (a) saine (b) présence d'une barre cassée	104

LISTE DES TABLEAUX

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : Exemples de matériaux en fonction de la température de Curie T_c , au-dessus de laquelle ils perdent leur propriété ferromagnétique.....	22
Tableau I. 2 : valeurs de $\Delta E/E_0$ et du champ statique appliqué H_a pour quelques matériaux..	31
Tableau I. 3: Valeurs de λ_s et T_c	33
Tableau I. 4: Caractéristiques élastiques d'alliages polycristallins [12].....	34
Tableau II. 1: Axes directeurs du développement des actionneurs et technologies associées [13]	37
Tableau II. 2: Caractéristiques du MSM [13].....	44
Tableau II. 3: Résultats expérimentaux d'un RPM.....	48
Tableau II. 4: Caractéristiques classiques d'un dispositif ultrasonore [14].	52
Tableau II. 5: Liste partielle d'applications industrielle.	55
Tableau II. 6: Caractéristiques pour des actionneurs de diamètres de 30 à 50 mm et des longueurs de 80 à 200 mm [14].....	56
Tableau II. 7 : Les forces obtenues dans les différents prototypes (Newton)	65
Tableau III. 1 : Coefficients de matériau PZT-5H.....	74
Tableau III. 2: validation des résultats par COMSOL-Multiphysics.....	79
Tableau III. 3: Coefficients de matériau (fer-co 50%) [13].....	87

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Liste des symboles et abréviations

- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: Cosinus directeurs avant l'application de la contrainte
 \vec{B} : Vecteur d'induction magnétique
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Cosinus directeur de la déformation
 E : Module d'Young apparent
 E^B : Module d'Young apparent à induction constant
 E^H : Module d'Young apparent à champ magnétique constant
 ϕ : Flux magnétique
 G : Fonction d'enthalpie libre volumique du système
 \vec{H} : Vecteur du champ magnétique
 H_{sat} : champ de saturation magnétique
 K : Coefficient de couplage magnéto-mécanique
 k : Coefficient de couplage magnéto-mécanique
 P_o : Polarisation électrique
 Q : La quantité de charge électrique
 $\mathfrak{R}_1 = (o, x_1, x_2, x_3)$: Repère orthonormé direct
 \vec{S} : Vectrice déformation
 S_e : Section droite du barreau
 \vec{T} : Vecteur contrainte
 $\vec{U} = \overline{MM'}$ Le vecteur déplacement de coordonnées (u, v, w)
 W_{ms} : L'énergie magnétique stockée dans le noyau
 W_{me} : Densité d'énergie magnéto-élastique
 $\Delta L/l$: Déformation relative totale
 $(\Delta l/l)_{el}$: Déformation élastique
 $(\Delta l/l)_m$: Déformation magnétique
 λ_{100} : Constantes relatives au matériau suivant les directions de l'aimantation à saturation parallèle à l'axe [100]
 λ_{111} : Constantes relatives au matériau suivant les directions de l'aimantation à saturation parallèle à l'axe [111].
 μ : Perméabilité de matériau
 μ_r : Perméabilité relative du milieu considéré

μ_0 : Perméabilité du vide

Ω : Domaine de résolution.

C_{ij} : coefficients d'élasticité.

d_{ij} : coefficients de la contrainte piézoélectrique.

ε_{ij} : coefficients de la permittivité électrique.

u : déplacement selon l'axe (ox).

v : déplacement selon l'axe (oy).

w : déplacement selon l'axe (oz).

L : Longueur de la poutre.

V : différence de potentiel.

h : épaisseur de la poutre.

g_{15} : constant de couplage électromécanique.

K^u : matrice de rigidité magnétique.

K^q : matrice de rigidité de couplage magnéto-mécanique.

K^{cm} : matrice de rigidité mécanique.

ϵ : Déformation.

σ : contrainte.

ε^σ : tenseur de permittivité électrique de matériau sous une contrainte mécanique constante.

e : tenseur de couplage électromécanique sous une contrainte et un champ électrique données.

s^E : Tenseur d'élasticité mécanique sous un champ électrique constant.

CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

Publications Internationals

- A. Regaz, B. Zegnini, D. Mahi, L. Boukezzi**, “Static and harmonic behavior of piezoelectric beam bending actuators”, in *Electrotechnica, Electronica, Automatica, (EEA)*, 2017, Vol. 65, no. 4, pp. 30-36, ISSN 1582-5175.
- A. Regaz, B. Zegnini, D. Mahi, L. Boukezzi**, “detection of faults in the asynchronous machine by the use of smart materials”, in *Diagnostyka*, (en cours).

Communications Internationals

- A. Regaz, L. Boukezzi, B. Zegnini, D. Mahi**, “Contribution to the study of piezoelectric beam bending actuator in harmonic mode”. 5th International Conference on Electrical Engineering (ICEE-B), pp 1-5, 2017.
- A. Regaz, L. Boukezzi, B. Zegnini, D. Mahi**, “ Contribution to the study of piézo-magnetic materials”. 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE-B), pp 1-4, 2015.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le vingtième siècle a vu le vecteur d'électricité se répandre au point de devenir indispensable au fonctionnement de notre vie quotidienne et nos sociétés. Le développement des dispositifs électromagnétiques de façon de plus en plus intensive nécessite l'emploi de matériaux de plus en plus performants. Ainsi, la maîtrise des pertes d'énergie dans les machines électriques, ou la réduction de la masse des matériels électriques dans les systèmes embarqués, passe par un choix adéquat des matériaux utilisés pour leur fabrication.

Les principaux éléments constitutifs des dispositifs électromagnétiques sont les matériaux diélectriques et ferromagnétiques. La déformation de magnétostriction (d'électrostriction) apparaissant à l'application d'un champ magnétique (électrique). Ces déformations spontanées sont intrinsèques à ces matériaux. Bien que de faible amplitude, ces déformations sont généralement nuisibles au fonctionnement des dispositifs électromagnétiques. On sait par exemple que la déformation de magnétostriction est l'une des sources du bruit émis par les machines électriques, en particulier les transformateurs, dans la pratique, un élément magnétostrictif soumis à un champ magnétique longitudinal s'allonge sous l'effet des contraintes magnéto-mécaniques induites, c'est l'effet Joule. Dans les moteurs et les transformateurs, cela donne naissance à des vibrations des carcasses.

Pour certains matériaux, les déformations induites par les champs électromagnétiques peuvent atteindre des amplitudes considérables (de l'ordre de 10^{-3}). C'est le cas notamment de certaines céramiques piézoélectriques et de certains alliages de terres rares et de métaux de transition, communément appelés matériaux à magnétostriction géante. Ces matériaux sont appelés matériaux actifs, car ils sont le siège d'une conversion d'énergie. Cette conversion d'énergie résulte des couplages entre les propriétés électromagnétiques et mécaniques au sein de ces matériaux. Les matériaux actifs sont à la base du fonctionnement d'applications nécessitant soit une conversion de type actionneur magnétique-mécanique (électrique mécanique) soit une conversion de type capteur mécanique-magnétique (mécanique-électrique). Ces applications emploient généralement un seul élément actif. Cependant, la conception de nouvelles architectures à base de matériaux actifs peut tirer partie d'une association d'éléments actifs, notamment de matériaux à magnétostriction géante et piézoélectriques. L'association de ces matériaux actifs conduit à un effet couplé appelé "Effet Magnéto-Électrique". La présence d'un champ magnétique engendre une déformation du

matériau magnétostrictif, qui, transmise au matériau piézoélectrique, est à l'origine d'une polarisation électrique. Inversement, un champ électrique dans un matériau piézoélectrique peut induire une modification de l'aimantation dans le matériau magnétostrictif.

La conception d'une nouvelle génération de structures actives utilisant cet effet demande le développement de modèles de comportement fiables, ainsi que d'outils de modélisation robustes pour la résolution des problèmes couplés dans le but d'optimiser ces structures. L'étude présentée ici concerne ce couplage magnéto-électrique résultant d'une association de matériaux magnétostrictifs et piézoélectriques. L'objectif consiste à obtenir un modèle magnéto-électrique capable de rendre compte de ces effets de couplage. On verra que ce modèle consiste à obtenir la formulation de problèmes magnéto-mécanique et électromécanique résolue simultanément par une méthode numérique basée sur les éléments finis.

Dans ce contexte, le présent travail met l'accent sur le diagnostic des défauts statoriques et rotoriques dans le moteur asynchrone. En effet, ces défauts, considérés isolés ou combinés, sont localisés et détectés en exploitant le comportement magnétique (diélectrique) des matériaux actifs. Cette proposition n'est pas possible sans modélisation fiable de couplage des Multi-physiques.

Dans notre étude nous avons adopté la démarche suivante. Elle est reflétée par les quatre chapitres constituant cette thèse :

Dans le premier chapitre nous présenterons les propriétés des matériaux actifs tels que les matériaux piézoélectriques et les matériaux magnétostrictifs.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents types des actionneurs actifs et les différents astuces et technologies utilisées dans leurs conceptions. Ainsi, notre expérience dans ce domaine.

Dans le troisième chapitre, nous avons implémenté ces lois des comportements dans un code de calcul puis nous avons validé ce dernier par la solution analytique dans le cas de régime statique et par le logiciel commercialisé Comsol-Multiphysics dans le cas de régime harmonique.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons les résultats de notre proposition d'exploitation des matériaux actifs dans le domaine de diagnostic des machines électriques.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et perspective.

CHAPITRE I

**Piézoélectricité et la magnétostriction,
état de l'art**

Introduction

Pour créer un déplacement linéaire à entraînement direct, des actionneurs utilisent la propriété physique que possèdent certains matériaux, appelés matériaux actifs à se déformer sous l'effet d'un gradient d'énergie externe. Parmi ces matériaux, on trouve les céramiques piézoélectriques, les matériaux électrostrictifs, les matériaux magnétostrictifs, les alliages à mémoire de forme (AMF) thermiques ou magnétiques et les polymères électro-actifs.

Ce chapitre a pour but d'exposer d'une façon générale les différents aspects liés aux matériaux actifs. Nous définissons les phénomènes piézoélectricité et magnétostriction à travers leurs lois de comportement, nous donnons plusieurs rappels sur l'électricité, le magnétisme et la structure des matériaux afin de permettre une bonne compréhension des effets impliqués.

I.1 Phénomène de la piézoélectricité

I.1.1 Historique

Les qualités piézo-électriques du quartz furent pressenties au milieu du *XIX*^e siècle à la suite des travaux précurseurs de l'abbé *René Just Haüy*. Ce fondateur de la cristallographie a en effet par ses observations de la matière (étude systématique de la morphologie générale des cristaux) apporté de grandes connaissances au niveau de la géométrie atomique des cristaux et participé à en déterminer des lois structurales.

" L'effet direct " de la piézo-électricité sera mis en évidence par *Pierre Curie* et son frère *Paul Jacques Curie* à Paris en 1880 ; le mot piézo-électrique tiré du grec " piézo " veut dire pression.

Cette découverte attira immédiatement l'attention des scientifiques : le français *Gabriel Lippmann* (1845-1921, Prix Nobel de physique en 1908 et inventeur de la photographie couleur) démontra de son côté quelques années plus tard que le phénomène était réversible ; ainsi si des signaux électriques sont appliqués sur le cristal, celui-ci se dilate et se contracte dans une certaine direction, sa résonance mécanique favorisant les vibrations à une certaine fréquence. C'est grâce à cette dernière propriété que le quartz a atteint une telle notoriété.

Wilhelm Gottlieb Hankel, *William Thomson* (lord Kelvin) et surtout *Woldemar Voigt* participèrent de cette connaissance et la théorie du phénomène était à la fin du *XIX*^e siècle presque complètement établie.

C'est lors de la guerre de 1914-1918 que la piézo-électricité entra dans les champs des applications pratiques avec Paul Langevin et l'apparition du sonar. Le premier oscillateur

électronique stabilisé par un cristal de quartz sera réalisé par *Walter G. Cady* en 1918. Ce dernier établit le schéma électrique équivalent du résonateur piézo-électrique. L'utilisation de l'électronique associée à ces effets piézo-électriques permet la génération de fréquences électriques, donc d'échelles de temps, extrêmement stables ; c'est ainsi que dans les années trente les irrégularités de rotation de la Terre ont pu être démontrées.

Cette famille de matériaux comporte en son sein un couplage électro-élastique fort. Ce couplage, qui n'a lieu que dans certains réseaux cristallins non axisymétriques est décrit par une série d'équations locales, appelées équations constitutives de la piézo-électricité.

I.1.2 Effets mis en œuvre dans les matériaux piézo-électrique

L'effet piézo-électrique direct traduit l'aptitude de quelques matériaux à se polariser sous l'application d'un effort mécanique, la charge électrique apparaissant à leur surface étant proportionnelle à la contrainte exercée.

Ce phénomène est réversible, c'est à dire qu'il est possible d'obtenir pour ces mêmes matériaux des déformations lorsqu'on les soumet à un champ électrique : c'est l'effet inverse.

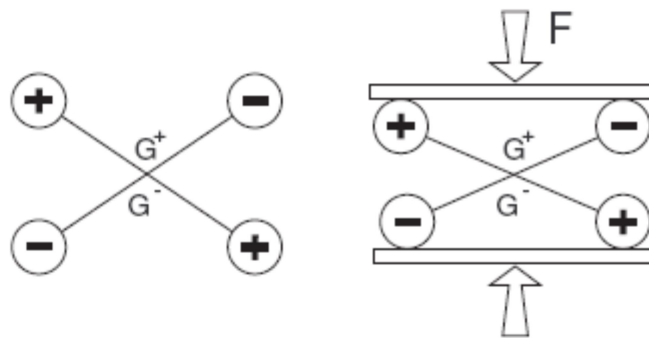


Fig I. 1: Cristal possédant un centre de symétrie

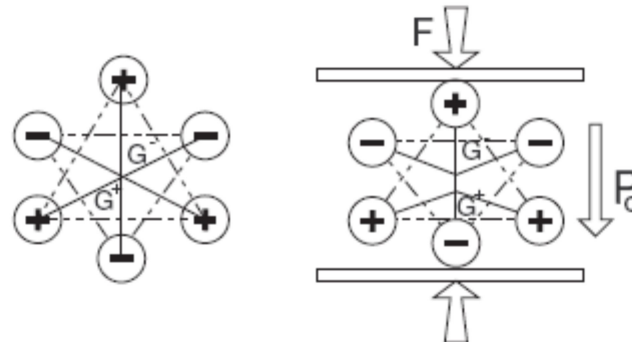


Fig I. 2 : Cristal ne possédant pas de centre de symétrie. Le barycentre des charges se déplace, créant une polarisation P_0 .

Tous les matériaux ne sont pas piézo-électriques, et seuls les cristaux ne présentant pas de centre de symétrie en possèdent les caractéristiques. Il en résulte d'ailleurs un axe privilégié d'apparition des charges électriques qui est appelé direction de polarisation. Ceci est illustré Fig(I.1) et (I.2).

Dans le premier cas Fig(I.1) le cristal est Centro-symétrique et l'application d'une contrainte, si elle engendre une déformation du matériau n'induit pas de déplacement des barycentres positif et négatif, si bien qu'aucune polarisation n'apparaît.

Dans le second cas, Fig(I.2), la déformation entraîne un déplacement des barycentres, et une polarisation électrique P_o apparaît alors.

De tels solides sont peu nombreux à l'état brut, le plus connu étant le Quartz. Mais on rencontre depuis les années quarante des matériaux piézo-électriques de synthèse, sous forme de céramique.

En réalité, qu'ils soient d'origine synthétique ou naturelle, ces matériaux ne présentent que peu ou pas de polarisation naturelle à l'échelle macroscopique. En effet, le matériau ne peut pas être homogène, mais est constitué de grains ; et si on étudie une vue en coupe d'une céramique par exemple, on voit apparaître des domaines dont la polarisation occupe une direction propre, mais différente des domaines voisins. A l'état naturel, les polarisations sont orientées de manière aléatoire, et leur somme est nulle. C'est pourquoi, le processus de fabrication de ces matériaux doit faire apparaître une phase de polarisation. Pour cela, on soumet l'échantillon à un champ électrique intense (de l'ordre du $kV.mm^{-2}$), forçant les domaines à s'orienter selon une direction privilégiée. Les grains aux polarisations aléatoires donnent un caractère fortement anis-tropique à la matière, si bien que les caractéristiques dépendent de la direction d'application des champs ou des efforts extérieurs.

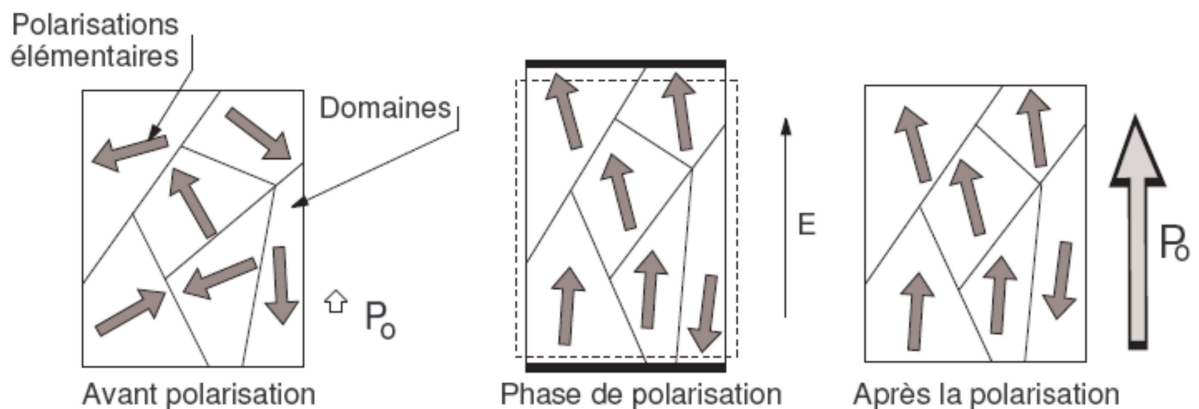


Fig I. 3: Polarisation d'un morceau de céramique. Le champ E intense force les domaines à s'orienter selon une direction privilégiée

I.1.3 Mis en équations

I.1.3.1 Les notations utilisées

Nous définissons un repère orthonormé direct $\mathcal{R}_I = (0, x_1, x_2, x_3)$ tel que défini Fig I.4.

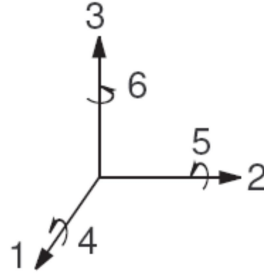


Fig I. 4 : Repère associé aux vecteurs contraintes et déformations

En plus de ces trois axes principaux, on rajoute trois axes de rotation (x_4, x_5, x_6) qui porteront les composantes des rotations autour de ces axes.

Dans ces conditions, le vecteur contrainte T aura pour coordonnées $T = (T_1, T_2, \dots, T_6)$. On peut s'interroger sur la présence des termes T_4, T_5 et T_6 dans un espace à trois dimensions, mais en général, *dans nos applications*, il n'y a pas de rotation si bien qu'ils seront souvent nuls.

Sous l'action de ces contraintes, un point M de coordonnées (x, y, z) du barreau avant déformation se déplace en M' ; on appelle alors $\vec{U} = \overline{MM'}$ le vecteur déplacement de coordonnées (u, v, w) .

On appelle déformation le déplacement relatif dans un milieu. Déplacement et déformation sont liés par l'ensemble d'équations suivant :

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\partial u}{\partial x} & S_2 &= \frac{\partial v}{\partial y} & S_3 &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ S_4 &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & S_5 &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & S_6 &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (\text{I.1})$$

Les équations constitutives donnent le lien entre contrainte, déplacement et champ électrique.

Le champ électrique, tel qu'il est défini dans le cours d'électricité, n'aura que trois composantes spatiales $E = (E_1, E_2, E_3)$.

Enfin, le déplacement électrique, lui aussi, sera défini par ses trois composantes $D = (D_1, D_2, D_3)$. Par définition, la quantité de charge Q contenu à l'intérieur d'un volume délimité par la surface fermée S s'exprime par $Q = \int_S D dS$.

I.1.3.2 Les équations constitutives

a) Mise en évidence du couplage

Dans les matériaux piézo-électriques soumis conjointement à un processus de déformation mécanique (énergie mécanique stockée) et de polarisation électrique (énergie électrique stockée), vient s'ajouter un terme propre à l'énergie de couplage électromécanique. Si bien que pour des conditions de température constante et pour un échantillon isotherme, homogène et sans champ magnétique appliqué, la fonction d'enthalpie libre volumique du système prend la forme :

$$G = -\frac{1}{2} s^E . T . T^* - d . T . E - \frac{1}{2} \varepsilon^T . E . E^* \quad (I.2)$$

b) Expression des contraintes et des déplacements

De l'expression (I.2), nous pouvons déduire aisément, par différenciation, les équations constitutives de la piézo-électricité :

- Pour les composantes du vecteur contraint

$$S_i = - \left. \frac{\partial G}{\partial T_i} \right|_E = s_{ij}^E T_j + E_k d_{ki} \quad i, j \in \{1 \dots 6\} \quad k \in \{1 \dots 3\} \quad (I.3)$$

- Pour les composantes du déplacement électrique

$$D_k = - \left. \frac{\partial G}{\partial E_k} \right|_T = d_{ki} T_i + \varepsilon_{ki}^T E_i \quad i, j \in \{1 \dots 6\} \quad k \in \{1 \dots 3\} \quad (I.4)$$

Ces équations peuvent se mettre sous une forme matricielle, plus simple à manipuler

$$\begin{aligned} S &= s^E T + d^t E \\ D &= d T + \varepsilon^T E \end{aligned} \quad (I.5)$$

Les matrices s^E , d et ε^T sont des paramètres du matériau utilisé. Elles adoptent des formes particulières, justement à cause de l'effet piézo-électrique. Dans le cas particulier d'une polarisation selon l'axe x_3 , ces matrices prennent les formes suivantes :

$$S^E = \begin{pmatrix} S_{11}^E & S_{11}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{11}^E & S_{11}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E \end{pmatrix} \quad (\text{I.6})$$

$$\varepsilon^T = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{pmatrix} \quad (\text{I.7})$$

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{I.8})$$

Ces équations ne permettent pas d'appréhender de manière simple le comportement physique d'un matériau piézo-électrique. A cette fin, nous allons prendre l'exemple d'un barreau de céramique PZT et décrire qualitativement et quantitativement ses réactions face à une alimentation électrique.

Coefficient de couplage :

Dynamiquement, le coefficient de couplage d'une céramique caractérise son aptitude à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement.

Il est défini par :

$$k^2 = \frac{\text{énergie transformée}}{\text{énergie apportée}} \quad (\text{I.9})$$

Suivant la forme de l'éprouvette et le mode de vibration de celle-ci, ce coefficient peut prendre différentes valeurs :

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T S_{33}^E} \quad (\text{I.10})$$

Pour la vibration des pièces épaisses suivant la direction de polarisation égale à 40%

Pour le T57 et 65% pour le P189 .

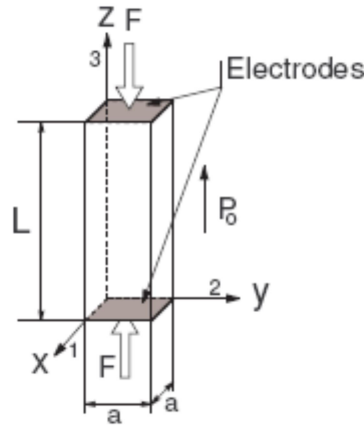


Fig I. 5: Description de l'élément étudié

c) Fonctionnement quasi-statique

Considérons le système décrit Fig I.5 formé d'un barreau de céramique PZT de longueur L et de section carrée axa , encastré en $x = 0$, $y = 0$ et $z = 0$. Les caractéristiques du matériau le constituant sont données par les relations (I.6), (I.7) et (I.8). Un effort F comprime le barreau dans la direction z , et deux électrodes métalliques sont collées sur ses deux faces extrêmes. Lorsqu'on applique une tension V aux bornes des électrodes, le barreau se déforme, et nous allons calculer A_L son allongement selon l'axe z . Dans l'hypothèse où cet allongement est faible, le vecteur champ électrique s'exprime simplement en fonction de V :

$$E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 = V/L \end{pmatrix} \quad (\text{I.11})$$

Nous faisons l'hypothèse d'un régime quasi-statique, c'est à dire que les variations des sollicitations extérieures au système en fonction du temps sont pratiquement nulles, si bien que l'on néglige les effets dynamiques. Alors, l'écriture du tenseur de cohésion pour une section de barreau, fait apparaître que le vecteur contrainte est donné par :

$$T = \left(0, 0, T_3 = -\frac{F}{a^2}, 0, 0, 0 \right)^t \quad (\text{I.12})$$

Grâce à l'équation (I.5), il est possible d'explicitier la vectrice déformation :

$$S = \left(s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3, s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3, s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3, 0, 0, 0 \right) \quad (\text{I.13})$$

Si bien que l'on peut écrire que :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial x} &= s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \\
\frac{\partial v}{\partial x} &= s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \\
\frac{\partial w}{\partial x} &= s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3
\end{aligned}
\tag{I.14}$$

La solution générale de ce système est donnée par :

$$\begin{aligned}
u(x, y, z) &= (s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3)x + U_0(y, z) \\
v(x, y, z) &= (s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3)x + V_0(y, z) \\
w(x, y, z) &= (s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3)x + W_0(y, z)
\end{aligned}
\tag{I.15}$$

Sous force et champs nuls, le barreau est à l'état libre, et le vecteur déplacement doit par définition être aussi nul. D'autre part, les conditions d'encastrement permettent d'écrire que les déformations sont nulles en $x = 0$, $y = 0$ et $z = 0$.

On montre alors que les constantes d'intégration sont nulles, et l'allongement A_L est donné par:

$$\begin{aligned}
A_L &= w(z = L) \\
&= (s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3) L \\
&= -\frac{s_{33}^E L}{a^2} F + d_{33} V
\end{aligned}
\tag{I.16}$$

Nous avons tracé FigI.6l'évolution de l'allongement A_L en fonction de la tension appliquée V pour différentes valeurs de F . Ces courbes sont des droites si les divers coefficients des matrices d et SE sont constants ; en réalité ce n'est pas le cas, et un phénomène d'hystérésis apparaît.

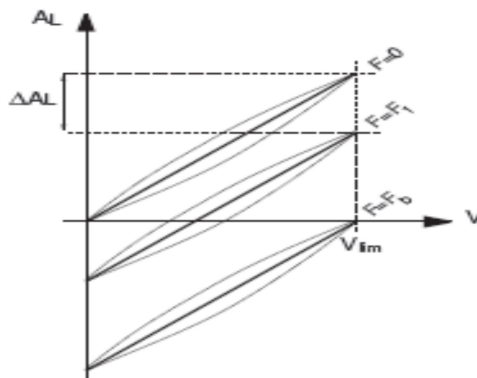


Fig I. 6 : Allongement du barreau en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs d'effort

Le comportement du barreau est comparable à celui d'un piston hydraulique ou pneumatique, la pression du fluide étant analogue à la tension appliquée : à force nulle, le piston se déploie. A pression constante, si on vient le charger par un effort F , l'allongement diminue. Dans le cas d'un barreau piézoélectrique cette diminution ΔA_L d'allongement à tension constante est donnée par l'équation :

$$\Delta A_L = - \frac{s_{33}^E L}{a^2} \Delta F$$

(I.17) Compte tenu des propriétés diélectriques du matériau, on doit veiller à ne pas dépasser une tension maximum notée V_{lim} . Il existe alors une force de blocage F_b , telle que le déplacement est nul sous V_{lim} :

$$F_b = \frac{d_{33}}{s_{33}^E L} a^2 V_{lim}$$

(I.18) Ainsi, un barreau de section $6 \times 6 \text{ mm}$ et de longueur 9 mm présente un allongement de $4.5 \mu\text{m}$ sous $V_{lim} = 1000 \text{ V}$. Ces déplacements sont faibles, mais la force bloquée F_b est considérable, car elle vaut 1200 N .

I.2 Phénomène de la magnétostriction

I.2.1 Historique

La magnétostriction est un phénomène connu depuis longtemps. Elle est l'une des caractéristiques les plus importantes des matériaux magnétiques. Au début, son exploitation était relativement limitée à cause de l'effet magnétostrictif faible des matériaux découverts jusque là. Ces derniers ont vu ensuite la marginalisation avec l'apparition des céramiques piézoélectriques qui présentaient déjà de grands projets aux yeux des chercheurs. Grâce à l'essor qu'a connu la métallurgie, de nouveaux alliages (terre rare-fer) dotés d'une magnétostriction dite géante détrônant ainsi les piézoélectriques, a vu le jour. Ces alliages aux propriétés spectaculaires, étant principalement le METGLAS 2605 SC et le Terfenol-D étaient, par conséquent, à l'origine d'une grande avancée dans la recherche consacrée à l'exploitation de leurs éminents avantages, et ont, par la suite, permis l'élargissement considérable du champ d'application de la magnétostriction d'où l'humanité ne cesse de tirer profit aujourd'hui.

En 1842, le physicien anglais Joule découvrit qu'un barreau de fer soumis à un champ magnétique s'allongeait suivant la direction du champ appliqué. Cet effet est analogue à celui

de la traction mécanique. Joule lui donna le nom de la magnétostriction. Certains matériaux, sous l'effet d'un champ magnétique, subissent non seulement des dilatations ou des contractions mais encore des flexions des torsions, des modifications de densité jusqu'à aller à des variations de leur module d'Young.

La magnétostriction se présente comme l'ensemble des relations liant les propriétés magnétiques d'un corps à ces propriétés mécaniques. Dans ce chapitre, Nous nous étalerons sur les principaux phénomènes magnétostrictifs. Ensuite, Nous parlerons des divers matériaux magnétostrictifs en évoquant leurs propriétés fondamentales à savoir le coefficient de magnétostriction λ , le coefficient de magnétostriction à saturation λ_s et le coefficient de couplage magnéto-mécanique k_{33} .

I.2.2 Le phénomène physique mis en jeu

D'une façon générale, la magnétostriction représente l'ensemble des relations et des phénomènes qui lient les propriétés magnétiques aux propriétés mécaniques des matériaux.

Dans ce paragraphe nous exposons les principes de base de la science des matériaux afin d'expliquer le phénomène magnétostrictif, puis nous détaillons les différentes manifestations observables.

I.2.2.1 Les forces de liaison

Les atomes isolés s'associent pour former des solides grâce à la diminution d'énergie accompagnant la formation de liaisons.

Dans les métaux et alliages, les électrons de valence extérieurs de chaque atome forment un nuage d'électrons libres, ou gaz, qui s'étend dans tout le réseau. Ainsi ces électrons ont la capacité de répondre rapidement à toute sollicitation électrique, thermique ou magnétique. Et c'est là que l'on va trouver le couplage magnéto-mécanique fort.

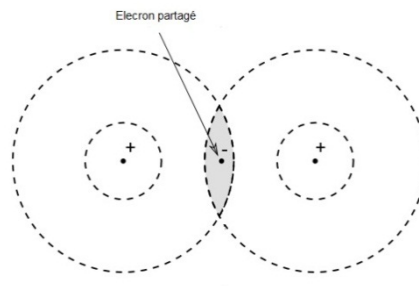


Fig I. 7 : Liaisons entre atomes

La plupart des métaux possèdent une structure cristalline interne ordonnée, qui peut être imaginée comme un treillis tridimensionnel de points présentant des symétries géométriques importantes.

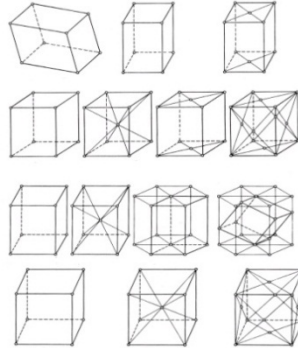


Fig I. 8 : Réseaux cristallins de Bravais

Dans certains matériaux, l'ordre géométrique caractéristique des solides cristallins n'est pas respecté. Ainsi les matériaux amorphes, les composés inorganiques et les polymères présentent des positions atomiques aléatoires.



Fig I. 9 : Représentation de structures de matériaux

La température joue un rôle important pour la structure des matériaux, ainsi que pour leurs propriétés magnétiques. Si la plupart des métaux ne peuvent s'obtenir sous forme amorphe, certains alliages de métaux peuvent l'être par des trempes de refroidissement très rapide. Des problèmes de transfert de chaleur ne permettent d'obtenir de tels matériaux que sous forme de poudres ou de rubans de quelques centièmes de millimètres d'épaisseur. Ainsi, dans le cas des matériaux magnétostrictifs en couche mince, il est possible d'obtenir soit une structure ordonnée cristalline, soit une structure amorphe, selon le procédé de fabrication [1].

I.2.2.2 Aimantation des matériaux

Au niveau atomique, il existe deux causes d'aimantation d'un matériau:

- ◆ Les mouvements orbitaux : l'électron (chargé) qui tourne autour d'un noyau crée un moment magnétique (Magnéton de Bohr) : petite boucle de courant élémentaire.
- ◆ Le moment de Spin lié à la rotation de l'électron sur lui-même.

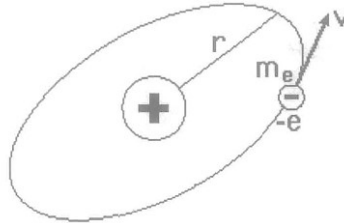


Fig I. 10 : Représentation schématique d'un atome.

Les électrons se répartissent en bandes d'énergie. Les bandes d'énergie indiquent les états possibles d'énergies potentielles des électrons.

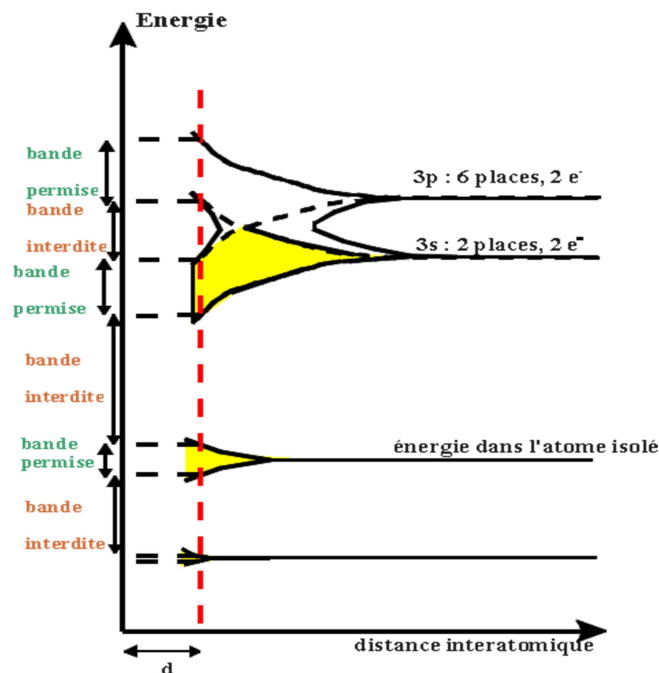


Fig I. 11 : Structure de bandes d'énergie.

Les couches profondes étant complètes, elles ne contribuent pas au moment magnétique. Pour minimiser l'énergie totale du système, à l'équilibre, les bandes permises sont occupées par les électrons du solide en commençant le « remplissage » par les bandes les plus profondes. On classe les matériaux magnétiques en plusieurs catégories caractérisant leur état d'aimantation naturelle :

- ◆ **Diamagnétisme** : Un diamagnétique parfait offre une résistance au passage du champ magnétique. Les lignes de champ H ne pénètrent pas dans le matériau. La perméabilité

est donc nulle. C'est l'attribut d'un matériau qui a une susceptibilité magnétique négative ($k < 0$), c'est-à-dire que l'intensité de la magnétisation induite dans le corps par un champ H sera dans la direction opposée à H .

Le phénomène de diamagnétisme faible, que présentent certains matériaux, provient de la déformation des orbites électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur. Ce phénomène est réversible puisque lorsque le champ extérieur disparaît, l'action disparaît. Ce diamagnétisme sature rarement.

Exemples de diamagnétiques : graphite, gypse, marbre, quartz, sel, gaz rares, bismuth, cuivre et diamant.

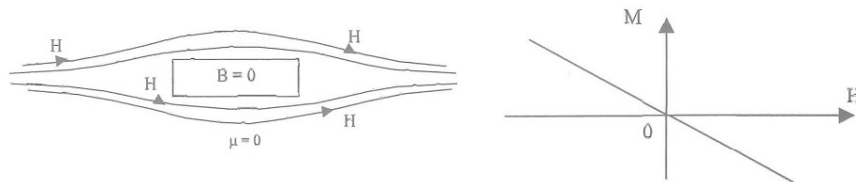


Fig I. 12: Comportement d'un matériau diamagnétique placé dans un champ magnétique.

- ◆ **Paramagnétisme :** Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont paramagnétiques, c'est-à-dire $k > 0$.

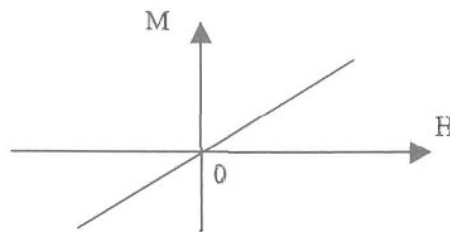


Fig I. 13 : Comportement d'un matériau paramagnétique placé dans un champ magnétique.

Dans un matériau paramagnétique, chaque atome a un moment magnétique non nul. Sous l'action d'un champ extérieur, ces moments magnétiques s'orientent dans le champ et augmentent le champ H appliqué.

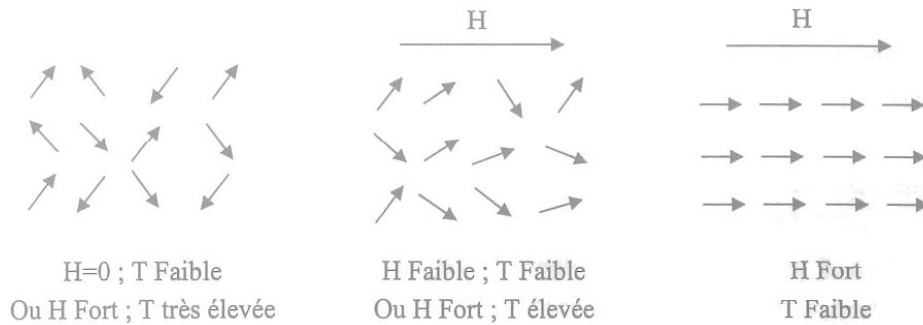


Fig I. 14 : Action combinée de la température et d'un champ extérieur sur un matériau paramagnétique (les vecteurs symbolisent les moments magnétiques atomiques).

Comme pour le diamagnétisme, il s'agit d'un phénomène faible et temporaire. Contrairement au diamagnétisme, la réponse d'un matériau paramagnétique vise à renforcer l'action du champ H extérieur. Notons que ce phénomène diminue avec l'augmentation de la température puisque l'agitation thermique désoriente les dipôles magnétiques élémentaires.

La plupart des métaux sont paramagnétique. Les deux effets (diamagnétique et paramagnétique) ne créent pas d'aimantation importante. Il faut deux conditions pour observer une aimantation dans un matériau : des atomes porteurs de moments magnétiques et un comportement collectif de ces atomes. Trois types de configurations sont envisageables dans ce cas :

- ◆ **le ferromagnétisme** : La magnétisation d'un matériau ferromagnétique correspond à l'orientation des dipôles élémentaires dans une même direction. À la différence des paramagnétiques, cette orientation peut se faire spontanément, en l'absence d'un champ H extérieur.

La région de l'espace dans laquelle tous les moments magnétiques sont orientés selon une même direction s'appelle un domaine (de Weiss) et les limites entre ces domaines, des parois (de Bloch).

Si on place un matériau ferromagnétique dans un champ H extérieur, les parois vont se déplacer de manière à renforcer le champ H extérieur. Si H augmente beaucoup, le domaine favorablement orienté occupera tout le volume du matériau qui est alors magnétisé à saturation.

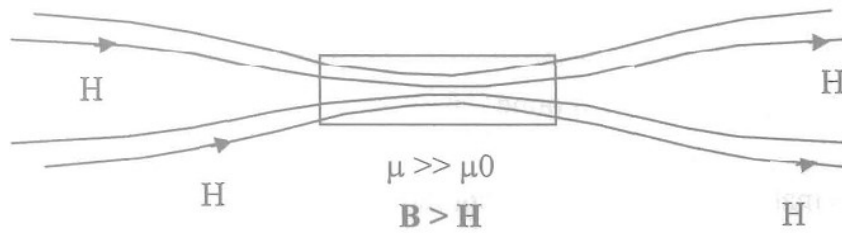


Fig I. 15 : Comportement d'un matériau ferromagnétique dans un champ magnétique H, avec une perméabilité élevée.

- ◆ L'antiferromagnétisme : Lorsque la somme des moments magnétiques des sous-ensembles parallèles et antiparallèles. Est nulle dans un matériau qui autrement serait considéré comme ferromagnétique, la susceptibilité résultante sera très faible, de l'ordre des substances paramagnétiques. Ces substances sont nommées antiferromagnétiques. L'hématite est un minéral possédant cette propriété.
- ◆ le ferrimagnétisme : Ce sont des matériaux dans lesquels les domaines magnétiques sont subdivisés en régions qui peuvent être alignées dans des sens opposés les uns aux autres, mais dont le moment magnétique n'est pas nul lorsque le champ extérieur l'est.

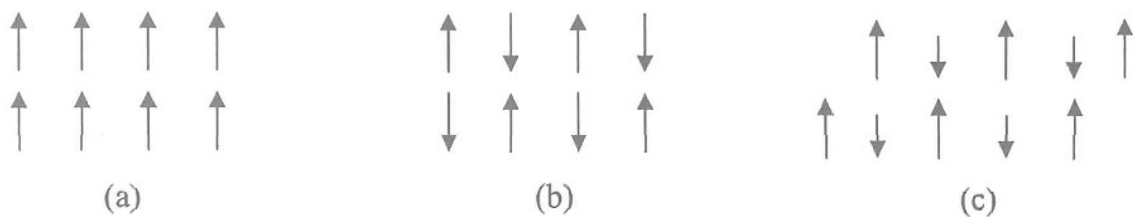


Fig I. 16 : Répartition des moments magnétiques élémentaires : (a) ferromagnétiques, (b) antiferromagnétiques et (c) ferrimagnétiques.

Il reste encore les héliomagnétique, les spérimagnétique et les spiromagnétique, que nous n'aborderons pas ici.

Il peut donc y avoir :

1. Un nombre égal de sous-domaines de directions opposées mais l'alignement magnétique d'un sous-ensemble peut être plus fort que l'autre. C'est le cas de l'ilménite, la magnétite, la titanomagnétite et les oxydes de fer ou fer et titane.
2. Le nombre de sous-domaines d'une direction est plus important que le nombre dans l'autre direction. C'est le cas de la pyrrhotine.

Presque tous les matériaux magnétiques sont ferrimagnétiques.

Lorsque l'on augmente la température d'un matériau de type ferromagnétique, celui-ci va progressivement voir son aimantation spontanée diminuer.

Matériaux	Tc en °C
Nikel	358
Fer	770
Cobalt	1115

Tableau I. 1 : Exemples de matériaux en fonction de la température de Curie Tc, au-dessus de laquelle ils perdent leur propriété ferromagnétique.

La température de Curie, notée Tc, propre à chaque matériau, marque le seuil à partir duquel son comportement devient de type paramagnétique.

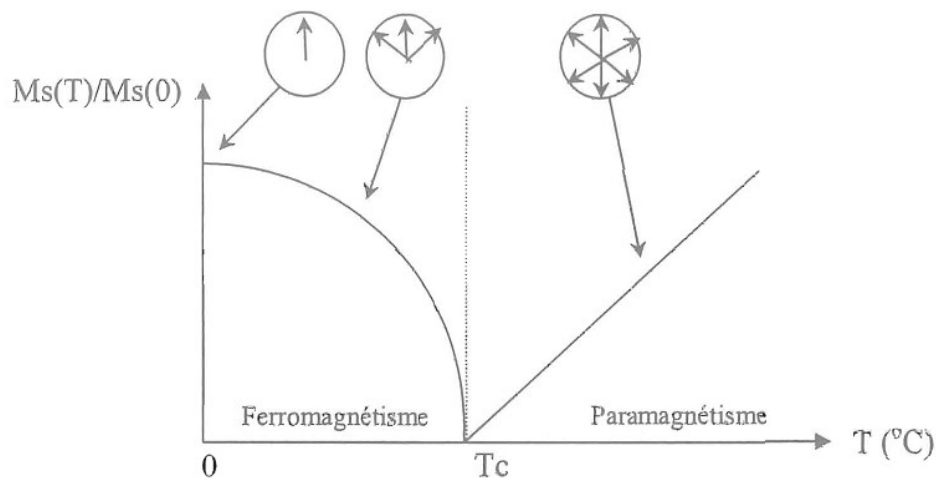


Fig I. 17 : Représentation théorique de la variation thermique de la magnétisation spontanée Ms dans un matériau ferromagnétique simple (les bulles illustrent l'effet de l'agitation thermique sur les moments)

Par ailleurs, plusieurs phénomènes vont régir le comportement collectif des moments magnétiques des matériaux :

- ◆ L'énergie d'échange, à l'échelle atomique, impose l'arrangement collectif des moments et tend à les maintenir tous parallèles.
- ◆ L'énergie magnétostatique, à l'échelle macroscopique, s'oppose à l'établissement d'une aimantation uniforme.

- ◆ L'énergie d'anisotropie magnéto-cristalline, impose des axes de facile aimantation liés à la géométrie du cristal.
- ◆ L'énergie magnéto-élastique : il peut apparaître une énergie d'anisotropie liée à la déformation du cristal (qui favorise un des axes), ou bien le cristal peut se déformer spontanément si cela lui permet de diminuer son énergie interne.

Dans le cas des matériaux ferromagnétiques il existe un fort champ moléculaire interne qui oriente spontanément les moments. On définit alors une aimantation spontanée qui est la somme des moments du matériau par unité de volume (pour une température inférieure à T_c). Si ces matériaux s'aimantent facilement, ils présentent généralement une aimantation globale très faible en l'absence de champ magnétique extérieur. Weiss formula alors l'hypothèse de la subdivision du matériau en une multitude de domaines élémentaires, deux domaines adjacents étant aimantés à saturation (minimisation de l'énergie d'échange) suivant des directions antiparallèles (minimisation de l'énergie magnétostatique) et séparés par une paroi.

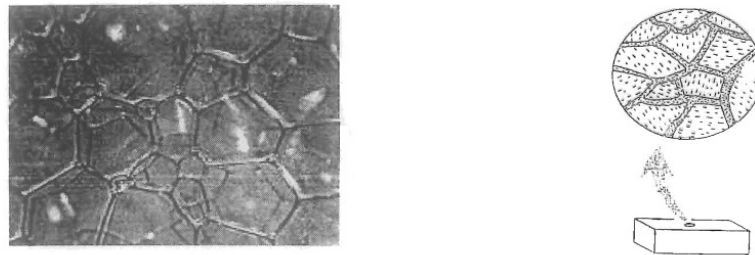


Fig I. 18 : Domaines magnétiques dans une substance ferromagnétique. Dans chaque domaine, les moments magnétiques atomiques tendent à être alignés. Les parois séparant les domaines sont des zones de moments atomiques non-alignés.

Dans un monocristal, l'orientation de l'aimantation à l'intérieur d'un domaine n'est pas quelconque ; il existe en effet des directions d'aimantations privilégiées qui sont imposées par la géométrie du réseau cristallin (minimisation de l'énergie d'anisotropie). L'aimantation se positionne naturellement suivant ces directions dites de facile aimantation.

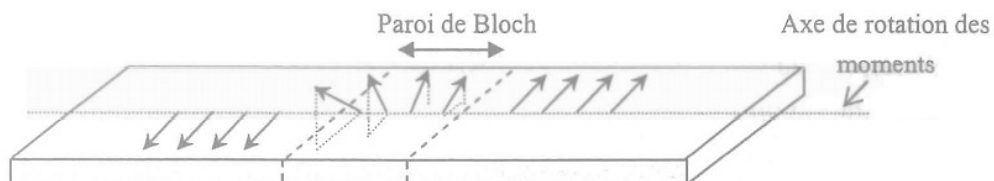


Fig I. 19 : Rotation de l'aimantation.

Lorsque l'on applique un champ magnétique à un matériau ferromagnétique, les parois vont tout d'abord se déplacer au profit des domaines dont l'aimantation est proche du champ. Dans un second temps, l'aimantation des domaines va s'aligner progressivement avec le champ appliqué, au fur et à mesure que son intensité augmente. L'alignement progressif des domaines explique alors la courbe non-linéaire hystérétique B-H observée : à saturation, tous les domaines – ou presque – sont alignés avec le champ extérieur. Si le champ appliqué n'a pas pour direction une des directions de facile aimantation du cristal, la saturation nécessitera des champs d'autant plus intenses que l'énergie d'anisotropie sera élevée. La surface de la courbe d'hystérésis représente l'énergie perdue lors du déplacement irréversible des parois.

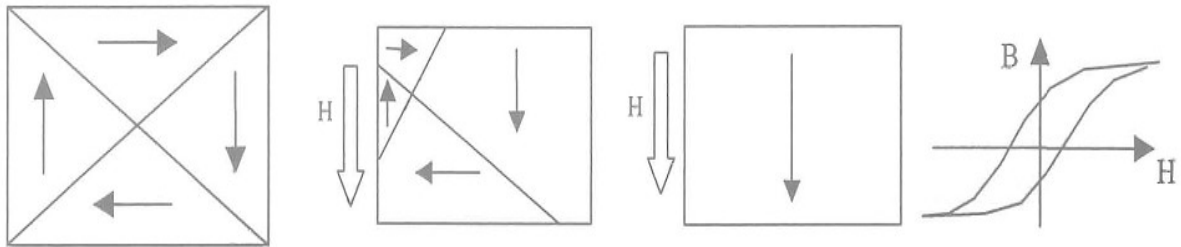


Fig I. 20 : Déplacements des parois de Bloch sous l'action d'un champ magnétique extérieur (Si le champ magnétique appliqué est suffisamment intense, un seul domaine occupera tout le matériau).

Ces rappels de science des matériaux permettent d'insister sur le fait que la structure cristalline et l'aimantation des matériaux sont deux phénomènes interagissant l'un avec l'autre et sont à la base du couplage fort magnéto-mécanique qui régit et donne naissance à la magnétostriction [2].

I.2.2.3 Couplage magnéto mécanique

L'énergie magnéto-cristalline estime le couplage entre les déformations du réseau cristallin et l'état d'aimantation. C'est une interaction d'origine quantique. La magnétostriction est la conséquence de la forme non sphérique du nuage électronique de certains matériaux : lorsque le champ magnétique externe fait tourner les moments magnétiques, le nuage électronique « asphérique » tourne également et modifie l'équilibre cristallin en attirant ou repoussant les ions voisins [3].

On définit généralement le coefficient de magnétostriction λ d'un matériau comme la variation relative de longueur du matériau aimanté, le matériau désaimanté correspond au coefficient de magnétostriction considéré comme nul.

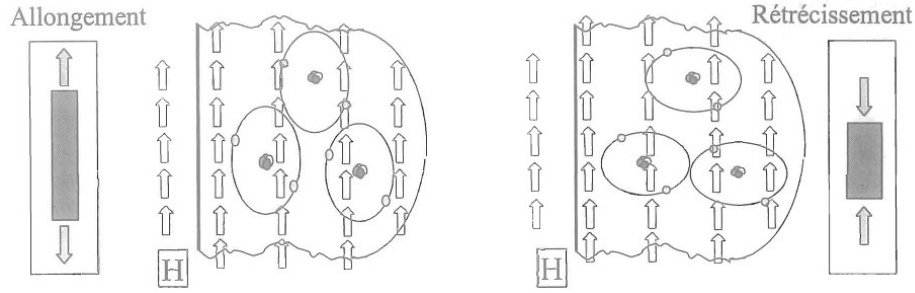


Fig I. 21 : Magnétostriction due à la forme non sphérique du nuage électronique du matériau.

Pour un échantillon polycristallin dont les cristallites ont une orientation aléatoire, le coefficient de magnétostriction est donné par [4] :

$$\lambda(\theta) = \frac{3}{2} \lambda_s (\cos^2 \theta - \frac{1}{3}) \quad (\text{I.19})$$

Avec θ : angle que fait l'aimantation avec la direction d'observation.

λ_s : magnétostriction à saturation ; elle se mesure en général à partir de la différence entre les magnétostrictions parallèle (λ_{\parallel}) et perpendiculaire (λ_{\perp}) à l'aimantation.

Dans le cas de la magnétostriction, un effet caractéristique et facilement observable est l'allongement d'une quantité ΔL d'un barreau magnétostrictif (Fer, Terfenol D, ...) de longueur L sous l'action d'un champ magnétique longitudinal. Une quantité λ assimilable à une déformation peut alors être définie, et qui est appelée « coefficient de magnétostriction » :

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L}$$

Selon la valeur et la direction du champ magnétique appliqué, il est alors possible d'obtenir des courbes (en général non linéaires) qui caractérisent le comportement magnétostrictif longitudinal d'un barreau.

La magnétostriction d'un barreau est un phénomène non linéaire, qui présente une saturation : la courbe de magnétostriction en fonction du champ magnétique appliqué présente une asymptote horizontale qui tend vers une valeur limite « λ_s » appelée le coefficient de magnétostriction à saturation. La référence est le matériau désaimanté ; en général l'histoire magnétique du matériau n'est pas connue, pour cette raison, on effectue une mesure différentielle en considérant que :

$$\lambda_s = \frac{3}{2} (\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) \quad (\text{I.20})$$

- ◆ $\lambda_{\parallel mes}$ est la magnétostriction à saturation lorsque le champ appliqué est parallèle à l'axe de facile aimantation de l'échantillon (elle n'est pas forcément égale à λ_s),
- ◆ $\lambda_{\perp mes}$ lorsque ce champ est perpendiculaire.

La considération de la conservation de volume implique :

$$\lambda_{\parallel mes} = \frac{3}{2} \cdot \lambda_s \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right) = \lambda_s$$

$$\text{Et } \lambda_{\perp mes} = \frac{3}{2} \cdot \lambda_s \left(0 - \frac{1}{3}\right) = -\frac{1}{2} \lambda_{\perp mes}$$

$$\text{D'où } \lambda_{\perp mes} = -\frac{1}{2} \lambda_{\parallel mes} \text{ et } \lambda_{\parallel} = \lambda_s$$

Ce qui permet d'en déduire que : $(\lambda_{\parallel mes} - \lambda_{\perp mes}) = \lambda_{\parallel} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \lambda_{\parallel} \cdot \frac{3}{2}$

Comme la quantité $(\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp})$ ne dépend pas de l'aimantation initiale du matériau, on obtient ainsi une valeur exacte du coefficient λ_s .

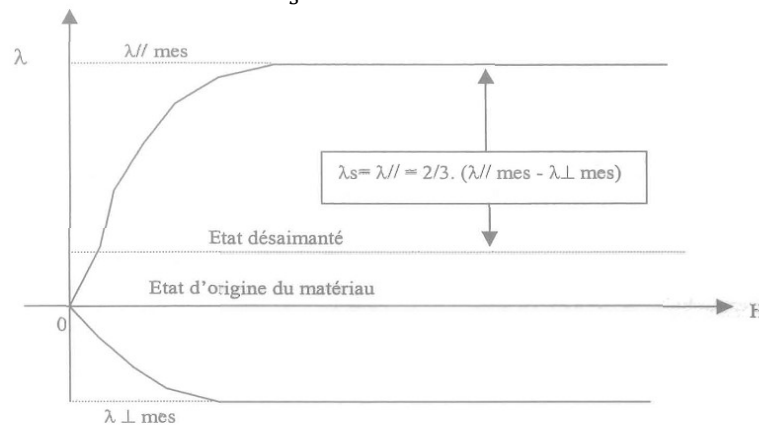


Fig I. 22 : Illustration de la magnétostriction parallèle et perpendiculaire due à une aimantation appliquée suivant un angle θ .

La magnétostriction dépend de l'orientation de l'aimantation par rapport aux axes du cristal. Mais, du fait des symétries, ne dépend pas de son sens [5].

I.2.2.4L'Hystérésis

Le phénomène magnétostrictif peut être considéré mécaniquement comme un phénomène élastique, pouvant induire de larges déformations non linéaires.

Cette particularité est généralement due à l'hystérésis magnétique du matériau, lequel à champ nul va garder une mémoire de son histoire magnétique caractérisée par une induction rémanente. L'effet Joule longitudinal (décrit plus loin) présente également une hystérésis tout en conservant le même signe quel que soit le sens du champ. Ces cycles d'hystérésis sont plus ou moins marqués selon le matériau (voir FigI.23)

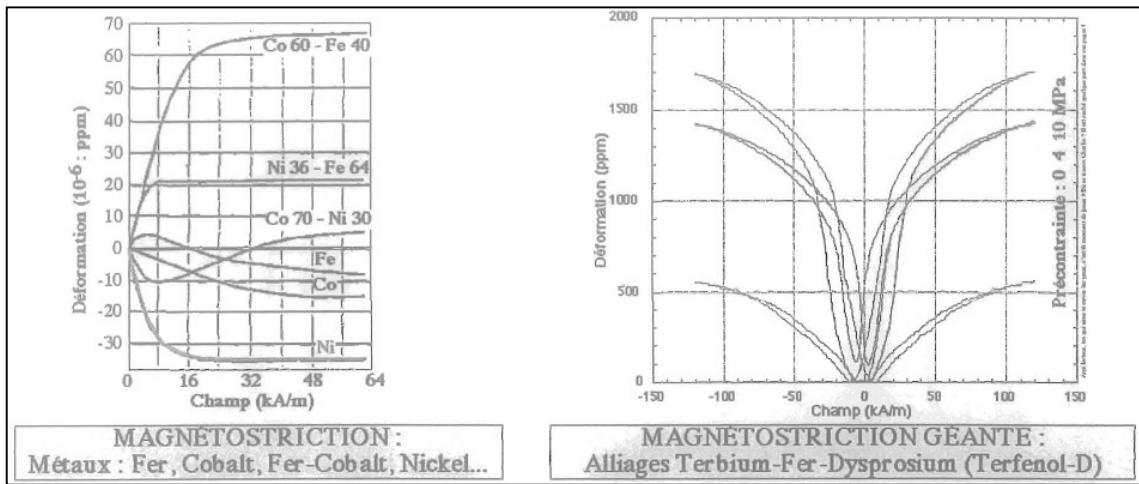


Fig I. 23 : Cycles d’hystérésis d’elongation en fonction du champ appliqué.

I.2.2.5 Magnétostriction inverse

Si une contrainte σ est appliquée à un matériau ferromagnétique, l’énergie W_σ associée a cette contrainte, autre qu’élastique, s’écrit sous la forme [5] :

$$W_\sigma = -\frac{3}{2} \cdot \sigma \cdot \lambda_s \cdot \cos^2\theta \quad (I.21)$$

Avec θ : angle entre les directions de la contrainte et de l’aimantation.

I.2.3 les principaux phénomènes de la magnétostriction

L’on a l’habitude de classer, d’une façon assez superficielle, les phénomènes de magnétostriction suivant leurs aspects extérieurs sans tenir compte de leurs causes effectives.

On distingue alors les effets directs :

a) L’effet Joule longitudinal

C’est le phénomène magnétostrictif le plus important. Il est caractérisé par l’allongement ou le raccourcissement Δl d’un barreau ferromagnétique de longueur l sous l’effet d’un champ magnétique. Les courbes typiques $\Delta l/l = f(Ha)$ sont illustrées par la Fig I.24. On remarque $\Delta l/l$ que n’est pas une fonction linéaire du champ.

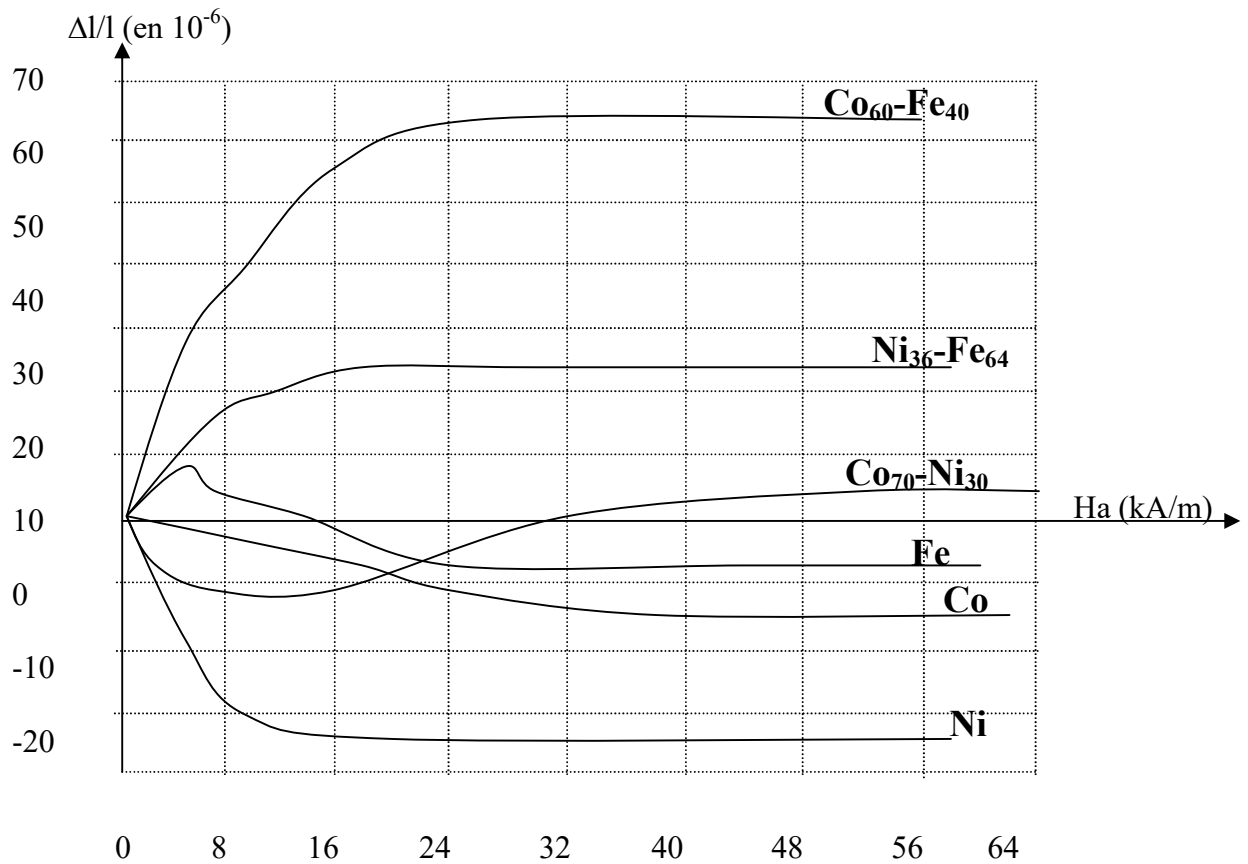


Fig I. 24 : Effet Joule longitudinal de quelques métaux et alliages métalliques en fonction du champ magnétique appliqué H_a

Pour la plupart des métaux ou alliages ferromagnétiques Δl garde un signe constant quelle que soit la valeur du champ appliqué. Mais certains autres présentent une inversion du signe de Δl ; c'est le cas du fer aux environs de 16 à 40 kA/m. pour cette valeur critique, l'effet Joule longitudinal s'annule et le barreau retrouve ses distances initiales et au deçà de cette valeur le barreau s'allonge et au delà le barreau se contracte.

b) L'effet Villari

C'est l'effet Joule longitudinal inverse, c'est à dire lorsqu'on modifie la longueur naturelle d'un barreau ferromagnétique, ce dernier s'aimante. Si au préalable le barreau était plongé à l'intérieur d'un solénoïde, un courant transitoire parcourt la bobine ; ce courant est dû à la variation du flux associé à la variation de l'aimantation ; la déformation Δl est donnée par :

$$F = E S_e (\Delta l / l) \quad (I.22)$$

Avec :

$$\Delta L/l = (\Delta l/l)_{el} + (\Delta l/l)_m \quad (I.23)$$

E : module de Young

S_e : Surface normale

F : Force exercer sur le barreau ferromagnétique

c) Effet Joule transversal

L'effet Joule transversal est observé quand la direction de mesure de la dimension est perpendiculaire à l'aimantation Fig I.25.a. Les effets Joule, longitudinal et transversal, n'introduisent pas de variation de volume si le matériau est isotrope ou constitué d'un ensemble désordonné de cristaux cubiques. Il n'en est pas de même pour des cristaux élémentaires présentant d'autres symétries.

d) Effet Wiedemann

Cet effet se produit dans un barreau ferromagnétique soumis à un champ longitudinal. Si ce barreau est traversé par un courant axial, le champ associé à ce courant provoque une torsion du barreau Fig I.25.b : c'est l'effet Wiedemann. L'effet inverse produit une variation d'aimantation longitudinale et l'apparition d'une aimantation circulaire dans un élément long aimanté axialement et soumis à un couple de torsion.

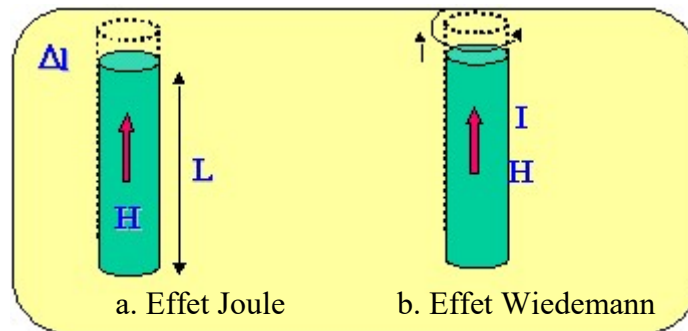


Fig I. 25: Illustration des principaux effets magnétostrictifs

e) Effet de variation de volume

Bien que l'effet Joule se manifeste sans variation de volume, il existe des phénomènes magnétostrictifs de variation de volume (ΔV) dans le matériau ferromagnétique. On distingue plusieurs types d'effets de variation de volume d'origines différentes.

Une variation spontanée (sans champ appliqué) de volume a été mise en œuvre. Un échantillon d'un matériau occupe alors un volume différent de celui qu'il remplirait s'il n'était pas magnétique. Cette variation de volume est très grande et positive pour les alliages fer-nickel à environ 36% de nickel ($\Delta V/V$ peut atteindre dans ces alliages $1,9.10^{-2}$ à 0K). De plus, elle diminue quand la température croît et contribue par un terme $\Delta V/(3V)$ à la compensation partielle de la dilatation thermique linéaire classique. Cet alliage fer-nickel est connu sous le nom de *INVAR*. Son coefficient global de dilatation reste inférieur ou égal à $2.10^{-6}/K$ en valeur absolue entre les températures de 0 à 400 K. l'invar est donc utilisé pour obtenir une grande stabilité thermique. Une variation spontanée de volume existe pour d'autres matériaux magnétiques, mais elle est plus réduite. Par exemple, elle est égale en valeur relative à $-1,2.10^{-3}$ pour le nickel métallique et $-2,7.10^{-3}$ pour le fer à température ambiante.

Une variation de volume est observée à champ faible. Son amplitude est fonction de la géométrie de l'échantillon : c'est l'effet de forme. À champ plus élevé, il existe une contribution liée à la rotation de l'aimantation appelée effet de cristal. Ces deux effets sont extrêmement faibles. Le principal effet de volume se produit pour des champs très importants (quelques 10^5 A/m). Pour la plupart des métaux ou alliages magnétostrictifs, la variation de volume reste faible, cependant des effets de volume plus importants ont été mesurés dans des composés de terres rares. Par exemple, avec le nickel $\Delta V/V$ varie de $1,1.10^{-6}$ par MA/m et de 110.10^{-6} par MA/m pour le composé $Tb_{0,03}Fe_{0,97}$.

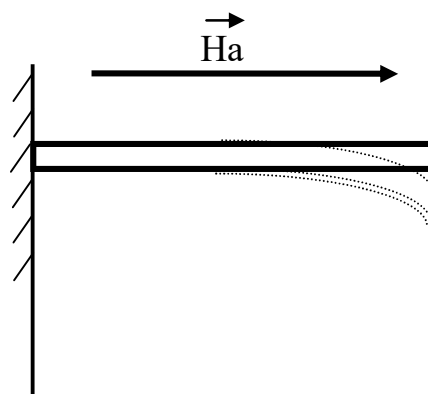


Fig I. 26 : Effet de flexion

f) Effet de variation du module d'Young ou effet ΔE

Lorsque l'on applique une contrainte à un matériau ferromagnétique, celle-ci provoque une variation d'aimantation qui introduit une déformation en supplément de la déformation créée par élasticité. Ce phénomène correspond à une modification des constantes élastiques du

matériau, donc de son module de Young. Le tableau suivant nous donne quelques valeurs de $\Delta E/E_0$ pour quelques matériaux.

Matériau	$\Delta E/E_0$ en %	H_a (A/m)
Ni	15	---
$Tb_{0.28}Dy_{0.72}Fe_2$	160	$342 \cdot 10^3$
$Fe_{78}Si_{10}B_{12}$	190	240

Tableau I. 2 : valeurs de $\Delta E/E_0$ et du champ statique appliqué H_a pour quelques matériaux

Comme dans l'anisotropie magnétique, la magnétostriction a pour origine l'interaction entre les moments magnétiques atomiques. La relation entre les allongements et l'état d'aimantation d'un matériau s'exprime par un terme appelé l'énergie magnéto-élastique. L'énergie globale par unité de volume dans un matériau ferromagnétique soumis à une contrainte mécanique externe est égale à la somme des densités des énergies élastique, magnéto-élastique, d'anisotropie magnéto-cristalline, magnétostatique et de l'énergie due à l'interaction d'échange. L'aimantation prend une position stable pour ces déformations à l'équilibre quand la densité globale d'énergie est minimale.

I.2.4 Les matériaux magnétostrictifs

Les principaux matériaux magnétostrictifs peuvent être séparés en deux groupes : les métaux (Fer, Cobalt, Nickel...), les alliages métalliques, les ferrites d'un côté, et les alliages à base de terre rare de l'autre. L'évaluation des performances d'un matériau magnétostrictif se fait par la mesure de son coefficient de magnétostriction à saturation λ_s , et par son coefficient de couplage magnéto-mécanique.

La coercivité (résistance aux champs magnétique ambiants) du matériau doit donc être aussi faible que possible pour permettre une magnétostriction maximale en champ faible (moins de 1 kA/m) ; c'est un aspect important de ces nouveaux matériaux si on veut les rendre compétitifs [6] [7] [8].

I.2.4.1 Les métaux

Le nickel et les alliages métalliques ont été les premiers matériaux sur lesquels l'effet magnétostrictif fut observé ; le nickel, par exemple, présente un coefficient de saturation λ_s de -33 ppm. En général, les alliages métalliques ont une magnétostriction qui reste inférieure à 100. Par contre leur température de curie est élevée ce qui garantit une bonne stabilité thermique et un fonctionnement à température ambiante.

Les ferrites ont une magnétostriction plus importante. Elles peuvent être utilisées à des fréquences élevées et présentent un fort rendement électro-acoustique. Le principal problème est leur fragilité.

Les performances de ces matériaux ne permettent pas d'envisager des applications intéressantes (ces effets sont surtout visibles dans certaines applications : vibrations dans les transformateurs et les machines électrique par exemple).

I.2.4.2 Les terres rares

Les terres rares possèdent des coefficients de magnétostriction extrêmement importants (de l'ordre de 1000 ppm) mais à des températures cryogéniques [5][9]. Les terres rares sont en effet caractérisées par la forme anisotrope de leur nuage électronique 4f. Cette forme progresse de façon régulière dans la colonne de "lanthanides" au fur et à mesure que des électrons sont ajoutés. Ainsi, comme cela est illustré, le Samarium ressemble à un ballon de rugby alors que le Terbium est plus aplati.

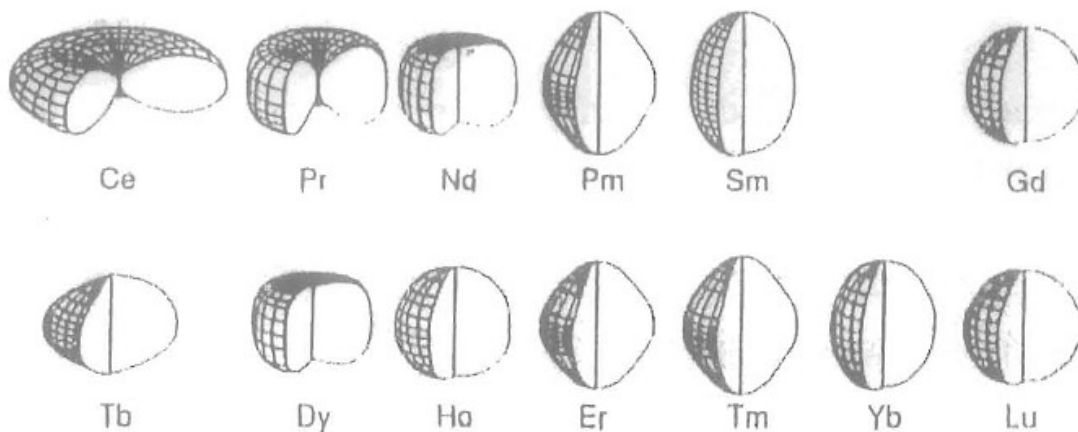


Fig I. 27: Structure du nuage 4f de quelques Terres Rares.

Pour combler le problème lié aux très basses températures de Curie, ces matériaux sont alliés à du fer (dont « la T_c » est élevée) de sorte que le nuage électronique anisotropie 4f du composé terre rare soit polarisé par une forte interaction d'échange.

Ainsi, les composés $TbFe_2$ et $SmFe_2$ donnent la plus grande déformation (positive et négative) à la température ambiante [10]. Dans la suite on notera TR-M l'alliage "Terre Rare/ Métal de transition".

a) Température de Curie et magnétostriction

La température de curie T_c et le coefficient de magnétostriction à saturation λ_s de plusieurs matériaux poly-cristallins amorphes sont donnés dans le Tableau I.3.

b) Matériaux amorphes

Les propriétés magnétostrictives du $TbFeDy$ amorphe en champ faible et faible contrainte s'avèrent satisfaisantes. Cependant lorsque l'on passe de l'état cristallin à l'état amorphe (c'est le cas des alliages $TRFe_2$ déposés par pulvérisation rapide), les interactions Fe-Fe diminuent fortement; on observe alors une forte coercivité en champ faible.

Matériau	λ_s (ppm)	T_c (°C)	λ_s (ppm)	T_c (°C)
	Polycristal	Polycristal	Amorphe	
Ni	-33	358	-	-
Co	-62	1130	-	-
Fe	-9	707	-	-
$SmFe_2$	-1560	676	-300	403
$TbFe_2$	1735	711	475	425
$DyFe_2$	433	635	50	362
$Tb_{0.3}Fe_2Dy_{0.7}$	1100	380	375	-

Tableau I. 3: Valeurs de λ_s et T_c

La température de Curie des alliages TR-M amorphes reste faible et entraîne une variation des propriétés magnétostrictives de ces derniers avec la température. La magnétostriction décroît de façon monotone avec l'augmentation de la température [11].

c) Alliages polycristallins et Terfenol-D

Les alliages polycristallins ont une température de Curie plus élevée que les alliages amorphes ; mais ils présentent une forte anisotropie qui gêne le processus de rotation du champ. Dans les matériaux polycristallins les directions de facile aimantation sont orientées aléatoirement.

Les fortes valeurs de magnétostriction sont souvent associées à une forte anisotropie. L'introduction de Dysprosium permet d'adoucir le matériau ; le Terfenol-D a une stœchiométrie [6] qui est en moyenne la suivante: " $Tb_{0,3}DY_{0,7}Fe_2$ ". Une augmentation de la proportion de Terbium ($Tb_{0,7}$) contribuera à linéariser les caractéristiques au dépend de la déformation maximale. Alors qu'une diminution de ce composé permettra une utilisation à basses températures ($Tb_{0,3}$ 3s, $-60^{\circ}C$) mais augmentera le phénomène d'hystérésis. Dans les composés $TR - Fe_2$, le module de Young continue à changer bien au-delà de la saturation magnétique. Ce phénomène est associé non seulement aux mouvements de parois mais aussi à un "assouplissement" interne du réseau cristallin, déformation due à des interactions atomiques locales de type magnéto-élastiques [11] [10].

Les caractéristiques élastiques de quelques alliages $R - Fe_2$ sont données ci-dessous. La quantité $(\frac{1}{2} E \lambda_s^2)$ représente la quantité d'énergie magnétique qui peut être transformée en énergie élastique par unité de volume (indice du coefficient de couplage).

	TbFe₂	ErFe₂	TbFe₃	Ni
$\rho(g/cm^3)$	9.1	9.7	9.4	-
E(Gpa)	94	121	131	21
$E \cdot \frac{\lambda_s^2}{2} \left(10^{-3} J/m^3 \right)$	145	3.2	32	0.1

Tableau I. 4: Caractéristiques élastiques d'alliages polycristallins [12]

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les composants relatifs à la piézoélectricité et la magnétostriction, en exposant les phénomènes physiques, les principaux matériaux et leurs caractéristiques. Nous avons exposé les avantages de ces matériaux et les problèmes dus au couplage des propriétés physiques.

Les recherches avancent pour mettre au point de nouveaux matériaux toujours plus compétitifs avec des déformations plus importantes, une plus grande linéarité, une réduction de l'hystérésis, et surtout avec des coûts inférieurs.

CHAPITRE II

**Actionneurs à matériaux actifs,
adaptatifs et intelligents**

Introduction

Les actionneurs prennent progressivement de l'importance dans le monde technologique par rapport aux moteurs électriques dits classiques. Les domaines d'applications sont vastes et concernent tout autant la fabrication industrielle (gestion des procédés) que l'automobile (vanne, dispositifs de freinage, airbag, ...) et encore bien d'autres secteurs.

La plupart des actionneurs développés jusqu'ici utilisaient des phénomènes électriques pour transformer une énergie en force ou en mouvement. Aujourd'hui les moyens technologiques se sont largement étendus avec des actionneurs basés sur des matériaux "électroactifs" utilisant donc aussi bien les effets électromagnétiques, piézoélectriques, à mémoire de forme, ou acoustiques (vibrations mécaniques, ondes progressives).

Ce chapitre a pour but d'exposer d'une façon générale les différentes astuces pour construire des actionneurs à base de matériaux actifs, ainsi leurs définitions et avantages économiques par rapport aux actionneurs classiques.

II.1 Qu'est ce qu'un Actionneur?

Les actionneurs sont des systèmes transformant un signal en un phénomène physique et capables notamment d'intervenir sur un procédé. Ils peuvent être pneumatique, oléopneumatique, hydraulique, électrique selon l'énergie motrice. Ces technologies sont considérées comme des sources d'innovation importantes pour l'industrie. Certains spécialistes estiment aujourd'hui ce marché à €40 milliards. En croissance de 60% par an, celui-ci pourrait atteindre rapidement €100 milliards [13].

II.2 Avantages économiques des actionneurs

Les avantages les plus significatifs des nouveaux actionneurs sont décrits dans le tableau II.1, qui regroupe les prérogatives des caractéristiques intéressantes à atteindre, comme les réductions d'échelles de poids, de masse, des productions basses coûts, la fiabilité et la précision, l'intégration dans les dispositifs "intelligents et autonomes", la faible consommation énergétique...

	Axes	Mots clés
Marchés	Réduction des coûts Accroissement des performances Intégration de nouvelles fonctions	Industrialisation Flexibilité Qualité-reproductibilité Allègement Amélioration des qualités sensorielles Sécurité Pureté Durabilité Recyclabilité et environnement Autosurveillance Adaptabilité
Matériaux	Multi matériaux Matériaux à propriétés particulières Matériaux intelligents	Matériaux structurels Matériaux fonctionnels
Maîtrise des filières	Recherche de la continuité Complexification des filières Poids croissant de l'immatériel	Continuité des process Modes d'assemblage/désassemblage Maîtrise des surfaces Techniques séparatives Elaboration, transformation Ingénierie simultanée Contrôle

Tableau II. 1: Axes directeurs du développement des actionneurs et technologies associées [13]

II.3. Tendances d'évolution

Les développements des actionneurs en cours dans les laboratoires de recherche ou chez les industriels sont spécifiques à chaque secteur d'activité. Ils peuvent être définis en fonction du niveau de complexité et du volume de production. La complexité dépend non seulement du nombre d'éléments du système mais aussi des conditions dans lesquelles il devra fonctionner et des étapes technologiques nécessaires à sa fabrication. Dans certains cas, la complexité est telle qu'elle implique la mise en place d'une équipe de développement multidisciplinaire permettant de mettre en commun des compétences en matériaux, mécanique, optique, électronique, chimie, biologie...

Aujourd'hui, la majeure partie des produits sur le marché et des dispositifs en développements sont des actionneurs qui tendent à remplacer les moteurs "classiques". A court terme, l'activité des actionneurs ne sera non plus centrée sur de simples matériaux mais sur des matériaux dits

"intelligents". A plus long terme se développeront des actionneurs plus complexes intégrant capteurs et électronique de traitement.

II.4 Qu'est-ce qu'un matériau actif, adaptatif, "intelligent"?

Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Il possède des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement). Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques, par exemple, sa forme, à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau. Par exemple des variations de température, des contraintes mécaniques, de champs électriques ou magnétiques.

Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans la plupart des cas, provoquer une action de correction. Il devient ainsi possible de détecter des faiblesses de structures dans le revêtement d'un avion, des fissures apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton, réduire les vibrations de pales d'hélicoptère, ou insérer dans les artères des filtres qui se déploieront pour réduire le risque de dispersion de caillots sanguins.

II.4.1 Objectifs de la technologie

a) Contexte concurrentiel et économique

Depuis le début des années 90, les grands rendez-vous consacrés spécifiquement aux matériaux adaptatifs, appelés généralement "intelligents" par abus de langage, se multiplient à travers le monde: "Europeanconference on smart structures and materials", "International conference on intelligent materials" ...

Toutes les grandes puissances industrielles sont aujourd'hui impliquées dans d'importants programmes de recherche portant sur les matériaux "intelligents", parmi lesquels les matériaux adaptatifs se prêtent à la réalisation d'actionneurs. De nombreuses conférences telles que "Actuators", "Transducers", "Eurosensors" ... proposent un symposium spécifique sur ce sujet.

Déjà, les applications liées au contrôle du bruit ou des micro-vibrations sont bien abouties, et dans certains cas des applications industrielles sont sur le marché [14].

Enjeux: *disposer dans un premier temps de matériaux capables de s'auto-surveiller ce qui évite les interventions régulières en maintenance et des heures de démontage, ainsi que le surdimensionnement des pièces (économies de ressources et recyclage facilité). L'idéal serait*

des matériaux auto-reconstructifs (et auto-destructifs quand ils ne servent plus), prévenant l'utilisateur quand ils vont se détériorer et capables de s'adapter à une contrainte imprévue. On peut rêver...

b) Exigences relatives aux nouveaux matériaux

La fonction la plus importante que l'on peut être à même d'exiger de tels matériaux est la génération d'un mouvement et d'une force. Outre cette fonction précise, les matériaux ou alliages nouveaux doivent satisfaire à des critères et avoir certaines propriétés afin d'atteindre un objectif particulier pour une fonction ou une application donnée.

En voici la liste:

- Des propriétés techniques, qui comprennent des caractéristiques mécaniques telles que l'écoulement plastique, la fatigue et la limite élastique, ainsi que des caractéristiques de comportement telles que la tolérance aux dommages, la résistance électrique, la résistance thermique et la résistance au feu.
- Des propriétés technologiques, qui comprennent la fabrication, le formage, les possibilités de soudage, le traitement thermique, le niveau de déchets, la maniabilité, l'automatisation et les capacités de réparation.
- Des critères économiques reliés aux coûts des matériaux bruts et de la production, au prix des fournitures et à leur disponibilité.
- Des caractéristiques environnementales comme la toxicité et la pollution, par exemple.
- Des critères de développement durable, ce qui implique des capacités de réutilisation et de recyclage.

Si on ajoute la détection et l'activation à la liste, le nouveau matériau ou le nouvel alliage passe pour "intelligent". Les matériaux piézoélectriques/magnétostrictifs et les alliages à mémoire de forme (AMF) sont actuellement les matériaux adaptatifs les plus étudiés.

Pour actionner, ils apportent notamment des solutions intéressantes en matière de détection permanente d'endommagement dans les matériaux, d'activation, d'amortissement de vibrations et de contrôle de stabilité dimensionnelle, des préoccupations communes à de nombreuses industries mécaniques (aéronautique, automobile, machine-outil, électroménager, construction navale...).

II.4.2. Programmes de recherches

Dans son rapport, " Reconstruire et améliorer l'infrastructure de la nation : Une fonction pour les systèmes et structures à matériaux intelligents", la Fondation Nationale pour la Science des Etats-Unis (Williamsburg, Virginie, USA) a écrit:

"Les systèmes et structures à matériaux intelligents sont des constructions ayant un degré d'autonomie significatif pour leur permettre de maximiser leurs performances, fournir une fonctionnalité adaptative et minimiser le coût du cycle de vie. La reconstruction et l'amélioration de l'infrastructure de notre nation peut tirer grand profit de la recherche, du développement et de la mise en œuvre des systèmes à matériaux intelligents ... "

Et conclut : "La synergie des actionneurs, des capteurs et des automates ne permettront pas seulement aux structures du futur d'avoir des rendements et des fonctionnalités croissantes, mais facilitera la solution de nombreuses questions socio-économiques concernant la réparation, le rehaussement et la construction de l'infrastructure de notre nation."

De nombreux laboratoires militaires se consacrent à ces technologies, notamment l'Air Force Research Laboratory au Etat Unis, où la DGA en France, pour le contrôle dynamique de surface, et d'autres applications aéronautique et spatiales.

L'ARPA (Advanced Research Project Agency) soutient un programme "Smart Materials and Synthesis". C'est une mission du Comité d'Applications Techniques qui cherche à améliorer les méthodes de synthèse et de traitement des matériaux actionneurs et de les combiner à des technologies de détection et de contrôle pour l'élimination des vibrations structurelles.

Le Japon, quant à lui, veut dominer le marché des matériaux nouveaux et fournit un effort considérable en développement et dans la recherche de nouveaux matériaux actifs. La STA (Agence des Sciences et Techniques) a lancé en 1991 un programme de 5 ans sur les matériaux intelligents, doté de €3 millions en 1991, €4 millions en 1992 et €4 millions en 1993. En 1995, l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology) a consacré €3 millions à un pré-projet intitulé "Smart structural systems" et €2,5 millions à un pré-projet intitulé "Autonomous responsive materials". En 1996, un nouveau projet de R&D est soutenu à hauteur de €3,2 millions: "New technology for development of high performance functional materials" .

Il est à remarquer qu'au Japon, même si la recherche est coordonnée par le MITI, elle s'effectue dans les grandes firmes qui y voient donc un intérêt commercial international.

En Europe, différents projets communautaires concernent les actionneurs magnétostrictifs piézoélectriques et les alliages à mémoire de forme (MESA, MADAVIC,...). On remarquera qu'en Allemagne par exemple, Daimler-Chrysler possède un département de recherche technologique où les structures actives sont représentées. Ceci est typique de l'Allemagne où le ministère chargé de la technologie prend très peu en main l'organisation de la recherche au

niveau national et laisse plutôt aux entreprises le soin d'organiser la recherche avec les laboratoires universitaires et autres. Les enjeux sont donc technologiques et commerciaux. On peut rajouter à ce sujet que les enjeux industriels apportent la sécurité et la fiabilité des systèmes avec notamment l'aéronautique ; l'automobile, principalement quand à elle, apporte l'innovation et la qualité des applications grand public.

En France, les technologies ont été classées en catégories par le ministère de l'industrie. C'est ainsi que l'on retrouve l'Ingénierie Simultanée dans les "Technologies organisationnelles et d'accompagnement" et les capteurs intelligents sous le chapeau "Production, instrumentation et mesure". Au point de vue plus amont, c'est-à-dire scientifique, le département SPI du CNRS a déterminé 11 axes prioritaires parmi lesquels, les machines "intelligentes" et l'usine de demain, qui "avec la modélisation sophistiquée qu'elles supposent, viennent compléter les grands champs d'investigation dans lequel le département a décidé d'investir." Les axes prioritaires sont les outils de la politique scientifique du département et définissent ses priorités. L'enjeu, bien que non clairement annoncé, est pourtant capital: il est du même ordre que celui de l'électronique et de l'informatique dans le passé.

II.4.3. Recherche en nouveaux matériaux actifs

Quelles sont les différentes catégories de matériaux intelligents considérés aujourd'hui comme classiques? Il s'agit principalement de trois catégories de matériaux connaissant de nombreuses applications dans des secteurs divers:

Les alliages à mémoire de forme (AMF), les matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs.

II.5. Actionneurs en Alliages à Mémoire de Forme (AMF)

Parmi les actionneurs présentant des potentialités intéressantes, les alliages à mémoire de forme, notés AMF, sont capables de transformer une énergie thermique qui leur est fournie en un travail mécanique. Ils peuvent alors restituer des déformations de l'ordre de 6 à 8 % et générer des efforts relativement importants lorsqu'ils sont chauffés. En outre, les AMF sont en général peu coûteux et la mise en œuvre physique de la commande par chauffage dont ils ont besoin, peut être réalisée simplement.

II.5.1. L'effet à Mémoire de Forme

La classe des alliages à mémoire de forme désigne des matériaux qui, après déformation permanente à basse température, retrouvent leur forme initiale non déformée par simple chauffage. C'est l'effet à mémoire de forme.

Cette propriété remarquable de mémoire de forme des AMF est due à la transformation de phase solide-solide du matériau appelée "transformation martensitique" entre une phase haute température (phase mère) et une phase basse température (phase produite).

Cette transformation peut être induite par une simple variation de température ou par l'application d'une contrainte mécanique dans une plage de température adéquate. La phase haute température est "l'austénite", par analogie avec les aciers (bien que la structure cristallographique ne soit généralement pas la même). La phase basse température est la "martensite", et possède une structure cristalline différente de l'austénite.

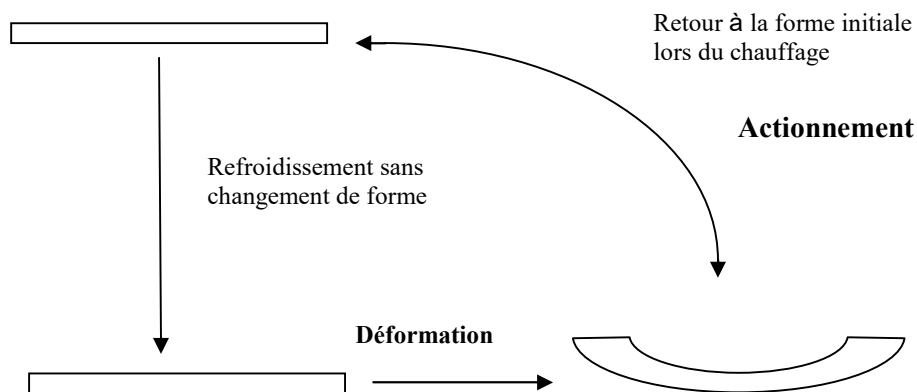


Fig II. 1.: Illustration de l'Effet à Mémoire de Forme.

Ainsi, les AMF, peuvent transformer une énergie thermique qui leur est fournie en un travail mécanique. Néanmoins, le phénomène thermomécanique a l'origine de la déformation confère à ces matériaux - il s'agit là de leur principal inconvénient - un temps de réponse relativement long (la bande passante n'excède pas 1 Hz pour un fil AMF de 150 μm de diamètre).

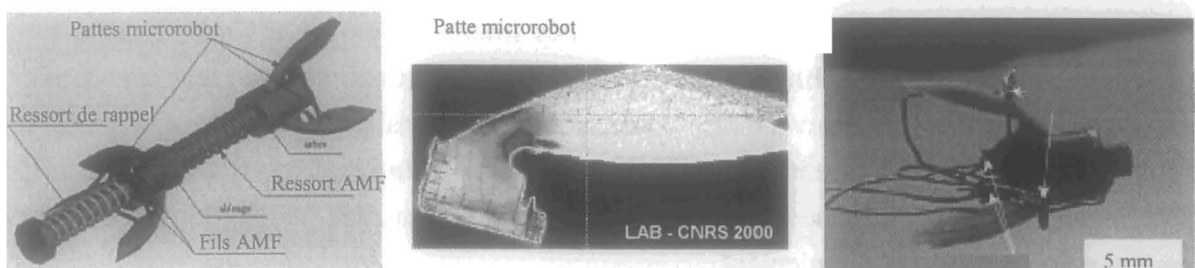


Fig II. 2: Micro-actionneur AMF linéaire du LAB, \varnothing 10mm, L 22mm, vitesse de déplacement # 2 mm/s. Micro-robot mobile permettant l'exploration et l'inspection de canalisations de faible diamètre de l'ordre de 8 à 15 mm.

Parmi les AMF, les alliages de type nickel-titane (NiTi ou nitinol) ou leurs dérivés NiTiX (X=Fe, Cu, Hf, ...) font partie des plus intéressants à utiliser pour l'actionnement. Ils permettent notamment de grandes déformations. On peut également noter que ces matériaux, en dépit de leur très faible rendement énergétique - moins de 1% pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique dans le matériau - possèdent une très grande densité d'énergie mécanique utile, de l'ordre de 10 à 15 kJ/m³ (par rapport aux valeurs du Tableau I.4 - p.34). Par ailleurs, leur relative simplicité d'utilisation (notamment en ce qui concerne les fils) permet dans la plupart des cas de mettre directement en mouvement la structure mécanique d'un robot en évitant les systèmes de transmission très complexes à mettre en œuvre dans de faibles dimensions.

En ce qui concerne les applications industrielles, si elles utilisent naturellement la propriété "mémoire de forme", elles sont pour le moment somme toute assez peu basées sur l'utilisation des AMF pour l'actionnement, mais exploitent plutôt leurs propriétés super-élastiques, c'est à dire leur propension, en phase austénitique, à reprendre leur forme initiale après de très grandes déformations générées par l'application de contraintes mécaniques extérieures.

Un matériau à mémoire de forme très intéressant est paru récemment, dont la transformation martensitique est activée par champ magnétique et non pas par apport thermique. Les actionneurs à base de MSM (Magneticallycontrolled Shape Memory) développés par Adaptamat ©, sont donc pilotés par champ magnétique, mais ils sont très sensibles à une température limite (# 30 °C) à partir de laquelle ils ne fonctionnent plus.



Fig II. 3: Actionneur MSM linéaire d'Adaptamat ©, course # 0.6mm, Force bloquée # 3N, F_{max} 300Hz, $M= 60g$.

Voici dans le tableau II.2, un récapitulatif des performances de ce matériau.

Matériau	Magnetic Shape Memory (MSM)
Éléments	Ni-Mn-Ga
Structure cristalline	Martensite tetragonal ($c/a : 0,94$)
Densité	$8,1 \text{ g cm}^{-3}$
Déplacement max	$60 \text{ }\mu\text{m/mm}$ à 0,5 T
Température de curie	95°C
Température martensitique	32°C
Température de fonctionnement	$-50^\circ\text{C} \dots +32^\circ\text{C}$
Force de compression max	700 Mpa
Résistivité	$62 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$
Champ de seuil de fonctionnement	270 kA/m
Densité d'énergie	110 kJ/m^3
Fatigue	$2 \cdot 10^7$ cycles

Tableau II. 2: Caractéristiques du MSM [13].

II.6 Actionneurs piézoélectriques

Parmi les actionneurs présentant des potentialités intéressantes, les actionneurs piézoélectriques, font l'objet d'une activité de recherche soutenue et sont les plus développés car ils sont capables de transformer une énergie électrique qui leur est fournie en un travail mécanique avec des temps de réponse de l'ordre de la milliseconde. L'effet piézoélectrique étant un effet réversible, il peut également être utilisé pour la conception de micro-capteurs, ce qui le rend très attractifs.

Les applications des actionneurs piézoélectriques se répandent dans divers domaines comme le micro-positionnement précis, le contrôle de formes ou la génération, le contrôle ou l'amortissement de vibrations [15], [16], [17]. L'apparition sur le marché des céramiques piézoélectriques multicouches (CMA) [18] générant de grandes déformations sous de faibles tensions dans les années 90 a permis de développer de nouveaux actionneurs.

Les déformations actuellement obtenues avec ces céramiques (proportionnelles à la tension) sont de 0,1 % à la tension maximale de 180 V. Cette même déformation peut être obtenue à la résonance sous seulement 10 V. Ces propriétés sont maintenant utilisées dans des produits standards pour des actionneurs directs ou amplifiés, des résonateurs ultrasonores et des

moteurs piézoélectriques dédiés à des marchés très divers comme l'optique, le spatial ou l'instrumentation [19].

II.6.1 L'effet piézoélectrique

C'est l'apparition de charges superficielles sur certains cristaux (quartz,..) ou autres matériaux (céramiques, polymères) lorsqu'ils sont soumis à une pression ou une traction. La polarisation est proportionnelle à la contrainte mécanique exercée. Ce phénomène n'apparaît que dans les cristaux dont la structure ne possède pas de centre de symétrie. Le quartz et tous les composés ferroélectriques sont piézoélectriques (il y a aussi des non ferroélectriques qui sont piézoélectriques).

On doit les premières observations de la piézoélectricité à l'abbé Juste HAUY (1817), minéralogiste français. Les études théoriques et expérimentales sont dues aux frères Pierre et Jacques CURIE (1880), on leur attribue la découverte de l'effet piézoélectrique direct (conversion d'énergie mécanique -> électrique, plutôt capteur), et la mise en évidence de ses rapports avec les symétries de l'état cristallin. En 1881, Lippmann suggère l'effet piézoélectrique inverse (conversion d'énergie électrique -> mécanique, plutôt actionneur), confirmé expérimentalement, la même année, par les frères CURIE.

Les actionneurs piézoélectriques fonctionnent donc en tension, mais ils sont fragiles et une contrainte trop forte peut provoquer une dépolarisation du matériau. La plupart transmettent un mouvement par frottement, avec un fort couple, d'où une usure prématurée due à la friction, et des températures de Curie ($>300^{\circ}\text{C}$) qui nécessitent d'être élevées. Le rendement est généralement de l'ordre de 30 à 50 %.

II.6.2 Les actionneurs directs

Les actionneurs directs sont les plus simples actionneurs piézoélectriques. Ils sont constitués d'une colonne de céramiques multicouches piézoélectriques (CMA) avec un dispositif de précontrainte en série Fig II.4. Ils permettent des déplacements entre 10 et 100 μm avec de très grandes raideurs. Par exemple, un actionneur de 100 mm de hauteur peut générer une amplitude de 75 μm sous 180V.

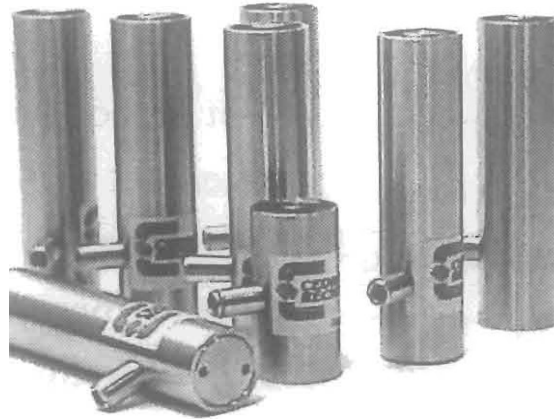


Fig II. 4: Actionneurs piézoélectriques linéaires standard [20].

A cause des relativement faibles déformations produites (environ 0.075 %), les applications de ce genre d'actionneurs piézoélectriques sont limitées par les faibles courses générées, mais les forces sont importantes. Ils sont utilisés en vibration.

II.6.3 Les Actionneurs amplifiés

La première alternative pour palier à cet inconvénient consiste à utiliser un Actionneur Piézoélectrique Amplifié (APA). Un concept [20] est basé sur le principe de la flexion/extension élastique d'une coque elliptique déformée par l'élongation d'un CMA. Les premiers APA ont été réalisés pour couvrir des besoins spatiaux pour du micro-positionnement optique sur une longue course (500 μm) avec une force importante (1 kN).

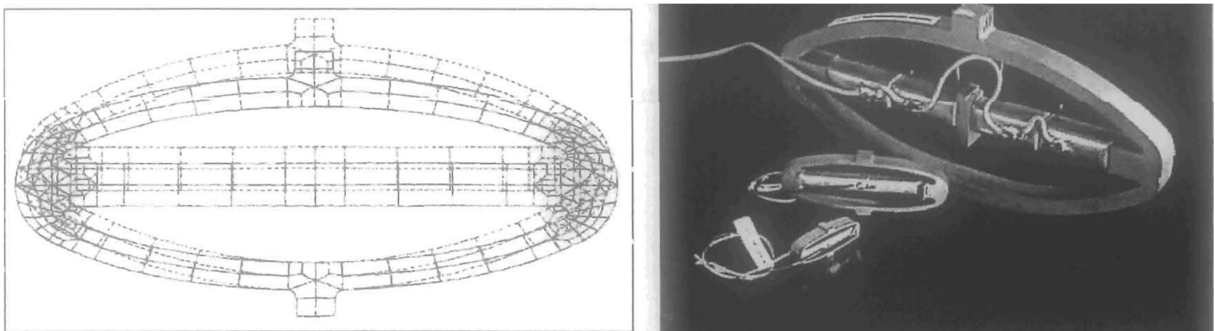


Fig II. 5: Illustrations d'actionneurs piézoélectriques amplifiés [20].

Un autre actionneur de 55 mm de hauteur, génère 500 μm de déplacement à vide (près de 1 % de déformation) avec une force bloquée de 570 N. Ces grands actionneurs trouvent également des applications dans le domaine du control actif de vibration [21] et de l'aéronautique [22].

II.6.4 Les actionneurs rotatifs piézoélectriques

Le principe de l'actionneur piézoélectrique est basé sur la combinaison de vibrations elliptiques électromécaniques et de forces de frottement Figure II.6, dans le but d'obtenir une grande course. Ces vibrations, appliquées sur une surface de contact, induisent un déplacement relatif de celle-ci par rapport au stator vibrant. Une précontrainte est appliquée sur cette interface. Elle explique la grande force bloquée du moteur à l'arrêt (et les frottements importants qui en découlent - rendement de 30 à 50 %). La force d'entraînement est obtenue par un phénomène d'adhérence/glisserment au niveau de la zone de contact.

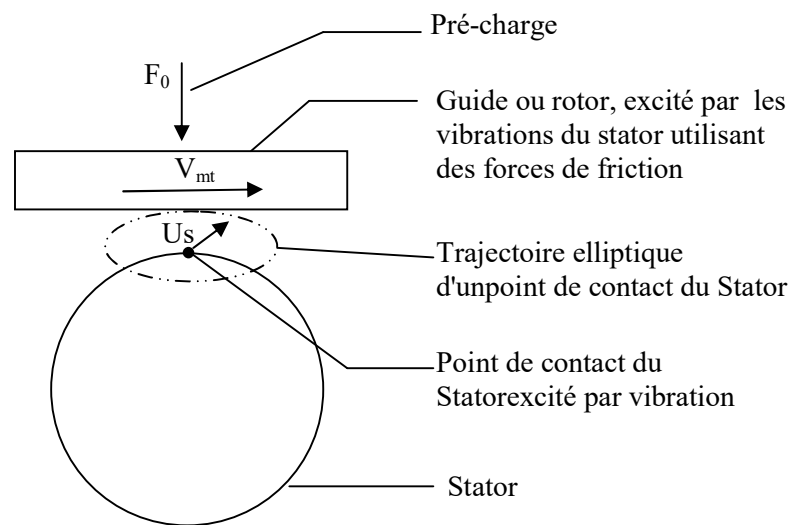


Fig II. 6: Principe d'un moteur piézoélectrique ultrasonore.

Idéalement, lorsque la composante normale de vibration s'ajoute à la pré-charge, la composante tangentielle de la vitesse est transférée à la partie mobile par adhérence. Inversement, lorsque la composante normale est dans la direction opposée à la pré-charge, il y a glissement entre la partie mobile et la composante tangentielle de la vitesse vibratoire. Ce concept appartient à la catégorie des actionneurs/moteurs ultrasonores multi-modes (MMUM), suivant la classification japonaise. Plusieurs actionneurs/moteurs piézoélectriques rotatifs (RPM) ont été développés.

Les premiers résultats sont présentés dans le Tableau II.3. La puissance mécanique disponible est d'environ 2 W. Des développements sont entrepris pour bénéficier de la très grande résolution angulaire de ce moteur. Il est développé pour l'entraînement direct d'axes d'instruments. Ce moteur RPM a aussi été testé pour entraîner une bande de papier. La Fig II.7 montre qu'un vrai entraînement direct est possible.

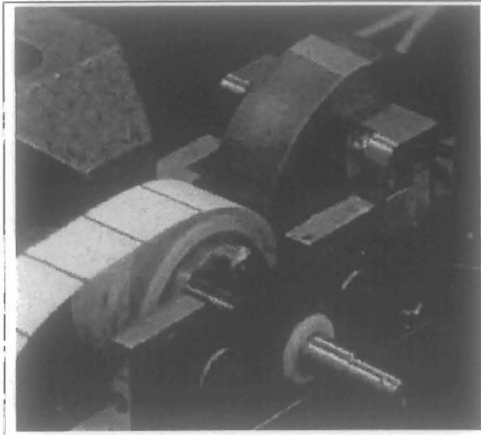


Fig II. 7: RPM de type roller

force bloquée à l'arrêt	0.22 N.m
couple en fonctionnement	0.19 N.m
vitesse de rotation à vide	3.5 tours/s
résolution angulaire	< 1 mdeg
Rayon du roller	11.5 mm
force tangentielle	16.5 N
vitesse tangentielle	250 mm/s
tension d'alimentation	9 V _{eff}

Tableau II. 3: Résultats expérimentaux d'un RPM

a) Moteurs piézoélectriques à onde progressive

Les moteurs à onde progressive s'apparentent très généralement à la configuration annulaire décrite à la Fig II.8. Cette configuration intègre un stator excité en vibrations de volume forcées selon un mode de flexion transversale dans la direction hors plan. Le rang du mode est choisi en fonction des paramètres dimensionnels du moteur, afin de garantir l'absence de bruits audibles de fonctionnement. Le rotor est en contact avec la partie supérieure du stator par l'intermédiaire d'un matériau interface. Il est entraîné par frottement en exploitant les déplacements et rotations des sections droites du stator [23].

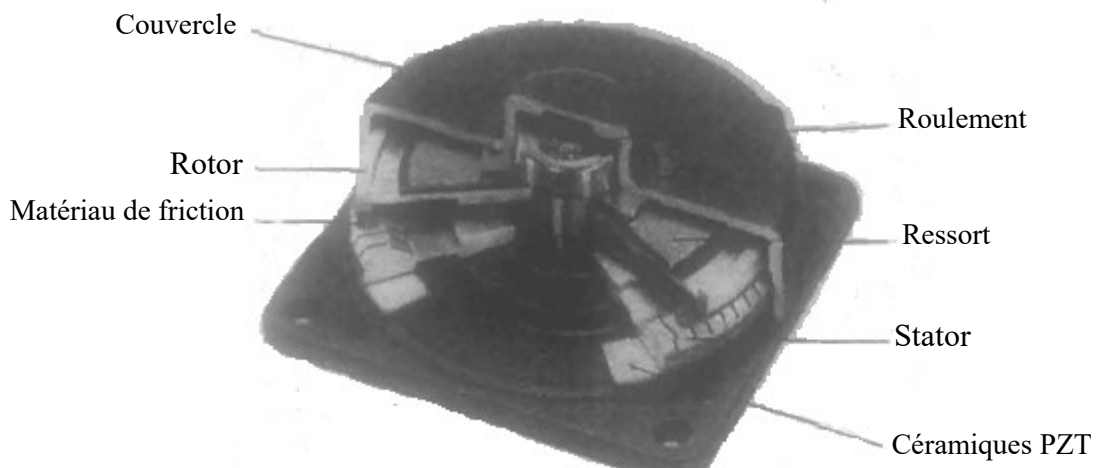


Fig II. 8 Moteurs piézoélectriques à onde progressive de la gamme Shinsei USR : diamètre 60mm.

Les caractéristiques en charge théoriques susceptibles d'être développées par un moteur à onde progressive de 2 mm de diamètre extérieur montrent que des efforts normaux de l'ordre de 1 Newton peuvent théoriquement être appliqués sur le rotor, lorsque les matériaux de friction impliqués à l'interface stator/rotor présentent une dureté superficielle adéquate.

II.7 Actionneurs Magnétostrictifs

Les actionneurs magnétostrictifs se caractérisent par une densité d'énergie nettement plus forte que celle des actionneurs PZT. A dimensions égales, les actionneurs utilisant par exemple du Terfenol-D développent une déformation à vide environ deux fois plus forte et peuvent soulever des charges également deux fois supérieures. Cependant, il faut tenir compte de la structure bobine/circuit magnétique et précontrainte qui présente un volume et une masse non négligeable, plus importante que pour un piézoélectrique.

La température de Curie de ces matériaux est plus élevée ($>390^{\circ}\text{C}$), et ils ne risquent pas de se dépolariiser.

Contrairement aux dispositifs piézoélectriques, les dispositifs magnétostrictifs peuvent être alimentés en aussi basses tensions que nécessaire, sous moins de 12 Volts par exemple. Il faut faire la différence entre "piézo-action" -par champ électrique donc tension, et "magnéto-action" par champ magnétique donc courant.

C'est un produit qui nécessite d'être précontraint et polarisé par un champ magnétique pour travailler dans de bonnes conditions. Ses propriétés le destinent plus particulièrement aux applications de puissance, notamment en environnement sévère (atmosphères humide ou explosive, haute température) et aux applications de type actionneur fonctionnant à très basses tensions.

L'application la plus avancée est aujourd'hui le sonar de haute puissance capable de travailler à basse fréquence, ce qui améliore sa portée. La recherche appliquée est en ce moment très active dans le domaine des actionneurs et des moteurs magnétostrictifs : Moteurs linéaires de Kiewewetter, moteurs rotatifs, moteurs à interactions de contacts similaires aux moteurs piézoélectriques ultrasonores ; une caractéristique essentielle de la plupart de ces moteurs est de présenter un très fort couple à l'arrêt et une absence de jeu. Des actionneurs directs ou amplifiés sont également étudiés pour du micro-positionnement et du contrôle actif de vibration. Des techniques de contrôle en- boucle ouverte ou en boucle fermée visant à éliminer les effets de l'hystérésis du matériau sont en cours de développement.

II.7.1 Matériaux magnétostrictifs

Ils peuvent être actifs ou passifs.

Actifs, ils se déforment sous l'effet d'un champ magnétique appliqué. Ils engendrent force et déplacement. Dans le cas des microsystèmes, on les rencontre surtout sous forme de couches minces. Déposés sur un substrat souple, on utilise la déformation par dilatation différentielle

du bimorphe ainsi formé pour fléchir une poutre (contacteur, positionnement) [24], ou une membrane (pompe, miroir actif).

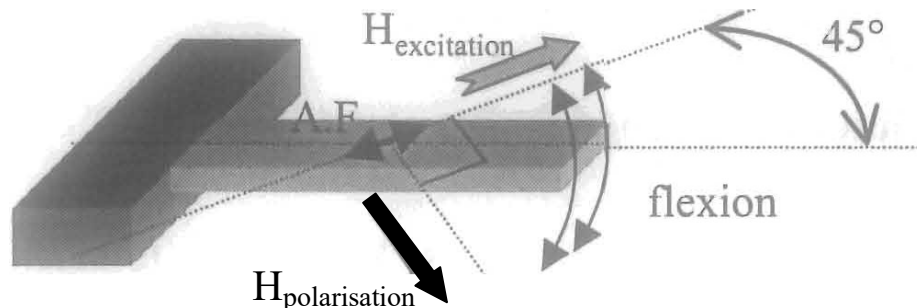


Fig II. 9: Représentation de l'effet bilame sur un micro relais bistable [24].

Dans le cas de couches, le problème principal vu du côté utilisateur est la très faible perméabilité du matériau, de l'ordre de 5 à 10, maximum 20 dans certains cas particuliers. Ceci se traduit par une très mauvaise concentration des lignes de flux dans la couche. Le rendement magnétique du circuit est très médiocre, et par conséquent celui du système complet. Une solution serait peut-être l'élaboration de multicouches, développées pour les aimants en couches minces. Le rôle des couches de FeCo serait double : baisse de la coercivité, et nette augmentation de la perméabilité.

Passif, les matériaux magnétostrictifs sont utilisés comme capteurs de contraintes ou de déformations, en détectant leurs variations de propriétés magnétiques sous l'effet de forces extérieures (capteurs de couple déposés sur l'axe de transmission ou de direction assistée ...). Ils peuvent aussi être utilisés comme magnétomètre/capteur de champ, par interférométrie à travers une fibre optique recouverte d'une couche magnétostrictive. Sous l'effet du champ la couche se dilate et allonge la fibre et le chemin optique s'en trouve affecté.

Les fils amorphes magnétostrictifs sont utilisés comme lignes à retard variable. En passif, c'est un capteur de contrainte, dans certains claviers d'ordinateurs par exemple. En fonction du retard on calcule la distance d'impact, donc la touche enfoncée. De manière active ces fils peuvent servir d'inductance variable, notamment dans les télécommunications aux très hautes fréquences où l'analogique supplante le numérique.

Enfin, il serait très intéressant de développer des matériaux liés ou frittés, en utilisant les mêmes techniques qu'avec les aimants permanents: on pourrait peut-être alors fabriquer des pastilles ou des poutres magnétostrictives directement par moulages.

Les fils magnétostrictifs pourraient avoir des applications similaires aux fils à mémoire de forme. Enfin, on pourrait rêver d'élaborer ces matériaux par dépôt électrolytique ...

D'autres matériaux à base de terres rares ont été également développés pour des applications cryogéniques, les alliages de terres rares et zinc par exemple dont les déformations relatives sous des champs modestes frôlent le 1% à la température de l'azote liquide.

La recherche de nouveaux matériaux se poursuit activement dans le monde, en France, en Allemagne et au Japon en particulier, dans le domaine des matériaux en couches minces et multicouches. L'objectif visé est de réaliser des micro-actionneurs intégrés sur plaquettes de silicium. L'élément actif sera alors constitué d'un bilame formé d'une lame en silice sur laquelle est déposée une couche d'alliage magnétostrictif. Sous champ magnétique, l'alliage tendra à se déformer, ce qui déformera le bilame : on pourra ainsi réaliser des micro-vannes, des micromoteurs à reptation, etc....

A ce jour, on peut distinguer trois voies de recherche pour les matériaux en couches des microsystèmes :

- Les alliages présentant en principe une anisotropie magnétique très faible, ce qui favorise une saturation sous des champs magnétiques faibles. Des résultats encourageants ont été obtenus avec des alliages R-(Fe/Co).
- Les alliages nanostructures devraient permettre de conserver les belles propriétés magnéto-élastiques des matériaux massifs (par exemple du Terfenol-D) tout en réduisant l'effet néfaste de l'anisotropie.
- Des systèmes multicouches enfin ont été élaborés récemment dans lesquels l'abaissement de symétrie aux interfaces favorise des phénomènes nouveaux - et encore mal compris à ce jour - associés à des déformations très brutales sous champs, pour des valeurs de champ magnétique très faibles.

Des applications sous champs faibles sont à espérer pour les prochaines années. L'aspect le plus prometteur est la réalisation de micro-actionneurs sans contacts et pilotés à distance, en réagissant à un champ magnétique qui pourra être engendré à l'extérieur du microsystème.

a) Applications ultrasonore et acoustique

L'utilisation du Terfenol-D prévoit des systèmes ultrasonores de puissance sans précédent. L'institut National de la Science et de la Technologie (NIST) a identifié le Terfenol-D comme la technologie qui dominera la future industrie ultrasonore, dans des champs d'applications entièrement nouveaux. Beaucoup de processus ultrasonores découverts dans les laboratoires n'avaient jamais été commercialisés jusqu'à l'arrivée de ce matériau [14].

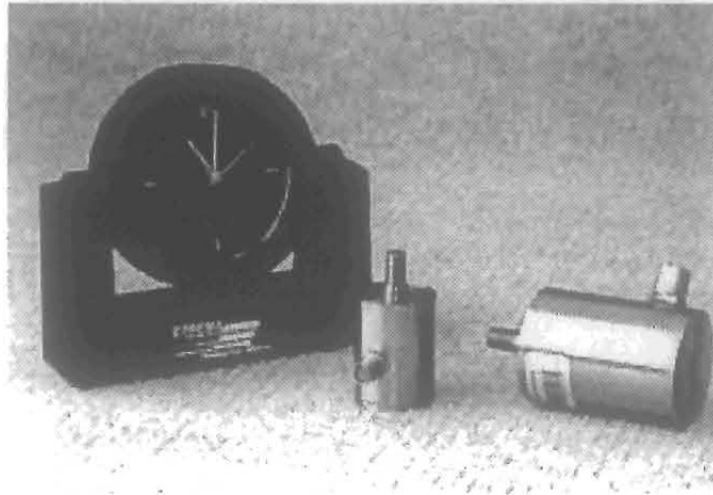


Fig II. 10: Exemples d'applications ultrasonores [14].

Les systèmes ultrasonores ont la particularité d'être plus compact, de fonctionner sous de faibles tensions d'alimentations, de façon continue et d'avoir une efficacité compétitive par rapport aux piézoélectriques. Ces systèmes peuvent fournir des rendements élevés à des fréquences d'environ 20 kHz avec des puissances de 6 à 25 kW. Cette technologie procure d'avantage de puissance et d'efficacité que les mêmes actionneurs PZT, avec des durées de vie plus longues et plus de fiabilité. En effet, il y a un problème fondamental avec les PZT, après synthèse du matériau il y a une étape importante qui est la polarisation du matériau. Or les PZT ont tendance à se dépolariiser, si bien qu'après quelques années le matériau n'est plus actif. Il faudrait le repolariser.

Fréquence	20 kHz \pm 500 Hz
Déplacement	20 μ m, crête à crête
Puissance Maximum	6 kW à 20 kW
Coefficient d'utilisation de fonctionnement	100%
Taille	Diamètre 76 mm, Longueur 154 mm

Tableau II. 4: Caractéristiques classiques d'un dispositif ultrasonore [14].

Les domaines d'applications sont la soudure son chimique et ultrasonore, les outils médicaux, les outils de découpes ultrasonore, et l'usinage ultrasonore.

On retrouve également l'utilisation des matériaux magnétostrictifs dans les domaines de l'acoustique, où ils sont utilisés, par exemple en tant que sonars.

Ils fournissent alors une puissance élevée tout en restant compact, avec une large plage d'utilisation.

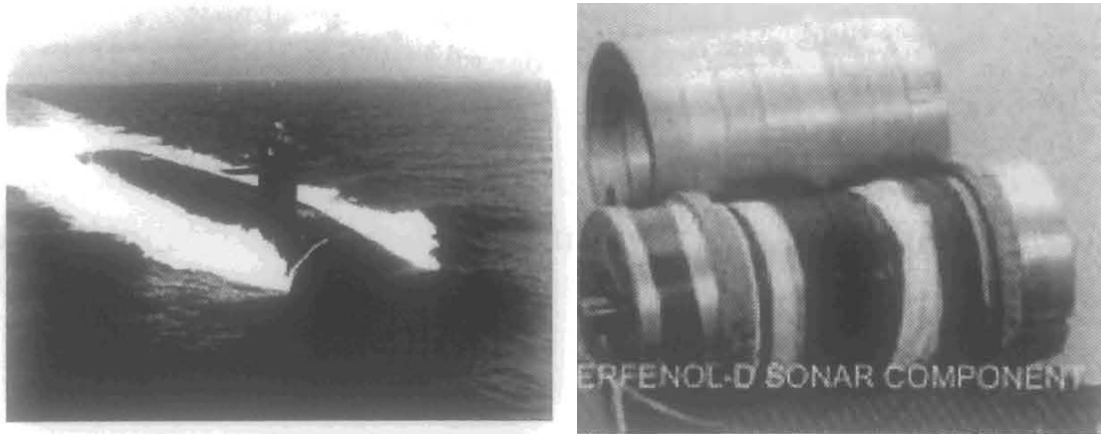


Fig II. 111: Utilisation de matériaux magnétostrictifs dans le domaine acoustique [14].

Ces travaux ont conduit aux applications de contrôle de bruit et de vibration, à la communication, aux systèmes d'alarmes et à la recherche pétrolière.



Fig II. 12: Dispositif magnétostrictif pour forage des puits de pétrole [14].

En raison de sa puissance, de sa plage d'utilisation, de sa basse distorsion harmonique et de sa fiabilité, le Terfenol-D émerge comme le principal actionneur pour le contrôle de bruit et de vibration. Les systèmes actifs de vibration et de réduction de bruit (NVH) ont pour but d'atténuer et de supprimer ces nuisances. Le principe est de fournir une force égale et de même fréquence que le phénomène à effacer, mais déphasé de 180° .



Fig II. 13: Réduction de bruit et de vibrations dans les véhicules de tourisme.

Toutes ces applications, qui couvrent de larges domaines d'utilisations, ont permis l'élaboration d'actionneurs plus conventionnels mais aux caractéristiques très intéressantes.

b) Les actionneurs linéaires

Basés sur le principe de la magnétostriction, ces actionneurs ont la possibilité de répondre rapidement au changement de leur alimentation, avec des déplacements mécaniques puissants.



Fig II. 14: Exemples d'actionneurs linéaires magnétostrictifs [Etrema, 2000].

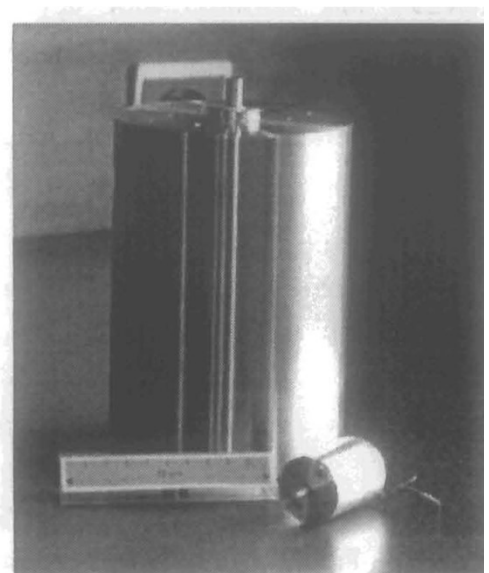


Fig II. 15: Actionneur linéaire, dimensions de l'actionneur: \varnothing 5 cm, L 10 cm, allongement 100 μ m [Cedrat]

Pour le positionnement précis des charges mécaniques, avec force et vitesse, aucune technologie d'actionneurs n'approche les possibilités du Terfenol-D. Etrema Corporation [14], qui produit les barreaux magnétostrictifs massifs les plus performants du marché, travaille avec de nombreux fabricants pour fournir des actionneurs couvrant beaucoup de secteurs.

Les avantages avancés pour les actionneurs à base de Terfenol-D sont les suivants:

- Déplacement plus élevé que tous les actionneurs à matériaux actifs.
- Grande force.
- Relativement bonne tenue en fréquence.
- Réponse de l'ordre de la milliseconde.
- Contrôle précis.
- Fonctionne sur un grand éventail de températures, sous faible tension.

Industries	Application typique
Machines outils	Outils de positionnement et de contrôle
Automobile	Moteurs à combustion: Injecteur
Hydraulique	Pompes et valves
Aérospatiale	Positionnement précis

Tableau II. 5: Liste partielle d'applications industrielle.

Ces matériaux magnétostrictifs, placés dans un champ magnétique aligné avec l'axe du matériau, s'allongent rapidement et avec force.

Cette expansion que l'on peut répéter, se produit dans la direction positive ou négative du champ magnétique. Une optimisation de ces caractéristiques est possible quand le matériau est à la fois polarisé mécaniquement et magnétiquement.

La précontrainte mécanique oriente les domaines magnétiques normalement à l'axe de compression, maximisant le déplacement. Dans la plupart des cas, c'est un ressort spiral ou des rondelles Belleville qui sont employés pour une précontrainte compacte.

La polarisation magnétique, produite par des aimants permanents, permet de positionner un point de fonctionnement du matériau, minimisant les ressources électriques nécessaires.

Un solénoïde produit un champ qui vient se superposer à celui de l'aimant, et causer une expansion ou une contraction du matériau. Par exemple, un courant sinusoïdal provoquera un déplacement sinusoïdal.

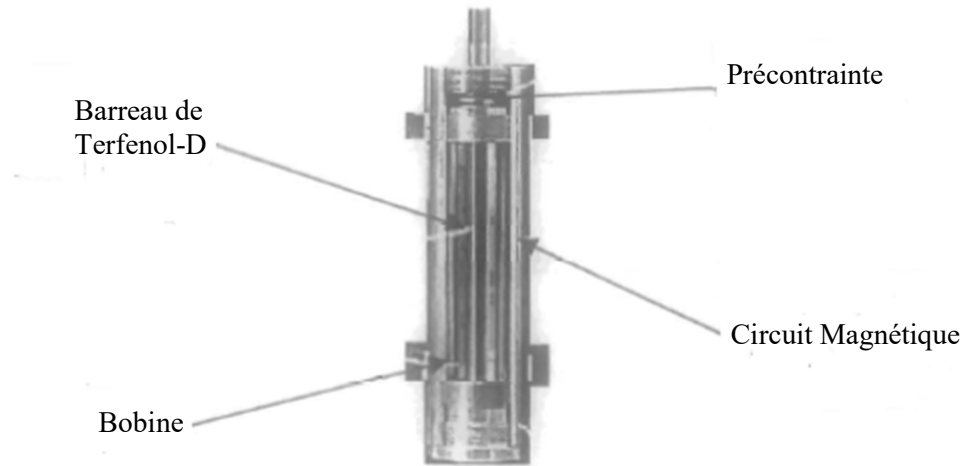


Fig II. 16: Vue en coupe d'un actionneur linéaire magnétostrictif classique.

On peut attendre de tels actionneurs les performances suivantes :

Déplacement maximum (J.1m)	25 à 70
Force dynamique (N)	220 à 890
Force bloquée (N)	462 à 1740
Courant (A)	1.4 à 3.3
Température (OC)	-20 à 100
Masse (kg)	0.4 à 2.3
Puissance absorbée (W)	150 à 400
Force massique (N/kg)	500 à 147

Tableau II. 6: Caractéristiques pour des actionneurs de diamètres de 30 à 50 mm et des longueurs de 80 à 200 mm [14]

II.7.2 Les moteurs/actionneurs magnétostrictifs

Les systèmes présentés ci-dessous étant pour la plupart extraits de brevets confidentiels (NASA, NAVY...). Il ne nous a pas été possible de donner leurs caractéristiques. Nous nous attachons en fait à exposer leurs principes de fonctionnement pour avoir une idée de leur complexité de réalisation.

a) Les moteurs linéaires

Parmi les applications à base de matériaux magnétostrictifs, les actionneurs et moteurs linéaires sont largement répandus. Ils jouent bien souvent le rôle de vérins en développant des forces très importantes. En voici quelques exemples, comme le moteur de Lothar Kiesewetter

[25], du nom de son inventeur, professeur à l'université de Berlin, qui exploite ces types de déformations: l'extension longitudinale et la contraction radiale d'un barreau de Terfenol-D soumis à un champ magnétique suivant son axe Fig II.17.

Un champ magnétique est appliqué à un barreau de Terfenol-D encastré dans un tube. Ce champ provoque une contraction radiale du barreau, qui se désolidarise localement du tube et provoque un déplacement de son extrémité par allongement. On déplace le champ le long du barreau, en excitant successivement une série de bobines, ce qui a pour effet de déplacer la zone déformée, et de faire par conséquent avancer ce tronçon du barreau.

Le cycle complet, qui correspond au déplacement du barreau entier, est achevé quand la dernière tranche du barreau arrête d'être soumise à un champ magnétique. Pour obtenir une course de plusieurs centimètres, ce cycle est répété plusieurs milliers de fois à haute fréquence.

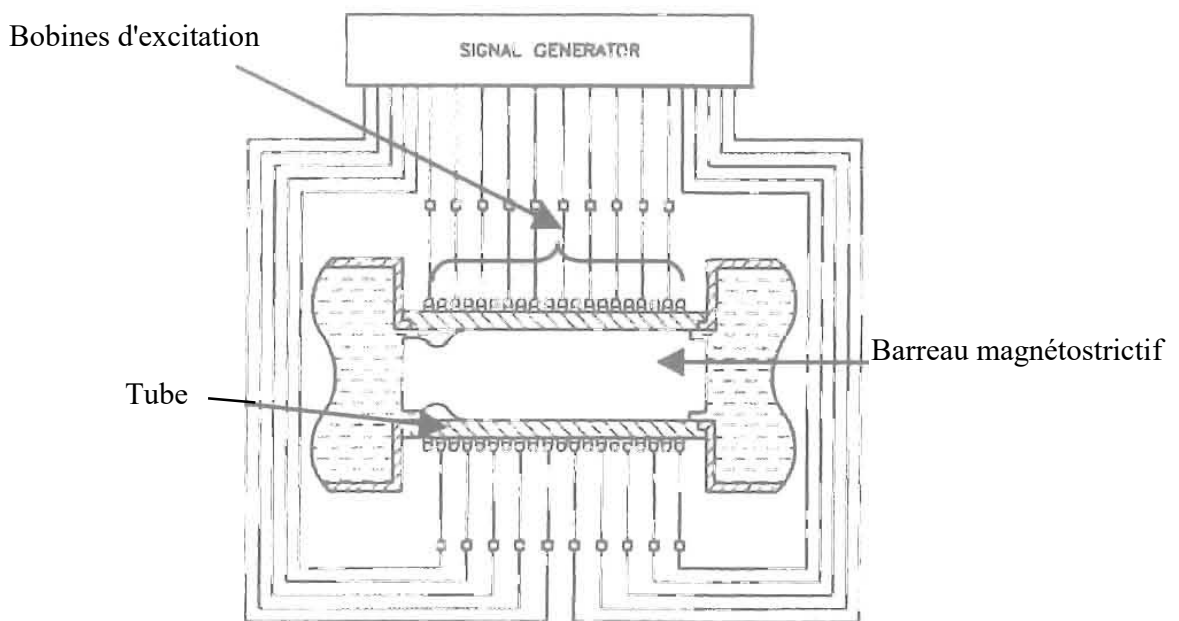


Fig II. 17: Moteur Kiewewetter (début d'un cycle d'allongement local)

Un tel vérin basé sur un barreau de 15 cm de longueur et de 3 cm de diamètre peut théoriquement soulever des charges de plusieurs tonnes à des vitesses de l'ordre du centimètre par seconde. En outre, du fait de l'encastrement, les charges peuvent être soutenues par le moteur non alimenté. Ce principe est déjà utilisé avec succès dans une usine de fabrication de papier au Canada pour positionner au micromètre près les énormes rouleaux, pesant plusieurs tonnes.

Le principe de fonctionnement de ce moteur linéaire assez original est employé par Stanley

[26] pour en faire d'une pompe hydraulique Fig II.18.

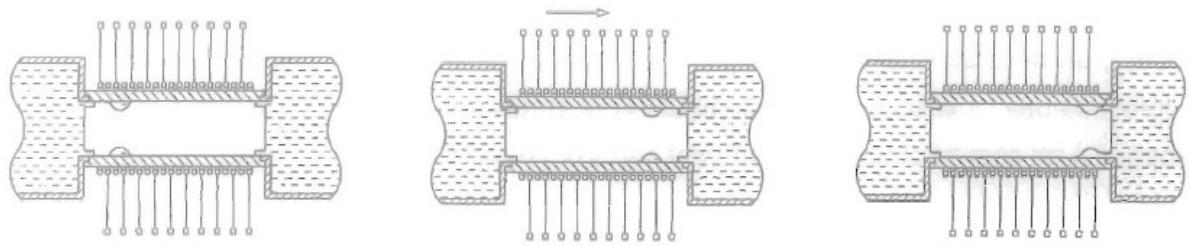


Fig II. 18: Visualisation d'une progression d'onde de déplacement du moteur Kiesewetter.

Cette pompe magnétostrictive transfère un fluide à partir d'une chambre d'approvisionnement (basse pression) à une chambre de réception (haute pression). Le noyau est composé d'un matériau magnétostrictif de Terfenol-D. Enroulées autour de la surface externe du logement sont disposés une pluralité d'enroulements électriques. Chaque enroulement est activé séquentiellement par un générateur qui produit des signaux électriques de courant continu. L'activation d'un des enroulements crée un champ magnétique, lequel provoque une augmentation longitudinale du matériau et un rétrécissement radial, créant une cavité. Le générateur de signal active séquentiellement les enroulements pour déplacer la cavité et le fluide qu'elle contient, de la chambre d'approvisionnement à la chambre de réception.

Les pompes conventionnelles sont composées d'une multitude de pièces mobiles (roulements, pistons, valves, etc...), de moteurs électriques, de transmissions de vitesse, etc... Toutes ces pièces sont sujettes à la fatigue (blocage ou rupture), et ont une disparité thermique qui peut conduire à une dégradation prématurée du système. Il est de ce fait difficile de les miniaturiser en raison de la complexité de fabrication et de l'interaction de tous ces composants.

b) Actionneurs et moteurs rotatifs

Un moteur magnétostrictif rotatif, basé sur le principe du moteur Kiesewetter est proposé par [27]. On retrouve le même principe de fonctionnement mais avec un anneau magnétostrictif, qui de par sa forme, se déformera circulairement.

Ce moteur est donné pour avoir un couple très important.

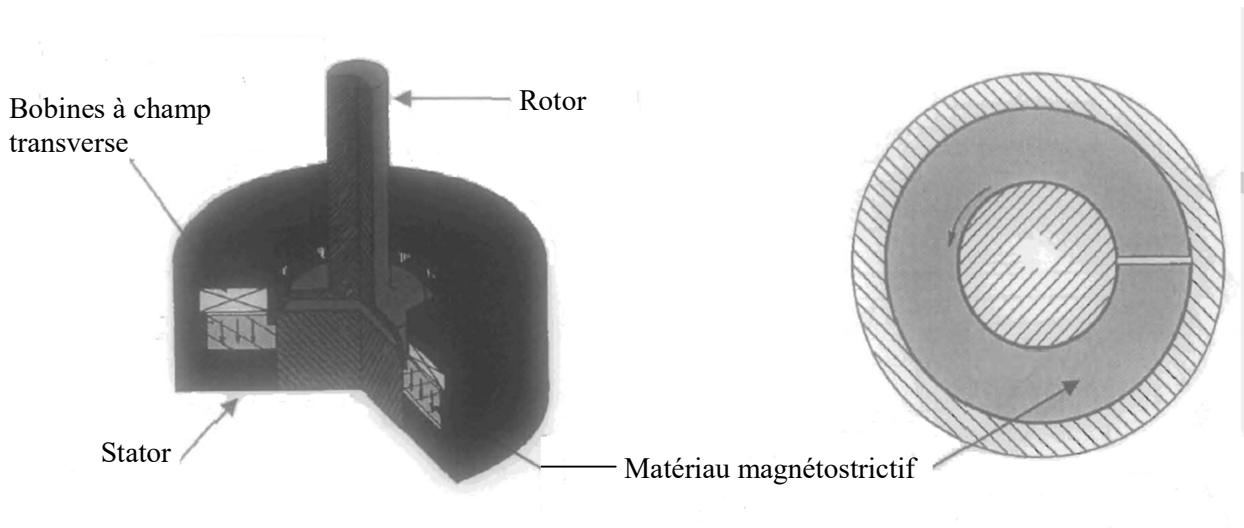


Fig II. 19: Vue en coupe du moteur Anatas.

D'autres principes sont à l'étude, parmi eux, un moteur développé par [28] à la Navy.

Voici son principe de fonctionnement traduit du brevet (Voir Fig II.20).

Des modules d'entraînements, pouvant être axialement prolongés, sont angulairement espacés dans un arrangement polygonal sur un anneau intérieur, pour établir un effort de pression. Chaque module inclut au moins deux éléments magnétostrictifs dans les "tiges". Des enroulements activés pour produire des champs magnétiques provoquent l'élongation et la contraction simultanées des éléments de tige. Lesquels fournissent un couple continu à un rotor constitué par l'anneau externe ou l'axe intérieur.

Une telle déformation magnétostrictive simultanée et opposée des éléments, transmet des forces dans une direction linéaire, afin d'établir un effort de compression. Un couple de rotation élevé est de ce fait produit, pendant chaque cycle d'entraînement, en fonction du rapport de la longueur axiale des éléments de tige dans chaque module, et de leur espacement radial à partir de l'axe de rotation commun.

L'anneau annulaire peut agir en tant que rotor, tandis que l'autre est jugé stationnaire comme armature de réaction.

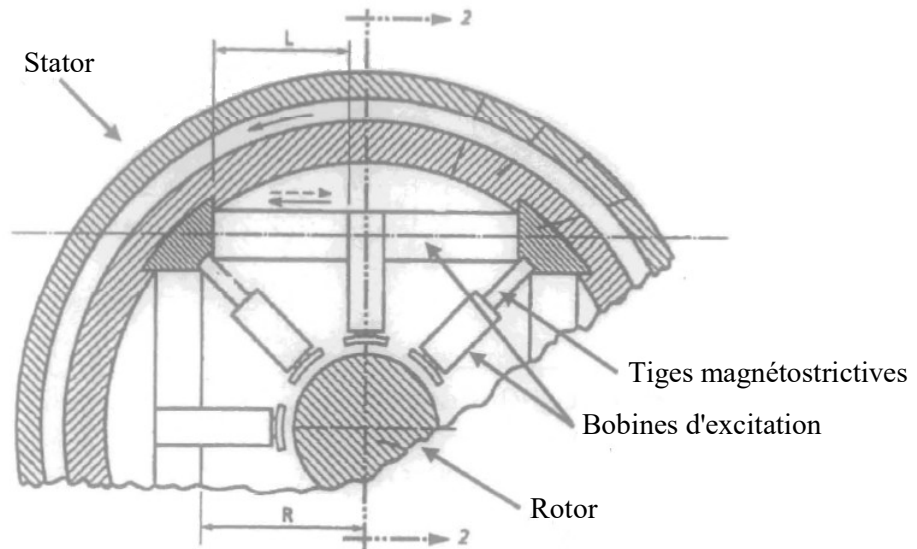


Fig II. 20: Moteur de Clark, brevet déposé par la Navy - vue de face -

Un couple est obtenu au moyen de l'adhérence des tiges magnétostrictives qui viennent au contact du disque d'entraînement. Il est en conséquence souhaitable d'employer des matériaux avec une grande magnétostriction excédant 1000 ppm, par exemple, comme le composé Terfenol-D utilisé dans cette application.

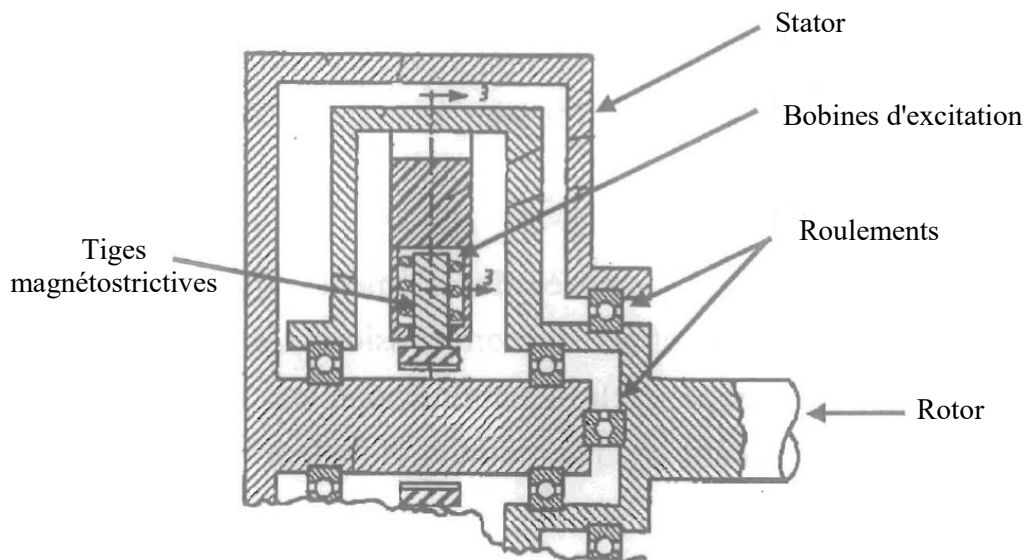


Fig II. 21: Moteur de Clark - vue de profil -

Les moteurs magnétostrictifs comportent généralement un corps actif comme un barreau, qui subit un changement dimensionnel une fois magnétisé par un champ d'excitation électrique

produit par un enroulement [29]. L'utilisation d'une pluralité de tiges magnétostrictives reliées dans divers arrangements est également assez employée dans l'état de l'art [30], [31].

La plupart des moteurs magnétostrictifs transforment le courant électrique directement en mouvement linéaire mécanique. Divers arrangements d'embrayages ou d'engrenages seraient alors nécessaires afin de convertir un mouvement linéaire en mouvement rotatif ou écart angulaire. Dans les moteurs conventionnels, un résultat rotatif à couple élevé est obtenu au moyen de réducteurs de transmission qui provoquent une diminution de la vitesse de rotation. De tels réducteurs sont habituellement associés à un jeu de dentures indésirable qui crée des problèmes de positionnements angulaires.

C'est donc une conception intéressante que de pouvoir transformer "magnétostrictivement" le courant électrique en mouvement rotatif à couple élevé en éliminant les problèmes dus aux réducteurs de vitesses.

Dans la même veine, nous pouvons citer le moteur de Macabee [32], lequel utilise lui aussi des tiges magnétostrictives qui viennent se loger dans des encoches et les entraînent en rotation. Fig II.22.

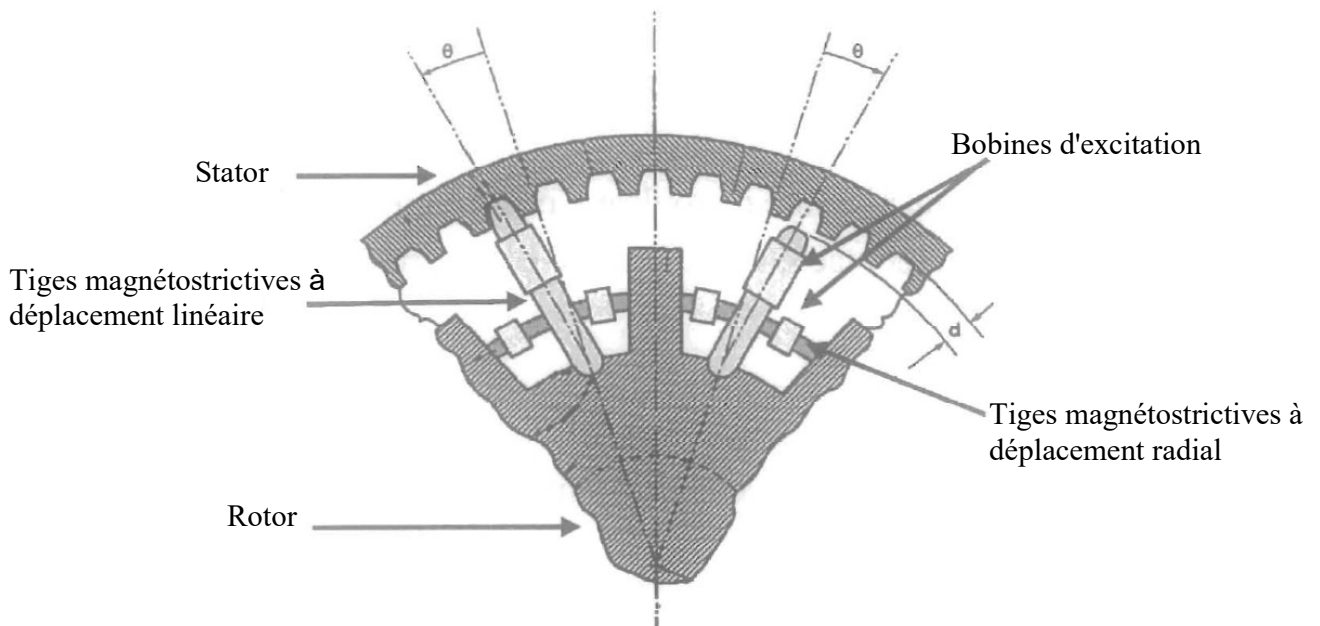


Fig II. 22: Moteur magnétostrictif à encoches de Macabee.

Notons ici, que les amplitudes demandées aux matériaux paraissent disproportionnées, donc que le dessin ne doit pas être aux dimensions. Le couple de tenue est obtenu par cisaillement des tiges (1). Il faut préciser que ce type de matériau ne supporte pas ce genre de travail.

Vranish [33] au Naval Surface Weapon Center, quand a lui, a conçu l'actionneur rotatif suivant, pour assurer le micro-positionnement angulaire d'une antenne de satellite. Il fonctionne à de très faibles vitesses, ce qui élimine le réducteur nécessaire aux moteurs électriques. Mais ce moteur, qui possède plus d'une centaine de pièces, et d'une conception fort complexe.

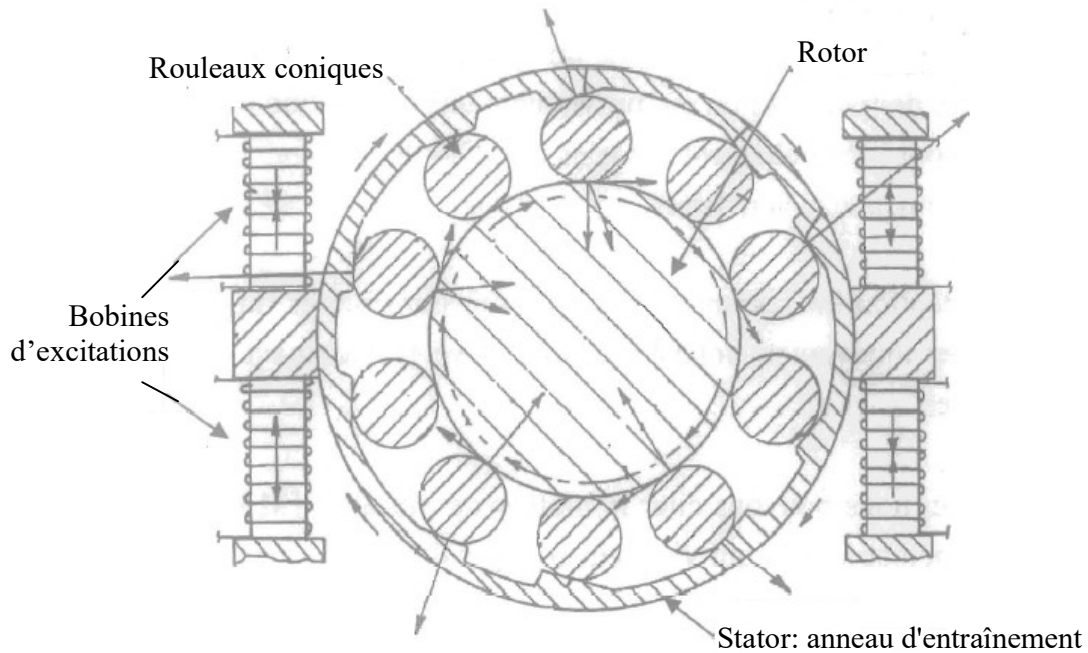


Fig II. 23: Moteur de Vranish , brevet déposé par la NASA - vue en coupe de dessus –

C'est un moteur magnétostrictif encerclé par une pluralité de rouleaux équidistants sous forme de deux ensembles coniques respectivement en contact avec une came et la surface intérieure de l'anneau d'entraînement.

L'anneau d'entraînement est rattaché aux ensembles de paires de rouleaux coniques positionnées en oppositions. Chaque rouleau d'une paire a son extrémité placée à l'extrémité des bobines d'excitation.

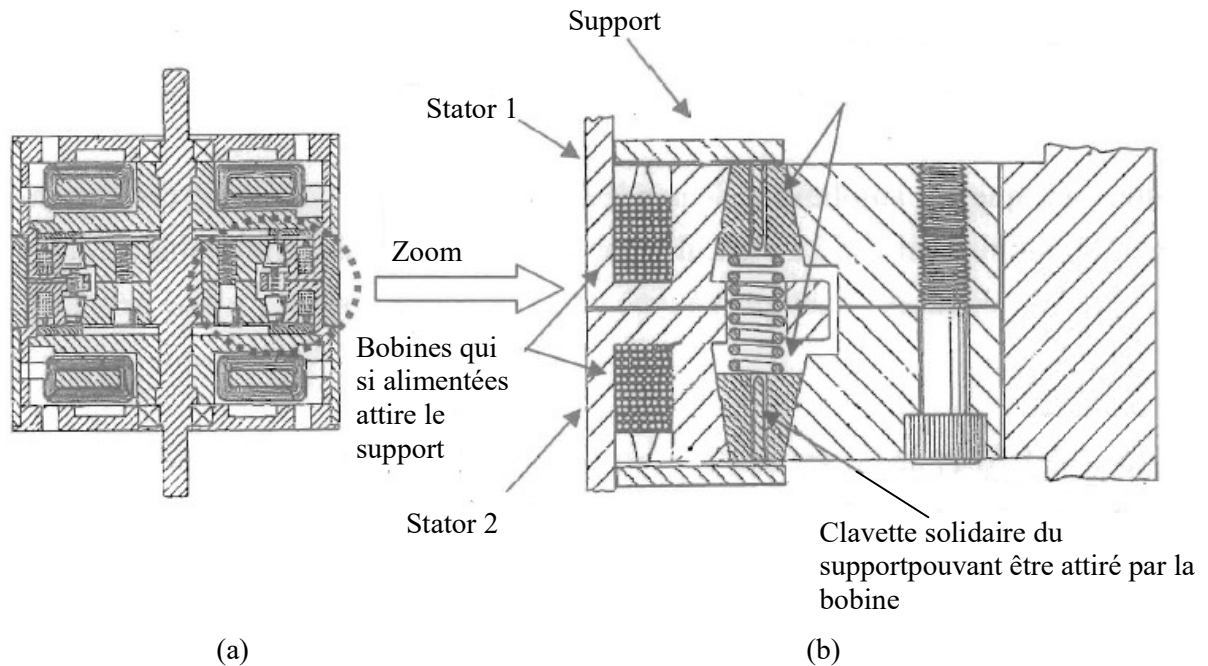


Fig II. 24: Moteur de Vranish : (a) vue latérale (b) vue de la partie active

Vu le principe de fonctionnement, il faut qu'une partie des rouleaux soit désengagée sinon aucune rotation n'est possible, tout est bloqué. C'est le rôle de ces petites bobines. Quand, par exemple, la bobine du bas est alimentée, elle attire le support à elle, lequel vient pousser le cône vers le haut, il reste droit grâce à la clavette. Il n'est alors plus coincé entre les deux surfaces. Ce qu'il faut remarquer c'est qu'il y a en fait deux stators distincts, un au dessus, l'autre au dessous, la Figure II.24 n'en représente qu'un. Et les rouleaux coniques peuvent avoir un fonctionnement séparé. On suppose que dans un sens de fonctionnement, par exemple, le dispositif-du haut est moteur, celui du dessous empêchant le rotor de tourner en "arrière" lorsque le premier revient dans sa position.

Des actionneurs de type hybride ont également vu le jour, comme celui de Venkataraman [34]. Le principe de fonctionnement joue sur la friction d'une tige sur un disque faisant office de rotor.

Deux actionneurs magnétostrictifs provoquent un mouvement pendulaire de la tige rouge, qui se trouve être un piézoélectrique. Celui-ci, en s'allongeant, vient au contact du disque bleu et lui transmet par adhérence, un mouvement de rotation.

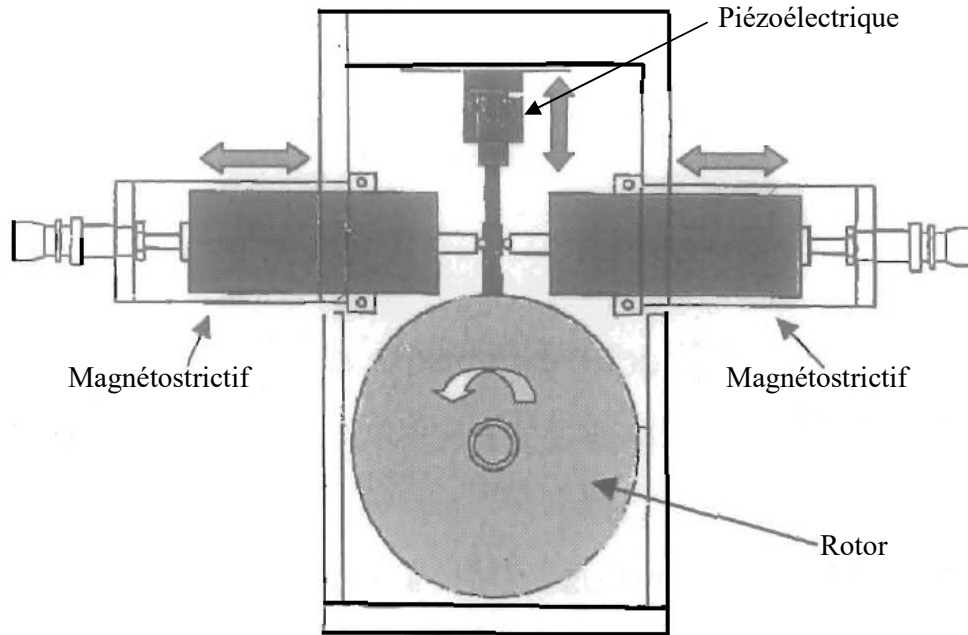


Fig II. 25: Moteur hybride magnétostrictif/piézoélectrique.

Dans ce prototype, il n'y a pas de matériau magnétostrictif à la place du piézoélectrique, soit à cause de la place que prennent la bobine et le circuit magnétique, soit parce qu'on a voulu faire une adaptation d'impédance. En effet, les systèmes piézoélectriques sont capacitifs, et les systèmes magnétostrictifs sont inductifs. Ainsi, l'utilisation des deux peut permettre un meilleur transfert d'énergie au niveau de l'alimentation. On se retrouve alors dans le cas d'un circuit résonant R-L-C ou il faudra accorder les fréquences de résonance électrique et mécanique.

II.8 Notre Expérience

II.8.1 Optimisation magnétique d'un actionneur magnétostrictif linéaire monobloc

Dans ce domaine, nous avons étudié le fonctionnement d'un actionneur monobloc Fe-Co magnétostrictif linéaire (Voir FigII.26) [35].

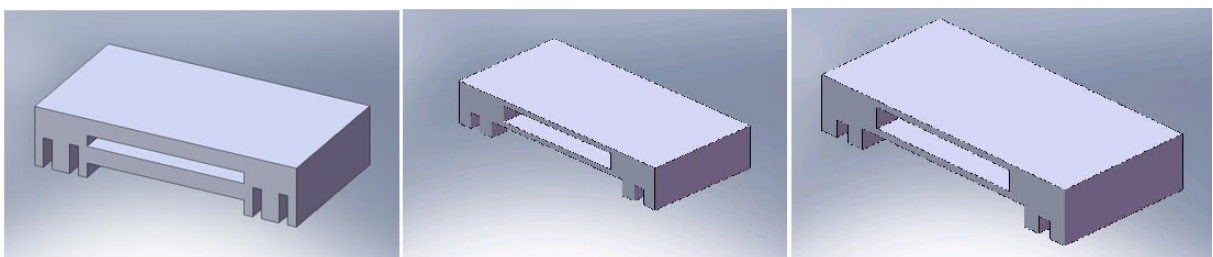


Fig II. 26. (a) Premier Prototype (b) Deuxième Prototype (c) Prototype Final

Grace à le logiciel Flux-2D nous avons fait l'étude de la physique magnétique seulement, nous avons trouvé que les performances de l'actionneur sont dictées par la force d'adhérence des pieds de l'actionneur et l'allongement du corps central. Elles sont tributaires de l'architecture et de la géométrie de l'actionneur. Il ressort que le bobinage en forme de « 8 » exigeant alors une géométrie adaptée de l'actionneur, se présente comme une solution aux différents problèmes par l'actionneur dans sa simple version (première prototype).

Le tableau comparatif (III.4) l'amélioration des performances de l'actionneur par modification de sa géométrie sur trois prototypes.

		Premier Prototype	Deuxième Prototype	Prototype final
Forces pince 1 alimentée	F_{p1}	28,196	42.177	164,542
	F_{p2} Induite	0,806	$4,133.10^{-5}$	$5,857.10^{-6}$
Forces des pinces avec le centre alimenté	$F_{p1} = F_{p2}$	9,889	$1,125.10^{-3}$	$1,177.10^{-3}$
Forces des pinces avec le centre alimenté et une pince	F_{p1}	17,085	21,923	111.096
	F_{p2} Induite	10,55	0	0

Tableau II. 7 : Les forces obtenues dans les différents prototypes (Newton)

Les résultats de simulation du prototype final sont très satisfaisants :

- La force de pincement est améliorée.
- Les forces perturbatrices créées par les flux de fuites sont éliminées.

II.8.2 Etude et simulation d'un actionneur magnétostrictif spiral monobloc

Puis nous avons conçu un actionneur rotatif magnétostrictif basé sur un élément actif original. Cet élément actif en FeCo est de forme spirale et se déforme en torsion. Cette fois nous avons implémenté le couplage faible magnéto-mécanique grâce à la synchronisation de deux logiciels Comsol-Multiphysics et Solid-Works pour la géométrie qui a été très compliquée (Voir Fig II.27), et l'implémentation de deux physiques Magnétique et Mécanique [36].

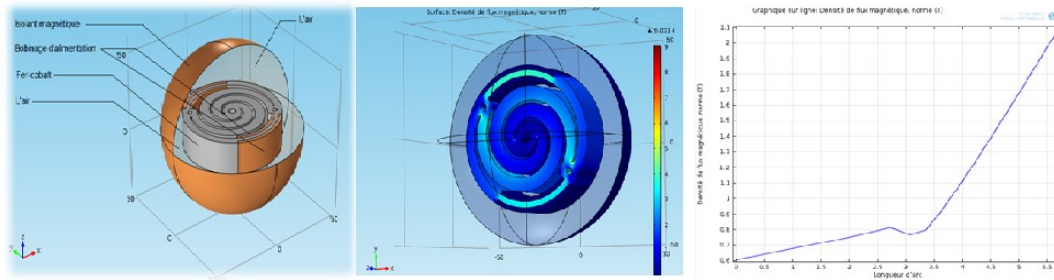


Fig II. 27: (a) Prototype (b) Surface Induction magnétique (c) Arc d'induction

Nous avons calculé le couple développé par l'actionneur qui a été 1.3 N.m.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les divers aspects économiques qui entrent en jeu au niveau des technologies. Parmi ceux-là, la recherche sur les nouveaux matériaux prend une place très importante dans l'élaboration de nouveaux systèmes toujours plus performants. Les programmes de recherches fleurissent dans de nombreux pays, et sont largement soutenus par les gouvernements respectifs comme étant une source d'innovation technologique importante, en faisant notamment référence aux systèmes "intelligents".

Par la suite, nous avons exposé les différents matériaux entrant dans la conception de la majorité de ces systèmes dits "intelligents", comme les Alliages à Mémoire de Forme (AMF), les matériaux piézoélectriques et les matériaux magnétostrictifs.

C'est ainsi que les actionneurs piézoélectriques sont préférés pour les applications haute fréquence ou à faible temps de réponse, puisque leur bande passante est seulement limitée par la vitesse du son dans les solides.

On leur préférera au contraire des actionneurs magnétiques si l'on dispose d'une source de courant ou de champ magnétique suffisante.

De ces actionneurs magnétiques se dégage la classe des magnétostrictifs, à base notamment de Terfenol-D. Ces actionneurs sont aujourd'hui parmi les plus prometteurs et se caractérisent par une densité d'énergie nettement plus importante que celle des actionneurs PZT, développent une déformation à vide environ deux fois plus forte et peuvent soulever des charges également deux fois supérieures, sous faible tension, et avec une commande "simplifiée". Malheureusement, ils sont plus volumineux et plus lourds.

La conception et l'optimisation de ces actionneurs/moteurs piézoélectriques et magnétostrictifs nous demande de développer un code de calcul que sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

**Méthode des éléments finis pour les
comportements couplés**

Introduction

L'établissement de modèles numériques est une étape essentielle pour disposer d'outils de calcul adaptés à la modélisation de dispositifs à base de matériaux actifs. Or, il n'existe à ce jour aucun logiciel de modélisation permettant de prendre en compte le comportement couplé et non-linéaire des matériaux magnétostrictifs. De même, aucun logiciel ne permet l'étude de structures associant divers matériaux actifs. Les potentialités offertes par de tels outils permettraient pourtant de favoriser le développement et l'amélioration de structures innovantes basées sur l'utilisation de ces matériaux.

La résolution des problèmes couplés, magnétostrictif et piézoélectrique, conduit implicitement à la résolution de systèmes d'équations aux dérivées partielles. La résolution numérique de tels problèmes s'appuie généralement sur des méthodes du type différences finies, éléments finis, volumes finis... Nous avons retenu la méthode des éléments finis pour sa facilité d'utilisation et d'intégration des lois de comportement.

Notre objectif est d'obtenir un outil apte à modéliser des structures combinant des matériaux magnétostrictifs et piézoélectriques. La première étape est de disposer de formulations associées aux problèmes magnéto-mécaniques et piézo-électriques. Une combinaison de ces formulations peut ensuite être envisagée pour une résolution couplée de ces problèmes.

III.1 Couplage électromécanique

Le couplage électromécanique nous conduit à la résolution de système d'équations qui assemble l'équation d'équilibre mécanique et la loi de Gauss suivant [37] :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \sigma = f \\ \nabla D = \delta \end{cases} \quad (III.1)$$

D'où :

U : Vecteur de déformation.

σ : tenseur de contrainte.

f : Vecteur des forces de charge.

ρ : masse volumique.

D : champ de déplacement électrique.

δ : densité des charges électriques libres.

On peut récrire le système (1) sous la forme :

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \nabla \begin{Bmatrix} -\sigma \\ D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ \delta \end{Bmatrix} \quad (III.2)$$

Pour le cas trois dimensions le tenseur de contrainte σ a les composants :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Et :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \tau_{xz} = \tau_{zx} \tau_{yz} = \tau_{xy}$$

L'induction électrique D a tridimensionnelle D_x, D_y et D_z .

Les lois de comportement définissent le tenseur de contrainte et l'induction électrique en fonction de la déformation et le champ électrique comme le suivant :

$$\begin{Bmatrix} \{\sigma\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C] & -[d]^T \\ [d] & [\varepsilon] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\epsilon\} \\ \{E\} \end{Bmatrix} \quad (III.4)$$

D'où :

$$\begin{Bmatrix} \{\sigma\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ D_x \\ D_y \\ D_z \end{Bmatrix} \quad (III.5)$$

$$\begin{Bmatrix} \{\epsilon\} \\ \{E\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} \quad (III.6)$$

$$[d] = \begin{bmatrix} d_{31} & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ d_{33} & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

C_{ij} : sont les coefficients d'élasticité, ε_{ij} : sont les coefficients représentent la permittivité électrique, et d_{ij} : sont les coefficients de la contrainte piézoélectrique. Ce dernier coefficient est écrit sous la forme qui confirme la notation conventionnelle des matériaux piézoélectrique ou la direction (OZ) aligne avec la direction de polarisation de matériau.

Finalement le vecteur de déformation est écrit en fonction de déplacement u selon l'axe (OX), déplacement v selon l'axe (OY) et déplacement w selon l'axe (OZ) :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (III.10)$$

Le champ électrique E écrit en fonction de potentiel électrique :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (III.11)$$

On peut substituer les équations de la déformation (III.10) et le champ électrique (III.11) au-dessus dans les équations constitutifs et par substitution cette dernière dans le système des équations (III.2) nous obtenons un nouveau système d'équation qui contient la divergence de déplacement et la divergence de potentielle électrique.

III.1.1 Modèle numérique

Nous avons développé un code de calcul que s'a appelé « FEM3DPIE » sous l'environnement de logiciel *Matlab* capable de résoudre le système des équations hyperboliques sous la forme suivante :

$$d_a \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} - \nabla(C \otimes \nabla \mathbf{U}) + a \mathbf{U} = f \quad (III.12)$$

Ou sous la forme tensorielle :

$$d_a \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_{ijkl} \frac{\partial \mathbf{U}_j}{\partial x_l} \right) + a_{ij} \mathbf{U}_j = f_i \quad (III.13)$$

Dans notre code la solution de notre système est :

$$U = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ V \end{pmatrix} \quad (III.14)$$

III.1.2 Calcul des éléments de la matrice de rigidité

La fonction *assembpe3d.m* récrit le tenseur C_{ijkl} sous la forme d'une matrice de dimension $N \times N$ (N : nombre des inconnues dans notre cas u, v, w , et V donc $N=4$) contient seize sous-matrices de dimension 3×3 .

Dans l'équation (III.13) le terme $\frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_{ijkl} \frac{\partial \mathbf{U}_j}{\partial x_l} \right)$ lie le tenseur C et le gradient de la solution U on peut le voir sous la forme explicite suivant :

$$[c_{klij}] \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{v}\} \\ \{\dot{w}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} \quad (III.15)$$

Nous pouvons déterminer les différents composants de C par les formules suivants [38]:

$$[c_c] = \int_v D[\mathbf{w}]^t : [C] : D[\mathbf{w}] dv \quad (III.16)$$

$$[c_d] = - \int_v D[\mathbf{w}] : [d] \cdot \nabla[\mathbf{w}] dv \quad (III.17)$$

$$[c_\varepsilon] = \int_v \nabla[\mathbf{w}] : [\varepsilon] : \nabla[\mathbf{w}] dv \quad (III.18)$$

Avec : \mathbf{w} est la fonction d'interpolation (*Shape function*) et v est le volume de tétraèdre.

Finalemnt nous obtenons les coefficients de la matrice de couplage électromécanique globale

$[C_{ijkl}]$ peut formuler comme suit :

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc|ccc|ccc} [c_{11} & 0 & 0] & [0 & c_{12} & 0] & [0 & 0 & c_{13}] & [0 & 0 & d_{31}] \\ [0 & c_{66} & 0] & [c_{66} & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] \\ [0 & 0 & c_{44}] & [0 & 0 & 0] & [c_{44} & 0 & 0] & [d_{15} & 0 & 0] \\ & & & [c_{66} & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] \\ & & & [0 & c_{11} & 0] & [0 & 0 & c_{13}] & [0 & 0 & d_{31}] \\ & & & [0 & 0 & c_{44}] & [0 & c_{44} & 0] & [0 & d_{15} & 0] \\ & & & & & & [c_{44} & 0 & 0] & [d_{15} & 0 & 0] \\ & & & & & & [0 & c_{44} & 0] & [0 & d_{15} & 0] \\ & & & & & & [0 & 0 & c_{33}] & [0 & 0 & d_{33}] \\ & & & & & & & & & - \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (III.19)$$

Et:

$$[c_{21ij}] = [c_{12ij}]^t, [c_{31ij}] = [c_{13ij}]^t, [c_{32ij}] = [c_{23ij}]^t, [c_{41ij}] = [c_{14ij}]^t, [c_{42ij}] = [c_{24ij}]^t, [c_{43ij}] = [c_{34ij}]^t.$$

III.1.3 Application

Nous avons choisi une poutre de longueur de 10 mm , largeur de 2 mm et épaisseur de 0.5 mm .

L'étude de poutre est selon l'axe (OX) comme montre la figure suivant.

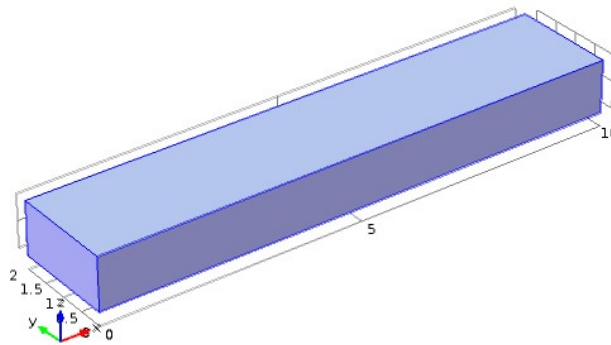


Fig III. 1 : Géométrie de modèle

a) Polarization de matériau

Comme la poutre est orienté suivant l'axe des x , nous avons appliqué deux types de polarisation: x -polarisation (où la direction de polarisation est alignée sur l'axe des x) et z -polarisation (où la direction de polarisation est orientée avec l'axe z). Le changement de la direction de polarisation conduit à deux types de déplacement (le long de l'axe des x et de l'axe des z) dans le cas d'une charge statique et dans le cas d'une charge harmonique respectivement. L'effet de la direction de polarisation peut être remarqué sous la forme d'onde.

Il existe de nombreuses méthodes pour changer la direction de polarisation. Le premier est de changer les éléments de la matrice de couplage d , le second est seulement de changer la coordonnée du système (l'axe des x devient l'axe des z) et le troisième est de changer la direction de la poutre.

b) Conditions aux limites

Pour la mécanique de structure, la poutre est fixée sur sa surface à $x = 0$ et toutes les autres surfaces sont libres. Pour les conditions électrostatiques, nous avons appliqué $200 V$ comme différence de potentiel entre les surfaces supérieure et inférieure de la poutre. Ceci donne une élévation perpendiculaire du champ électrique le long de la direction de polarisation (x -direction) et induit ainsi une déformation de cisaillement transverse.

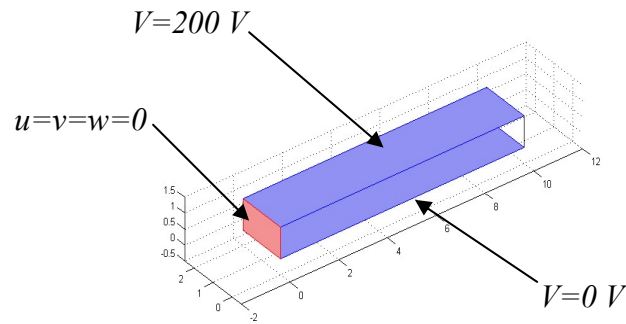


Fig III. 2 : Conditions aux limites

c) Propriétés de matériau

Le matériau piézocéramique étudié dans cet exemple est un matériau transversalement isotrope PZT-5H, qui est une classe spéciale de matériaux orthotropes. Un tel matériau a les mêmes propriétés dans un plan (comportement isotrope) et a des propriétés différentes dans la direction normale de ce plan. Toutes les propriétés du matériau étudié sont décrites dans le tableau suivant [39].

<i>Elastic compliance</i> ($\times 10^{11} \text{ m}^2/\text{N}$)	
C_{11}	1.27205
C_{12}	0.802122
C_{13}	0.846702
C_{33}	1.17436
C_{44}	0.229885
C_{66}	0.234742
d_{31}	-6.62281
d_{33}	23.2403
d_{15}	17.0345
<i>Dielectric Relative Permittivity</i>	
ϵ_{11}	1704.4
ϵ_{33}	1433.6

Tableau III. 1 : Coefficients de matériau PZT-5H

III.1.4 Résultats

Plusieurs évaluations numériques ont été réalisées pour démontrer la capacité du "FEM3DPIE" développé. Deux cas de charge ont été étudiés pour montrer que ce modèle a la possibilité d'étudier plusieurs cas du problème des matériaux piézoélectriques. Cet aspect est

étudié en considérant la tension appliquée statique et harmonique. Les résultats obtenus doivent être comparés aux mêmes résultats obtenus analytiquement dans le cas de l'étude statique et à ceux obtenus avec COMSOL-Multiphysics dans le cas de la charge harmonique pour évaluer l'efficacité du modèle développé.

a) Étude stationnaire

Les simulations suivantes sont effectuées sur le modèle d'actionneur de poutre piézoélectrique par "FEM3DPIE". Deux directions de polarisation sont considérées et par conséquent deux résultats de simulation seront présentés. Sur la Fig III.3, nous présentons la répartition du potentiel électrique sur la poutre en fonction des conditions aux limites imposées. Les résultats de la polarisation de l'axe z sont présentés sur la Fig III.4. Sur cette figure, le déplacement total dû au différence potentiel de 200 V est le long de l'axe des x.

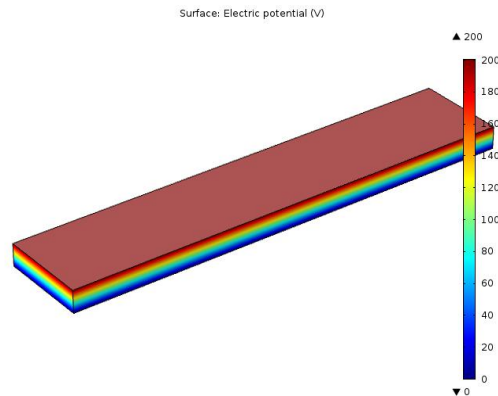


Fig III. 3 : Potentiel électrique appliqué aux bornes de la poutre

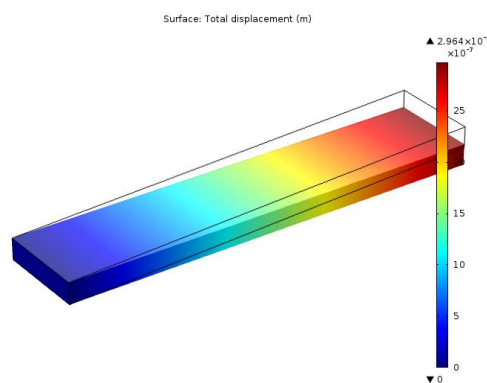


Fig III. 4 : la forme de déformation avec le déplacement totale sous une différence de potentiel de 200 V (polarization z-axe)

De plus, les résultats de simulations de la Fig III.5 ont été obtenus sur le faisceau polarisé sur l'axe des x par le modèle numérique "FEM3DPIE". Dans ce cas, le déplacement total dû à un

différence de potentiel de 200 V est le long de l'axe z. Ainsi, la matrice de couplage devient [40]:

$$[d] = \begin{bmatrix} d_{31} & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ d_{33} & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

Et le tenseur global du couplage est donné par l'équation (III.21).

$$[c_d] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

Les résultats de simulation obtenus sont présentés sur la FigIII.5. Dans ce cas, le déplacement total dû à une différence de potentiel de 200 V est le long de l'axe (OZ)

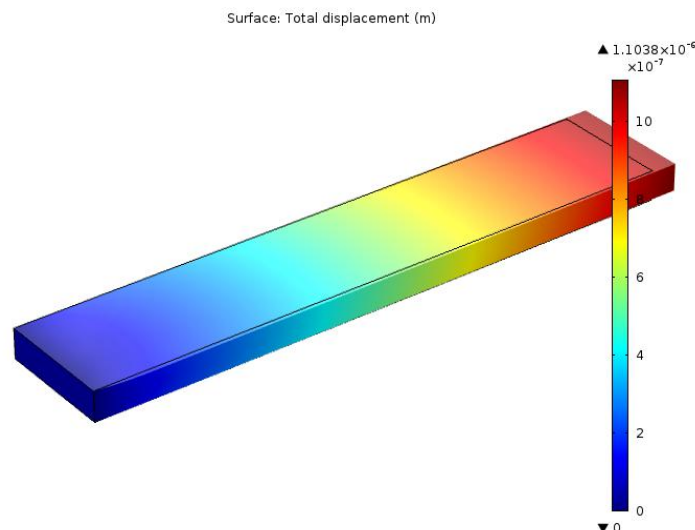


Fig III. 5 : Forme déformée et déplacement total dû à une différence de potentiel de 200 V (l'axe des coordonnées est polarisé).

Pour calculer le déplacement z total, nous utilisons l'équation suivante [41] [42]:

$$u_z = \frac{Lg_{15}V}{h} \quad (III.22)$$

Où:

L est la longueur de l'actionneur du faisceau.

V est la tension appliquée.

h est l'épaisseur de l'actionneur du faisceau.

g_{15} est une constante de couplage égale à $7,41 \times 10^{-10} \text{ C/N}$.

L'équation (III.22) donne une valeur de $2,964 \text{ m}$. Ce déplacement est égal au déplacement maximal dans la FigIII.7 étant donné les résultats de l'étude de fréquence qui sera présentée dans la section suivante pour $f = 0$ qui correspond à la charge statique.

Afin d'étudier l'effet de la tension appliquée sur le déplacement total en (OZ) de l'actionneur de la poutre, nous avons appliqué une tension variant entre $20V$ et $1000V$. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus avec le modèle analytique et les deux résultats sont présentés ensemble sur la FigIII.6. Une inspection visuelle de cette figure montre qu'il y a une assez grande proportionnalité dans la variation du déplacement total en fonction de la tension appliquée. D'autre part, les résultats obtenus avec le modèle développé "FEM3DPIE" sont en bon accord avec ceux calculés analytiquement.

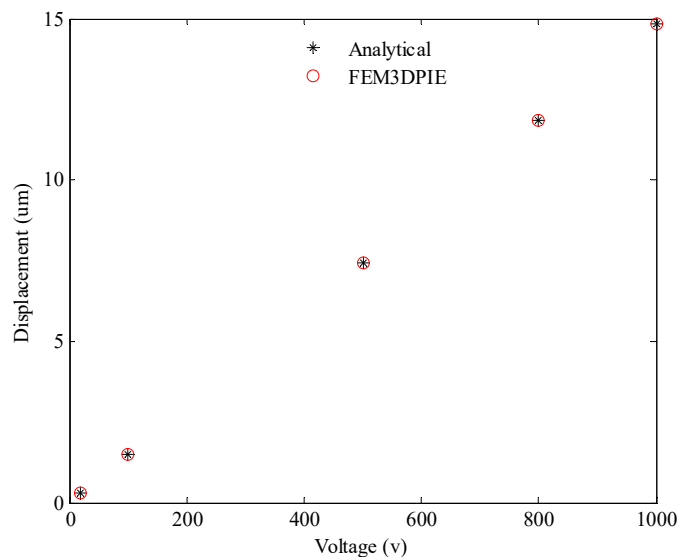


Fig III. 6 : Variation du déplacement total en fonction de la tension appliquée.

b) Étude fréquentielle

Dans le domaine fréquentiel, nous avons appliqué dans un premier temps la charge harmonique de tension $V(t) = V_{max}\sin(\omega t)$. Nous avons sélectionné une plage de fréquence comprise entre 40 Hz et 100 Hz . À côté de cette gamme de fréquences, le comportement de la poutre est très compliqué [43][44]. Les résultats obtenus du déplacement total sont présentés sur la Fig III.7.

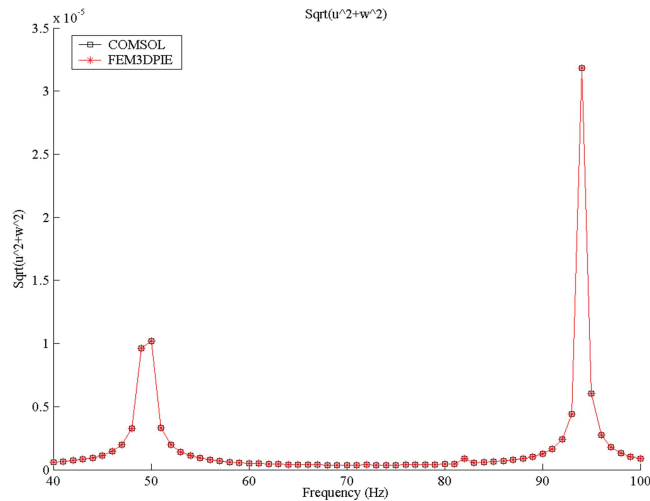


Fig III. 7 : Variation du déplacement total en fonction de la fréquence d'alimentation en tension.

Dans cette figure, nos résultats sont également comparés à ceux de Comsol-Multiphysics. Comme nous pouvons le voir, le déplacement total dû à la différence de potentiel de 200 V est le long de l'axe des (OX) et présente trois pics correspondant à trois fréquences de résonance. Le premier est apparu à 50 Hz , le second à 82 Hz et le troisième (le plus grand) à 94 Hz . En revanche, les deux résultats obtenus avec COMSOL-Multiphysics et "FEM3DPIE" sont en bon accord.

Les résultats de l'effet de tension d'amplitude appliqué sont déplacés sur la Fig III.8, où nous avons fait varier l'amplitude de la tension appliquée de 20 V à 1000 V comme dans l'étude statique. Une inspection visuelle de cette figure montre que la réponse du matériau est la même pour toutes les valeurs de tension appliquées mais avec une différence dans l'amplitude totale du déplacement. Il est clair que la tension appliquée est plus élevée que la magnitude totale du déplacement est plus grande.

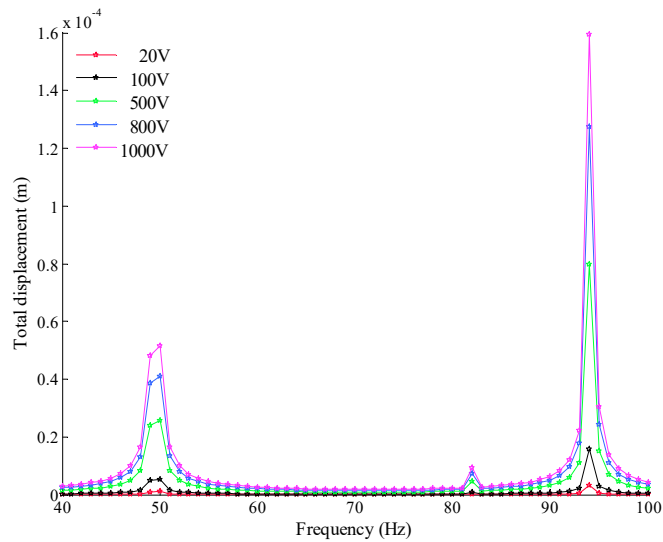


Fig III. 8 : Variation du déplacement total en fonction de la fréquence pour différentes tensions appliquées

Dans les Figs. III.9 et III.10 nous présentons le comportement de la poutre pour une tension appliquée de 200 V et une fréquence de résonance de 94 Hz . La Fig III.9 présente les résultats obtenus avec "FEM3DPIE" et la figure 10 présente les résultats obtenus avec COMSOL-Multiphysics. Les deux figures montrent que les deux résultats sont très proches. Dans le tableau 2, nous donnons plus de détails sur les paramètres de comparaison de la simulation. D'après le TABLE III.2, nous pouvons observer que les différences existantes résident dans le temps de simulation où le COMSOL-Multiphysics donne la solution avec un temps plus petit que "FEM3DPIE", et les résultats obtenus du déplacement total à 94 Hz . "FEM3DPIE" donne une valeur de $0.4320\ \mu\text{m}$ et COMSOL-multiphysics donne une valeur de $0.4315\ \mu\text{m}$, donc l'erreur relative n'atteint que 0.116% qui montre la précision parfaite de notre code de calcul [43].

	<i>FEM3DPIE</i>	<i>COMSOL</i>
<i>Nodes</i>	1290	
<i>Elements</i>	4839	
<i>Number of degrees of freedom</i>	5160	
STATIONARY STUDY		
<i>Solution time (s)</i>	1.793	1.89
<i>Max displacement (μm)</i>	2.964	
FREQUENCY STUDY		
<i>Solution time (s)(from 40 Hz to 100Hz)</i>	191.958	144.916
<i>Max displacement (μm) for $f=94\text{Hz}$</i>	0.432	0.4315

Tableau III. 2: validation des résultats par COMSOL-Multiphysics

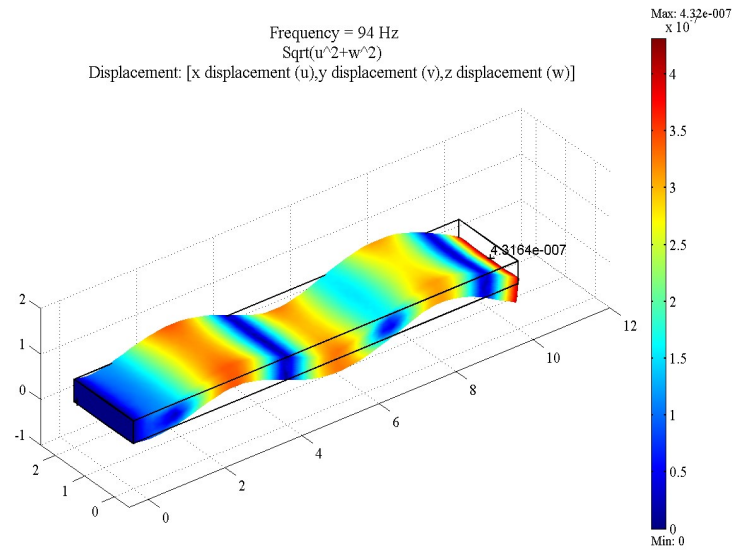


Fig III. 9 : Tracé de déflexion obtenu avec "FEM3DPIE"

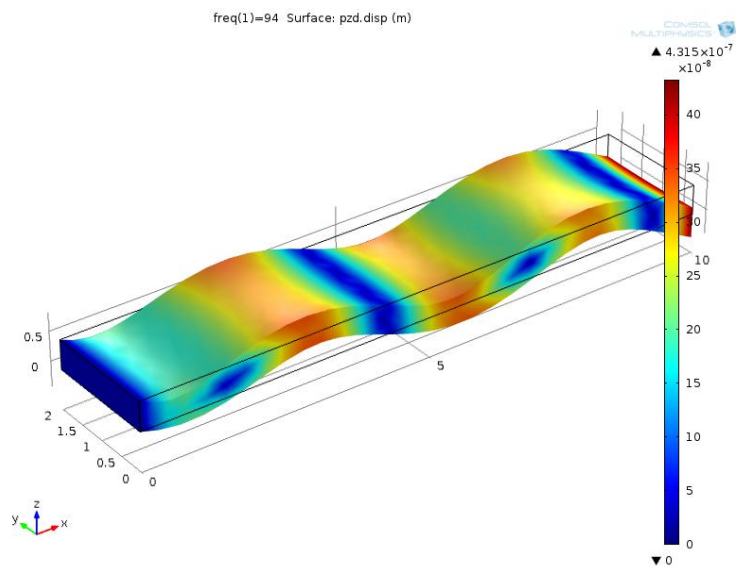


Fig III. 10 : Tracé de déflexion obtenu avec COMSOL-Multiphysics

III.2 Couplage magnéto-mécanique

Il existe deux méthodes la première est le couplage faible, cette méthode la résolution non-linéaire est traitée par l'ajout d'un processus d'itérations successives appelé Newton-Raphson. Entre chaque itération les états mécanique et magnétique du matériau sont évalués à l'aide

d'expressions analytiques représentant les caractéristiques du matériau. Ces expressions analytiques sont des interpolations, faites à partir de fonctions exponentielles, des courbes de déformation et de contrainte en fonction du champ magnétique.

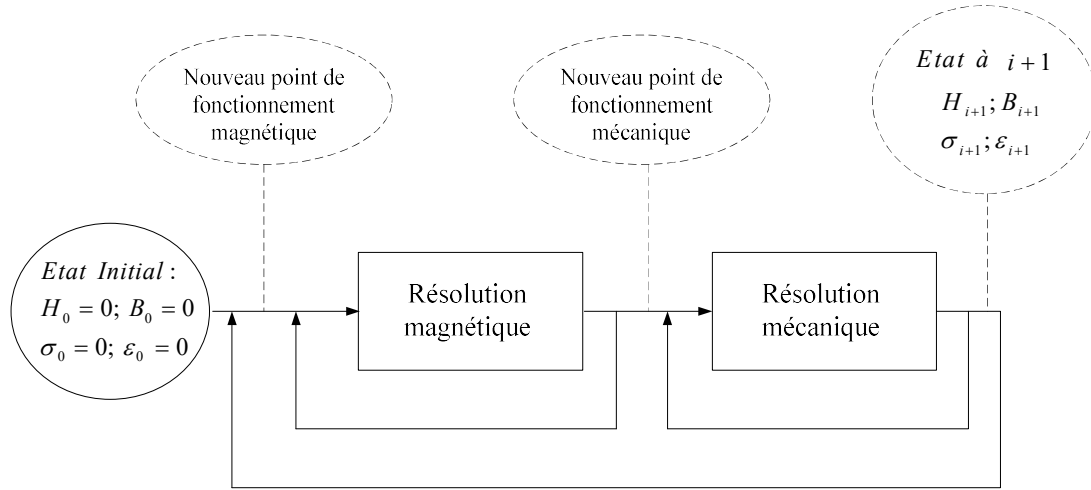


Fig III. 11 : Algorithme du processus itératif de résolution en couplage faible

Et la deuxième est la méthode de couplage fort, dans cette méthode la résolution des grandeurs magnétiques et mécaniques fait par façon simultanée

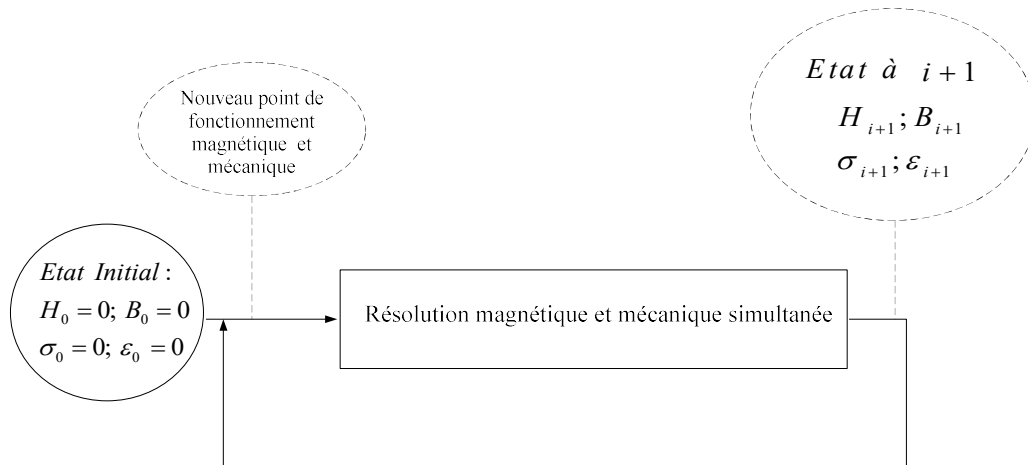


Fig III. 12 : Algorithme du processus itératif de résolution en couplage fort

Le couplage magnéto-mécanique fort nous conduit à la résolution de système d'équations qui assemble l'équation d'équilibre mécanique et la loi d'Ampère sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \sigma = f \\ \nabla x H = J_{ext} \end{cases} \quad (III.23)$$

D'où :

H : Champ magnétique.

J_{ext} : Densité de courant extérieur.

Du point de vue physique le phénomène de magnétostriction correspond à un couplage fort entre les propriétés magnétiques et mécaniques des matériaux. Un champ magnétique produit une déformation (effet direct), tandis qu'une contrainte mécanique induit un changement de l'état magnétique (effet inverse) du matériau considéré. Cela s'explique par la dépendance du tenseur de contrainte σ et du champ magnétique H vis-à-vis du champ d'induction magnétique B et du tenseur de déformation ε .

L'effet direct du phénomène de magnétostriction, dû à l'application d'un champ magnétique sur un matériau ferromagnétique, peut être explicité dans les lois constitutives mécaniques. Pour prendre en compte cet effet une approche thermodynamique permet d'obtenir les lois de comportement couplées :

$$\begin{Bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{B\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [s^H] & [q] \\ [q]' & [\mu^\sigma] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\sigma\} \\ \{H\} \end{Bmatrix} \quad (III.24)$$

Avec :

μ^σ : Perméabilité sous une contrainte mécanique dans notre dispositif cette contrainte de pré-compression est nulle donc le module de Young reste le même.

s^H : Coefficient d'élasticité sous un champ magnétique H donné.

D'où :

$$\begin{Bmatrix} \{\sigma\} \\ \{H\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ H_x \\ H_y \\ H_z \end{Bmatrix} \quad (III.25)$$

$$\begin{Bmatrix} \{\{\epsilon\}\} \\ \{\{A\}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ A_x \\ A_y \\ A_z \end{Bmatrix} \quad (III.26)$$

La matrice de couplage magnéto-mécanique suivant l'axe cristallographique [112] est donnée par [45] :

$$[d] = \begin{bmatrix} q_{33} & q_{31} & q_{31} \\ q_{31} & q_{33} & q_{31} \\ q_{31} & q_{31} & q_{33} \\ 0 & q_{15} & 0 \\ q_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{15} \end{bmatrix} \quad (III.27)$$

Et la matrice d'élasticité est donnée par :

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_1 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_2 & c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \quad (III.28)$$

La matrice de perméabilité anisotropie diagonalement est donnée comme suite :

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

Le vecteur de déformation est écrit en fonction de déplacement u selon l'axe (OX), déplacement v selon l'axe (OY) et déplacement w selon l'axe (OZ) :

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (III.30)$$

Le champ magnétique B écrit en fonction de potentiel vecteur magnétique A :

$$\begin{Bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \\ \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \\ \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \end{Bmatrix} \quad (III.31)$$

Finalement, le système d'équations algébriques après discrétisation et assemblage se met sous la forme [45][46][13]:

$$\begin{bmatrix} [K^\mu] & [K^q] \\ [K^q]' & [K^{cm}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} J_{ext} \\ f \end{Bmatrix} \quad (III.32)$$

Avec:

K^μ , K^{cm} et K^q : Les matrices de rigidité magnétique, mécanique et de couplage piézo-magnétique respectivement.

III.2.1 Calcul des éléments de la matrice de rigidité

La fonction *assembpe3d.m* réécrit le tenseur C_{ijkl} sous la forme d'une matrice de dimension $N \times N$ (N : nombre des inconnues dans notre cas u, v, w , et A_x, A_y, A_z donc $N=6$) contient trente six sous-matrices de dimension 3×3 .

Dans l'équation (III.23) le terme $\frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_{ijkl} \frac{\partial U_j}{\partial x_l} \right)$ lie le tenseur C et le gradient de la solution U on peut le voir sous la forme explicite suivante:

$$[c_{klij}] \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{v}\} \\ \{\dot{w}\} \\ \{\dot{A}_x\} \\ \{\dot{A}_y\} \\ \{\dot{A}_z\} \end{Bmatrix} \quad (III.32)$$

Nous pouvons déterminer les différents composants de C par les formules suivantes :

$$[K^\mu] = \int_v \nabla[\mathbf{w}] x [c] x \nabla[\mathbf{w}] dv \quad (III.33)$$

$$[K^q] = - \int_v \mathcal{D}[\mathbf{w}] : [q] x \nabla[\mathbf{w}] dv \quad (III.34)$$

$$[K^{cm}] = \int_v \mathcal{D}[\mathbf{w}]^t : [C] : \mathcal{D}[\mathbf{w}] dv \quad (III.35)$$

Avec : w est la fonction d'interpolation (*Shape function*) et v est le volume de tétraèdre.

Finalement nous obtenons les coefficients de la matrice de couplage magnéto-mécanique globale $[K_{ijkl}]$ peut formuler comme suit [47]:

$$[K^\mu] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu_3 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -\mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (III.36)$$

III.2.2.1 Polarisation de matériau

La polarisation de matériau apparaît clairement dans la matrice de couplage magnéto-mécanique q . Cette matrice est symétrique et ne favorise aucun axe par rapport à un autre.

Nous avons changé la polarisation de matériau par le changement des directions de la poutre.

III.2.2.2 Conditions aux limites

Pour la mécanique de structure, la poutre est fixée sur sa surface à $x = 0$ et toutes les autres surfaces sont libres. Pour les conditions magnétiques, nous avons appliqué 0 T/m aux toutes les frontières qui entourés la poutre.

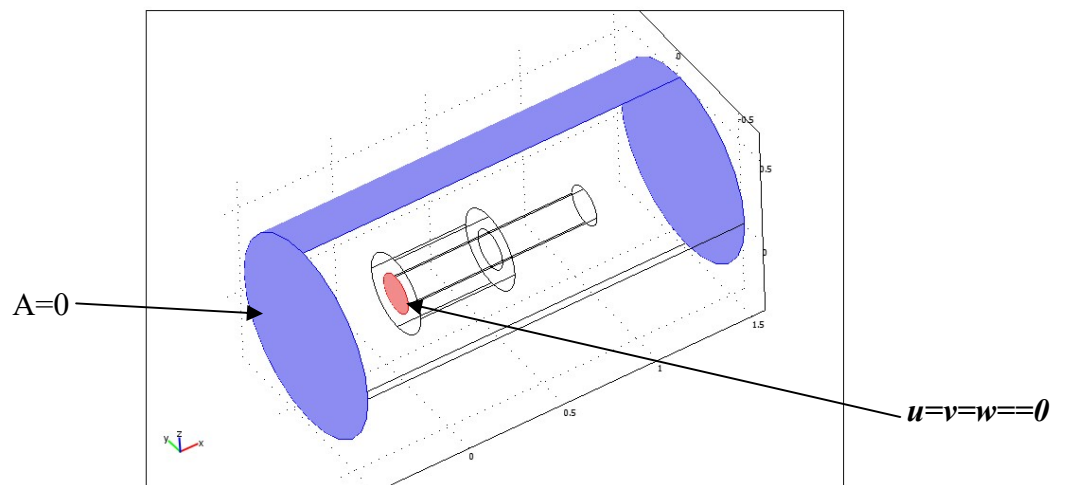


Fig III. 14 : Conditions aux limites

III.2.2.3 Propriétés de matériau

Coefficients d'élasticité ($\times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$)	
C_1	0.5
C_2	-0.15
C_3	0.013
Coefficients Piézo-magnétique ($\times 10^{-8} \text{ m/A}$)	
q_{31}	-0.175
q_{33}	0.35
q_{15}	0.525
Perméabilité magnétique relative	
$\mu = \mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{33}$ (Isotrope)	0.01888

Tableau III. 3: Coefficients de matériau (fer-co 50%) [13].

III.2.2.4 Résultats

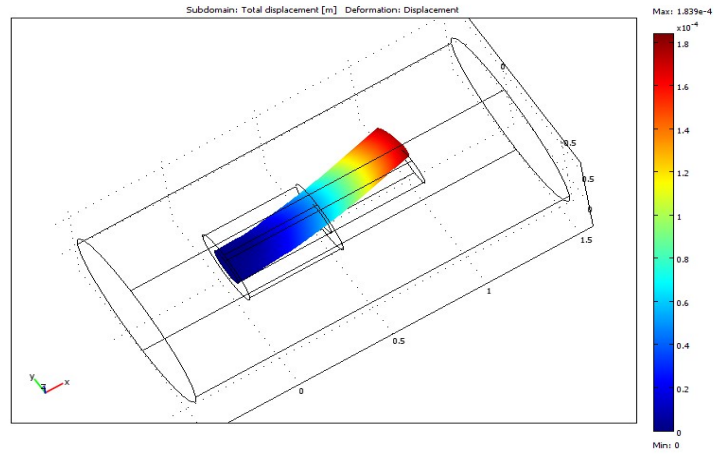


Fig III. 15 : la forme de déformation, la poutre alignée selon l'axe (OX)

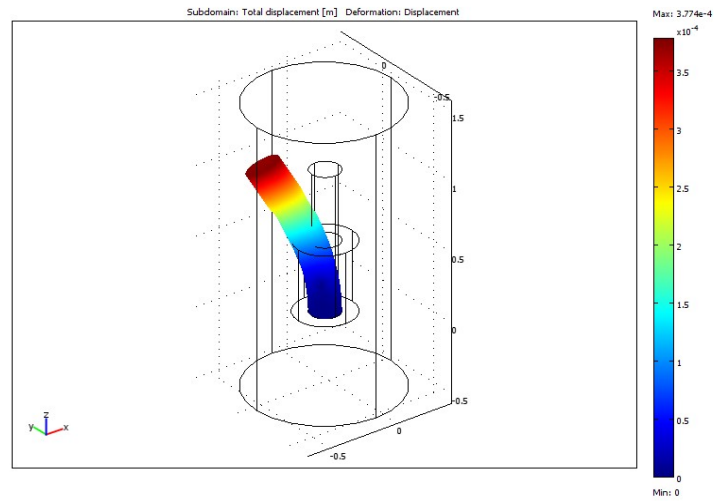


Fig III. 16 : la forme de déformation, la poutre alignée selon l'axe (OZ)

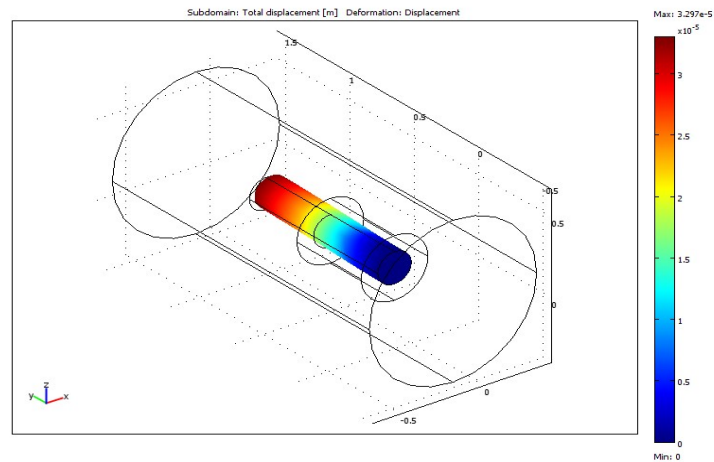


Fig III. 17 : la forme de déformation, la poutre alignée selon l'axe (OY)

Les résultats dans les Figs III.15, 16 et 17 donnent les déplacements dans les différentes polarisations de matériau magnétostrictif et nous confirment l'inutilité de polarisation de ce matériau.

Conclusion

Dans ce travail, Les formulations des problèmes électro-mécaniques et magnéto-mécanique sont établies. La modélisation numérique de ces problèmes repose sur une discrétisation par la méthode des éléments finis. Le code de calcul "FEM3DPIE" est développé sous environnement Matlab pour étudier le comportement statique et harmonique de l'actionneur de flexion de poutre piézoélectrique. Dans la structure méthodologique, nous commençons par donner toute la formulation mathématique de l'effet de couplage piézoélectrique du problème étudié et finissant par la solution numérique de la méthode des éléments finis (FEM). Dans l'étude statique, les résultats obtenus de la déformation totale ont été comparés aux résultats analytiques. Les deux résultats sont en bon accord. Dans l'étude harmonique, le déplacement total est comparé aux résultats obtenus avec le logiciel commercial COMSOL-Multiphysics. Dans ce cas, les résultats obtenus par les deux codes de calcul sont également très proches, ce qui prouve l'efficacité de notre code de calcul développé.

Les évaluations numériques effectuées mettent en évidence que le déplacement total de l'extrémité libre de l'actionneur du faisceau varie linéairement avec la tension d'entrée appliquée. De plus, dans la variation du déplacement total de l'actionneur du faisceau en fonction de la fréquence de tension appliquée présente une fréquence de résonance de 94 Hz dans laquelle le déplacement total présente une valeur maximale de $0,4320 \mu\text{m}$ à cette fréquence. On pense également dans ce cas que la tension appliquée est plus élevée; le déplacement total de l'actionneur du faisceau est plus important.

CHAPITRE IV

Application : Détection des défauts de la machine asynchrone en utilisant les matériaux actifs, adaptatifs et intelligents

Introduction

La machine asynchrone triphasée est très utilisée dans les applications industrielles, car sa conception relativement simple, sa cout est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants, la détection des défauts dans ces types des machines sera inévitable. Pendant le fonctionnement de ces machines il y a souvent des coupures des phases d'alimentations, coupures de bobinage dans le stator ou des barres dans le rotor. Ces dernières sont considéré comme des principaux défauts électrique et mécanique dans les machines électriques et peuvent également à conduire à des défauts d'excentricité [48]. Les travaux de [49] ont utilisé un modèle de circuit électrique, en annulant les courants de circulation dans la barre du rotor et qui ont considérablement augmenté les courants des barres adjacentes. Ces barres peuvent être dégradées, mais pas complètement cassées en modélisant cet état avec une faible conductivité électrique de la barre correspondante [50] ou par une résistance élevée dans laquelle augmente la résistance de la barre de rotor [49]. Deuxièmement, elles sont définitivement brisées par une conductivité électrique nulle [50]. Dans ce travail nous avons pensé d'utiliser les matériaux actifs, nous avons commencé par l'exploitation des propriétés des matériaux piézo-magnétiques lesquelles composent le stator et rotor et dans cette cible nous sommes revenus aux travaux de [51], [52], [53] où leurs études se sont principalement consacrées à l'étude du comportement de tôles ferromagnétiques faiblement magnétostrictives (FeSi, FeCo, . . .), et portent essentiellement sur une caractérisation sous sollicitations uniaxiales et les travaux de [54], [55], [56] concernent principalement la prise en compte d'un état de contraintes multiaxiales sur le comportement magnétique. La présence d'un champ magnétique engendre une déformation dans ces matériaux, qui est transmise au matériau piézoélectrique, est à l'origine d'une polarisation électrique. C'est l'effet piézoélectrique direct, qui correspond à la polarisation électrique du matériau sous l'action d'une contrainte mécanique [57], [58]. La formulation du problème électromécanique et magnéto-mécanique tiennent compte des phénomènes de couplage au travers des lois de comportement piézo-électrique et piézo-magnétique. La formulation associée à ce problème peut être obtenue à partir de la minimisation d'une énergie fonctionnelle. Sa forme discrétisée, dans le cadre de la méthode des éléments finis.

IV.1 Description de la MAS étudiée

Notre machine asynchrone a quatre pôles et constitue d'un stator qui comprend trente six encoches dans les quelles sont placés les enroulements reliés à la source de tension triphasé, un rotor à cage d'écureuil comprend vingt-huit barres conductrices en aluminium. L'entrefer fut quart de millimètre Fig IV.1.

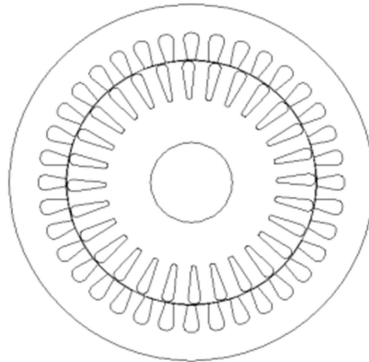


Fig IV. 1 Géométrie de la machine

IV.2 Les Lois de comportements

Le stator est constitué généralement de tôles d'acier de type Fe-3%Si à grains non orientés qui joue le rôle de canalisation du flux magnétique, et il porte aussi des enroulements d'alimentation. Les matériaux ferromagnétiques présentent un couplage magnéto mécanique fort entre l'induction magnétique et la déformation nous avons le glosé par les tenseurs de comportement suivantes :

$$\{\epsilon\} = [s^H]\{\sigma\} + [d]\{H\} \quad (IV.1)$$

$$\{B\} = [d]^T\{\sigma\} + [\mu^\sigma]\{H\} \quad (IV.2)$$

Avec:

ϵ : déformation, σ : contrainte, H : champ magnétique et B : l'induction magnétique.

μ^σ : Tenseur de perméabilité magnétique de matériau sous une contrainte mécanique constante.

s^H : Tenseur d'élasticité mécanique sous un champ magnétique constant.

d : Tenseur de couplage magnéto mécanique sous une contrainte et un champ magnétique donnés.

Pour les céramiques tel que PZT-5H présentant un couplage électro mécanique fort ceci est matérialisé par les tenseurs de comportement :

$$\{\epsilon\} = [s^E]\{\sigma\} + [e]\{E\} \quad (IV.3)$$

$$\{D\} = [e]^T\{\sigma\} + [\epsilon^\sigma]\{E\} \quad (IV.4)$$

Tel que :

ϵ : déformation, σ : contrainte, E : champ électrique et D : l'induction électrique.

s^E : Tenseur d'élasticité mécanique sous un champ électrique constant.

ϵ^σ : Tenseur de permittivité électrique de matériau sous une contrainte mécanique constante.

e : Tenseur de couplage électro mécanique sous une contrainte et un champ électrique donné.

L'entrefer et les enroulements statoriques : dans l'air l'induction magnétique est proportionnelle au champ magnétique :

$$\{B\} = [\mu_0]\{H\} \quad (IV.5)$$

Les barres rotoriques présentent la naissance des courants induit donc :

$$\{J_{ind}\} = [\sigma]\{E\} \quad (IV.6)$$

IV.3 Formulation par éléments finis

IV.3.1 Magnétostriction dans le stator et le rotor

Dans le domaine de matériau magnétostrictif le problème magnéto mécanique peut formaliser par les équations suivantes :

$$j\sigma\omega\mathbf{A} + \nabla \times \frac{1}{\mu'^\sigma} (\nabla \times \mathbf{A} - d' s^{H^{-1}} \boldsymbol{\epsilon}) = \mathbf{0} \quad (IV.7)$$

$$\rho\omega^{IV}\mathbf{U} + \nabla \cdot \frac{1}{s'^H} \left(\boldsymbol{\epsilon} - \frac{d}{\mu^\sigma} \mathbf{B} \right) = \mathbf{0} \quad (IV.8)$$

On peut négliger le terme $j\sigma\omega\mathbf{A}$ car la valeur de la conductivité dans les matériaux ferromagnétiques très négligeable. Après la discrétisation et l'assemblage on peut écrire le système d'équation algébrique comme suite :

$$\begin{bmatrix} [K^\mu] & [K^d] \\ [K^d]^T & [K^S] - \rho\omega^2[M^\rho] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{J_{ext}\} \\ \{f\} \end{Bmatrix} \quad (IV.9)$$

Où : $[K^\mu]$ est la matrice de rigidité magnétique est définie par la relation suivante:

$$[K^\mu] = - \int_v [B_w]^T [\mu'^\sigma] [B_w] dv \quad (IV.10)$$

$[K^S]$: matrice de rigidité mécanique est définie par la relation suivante:

$$[K^S] = \int_v [B_u]^T [s'^H] [B_u] dv \quad (IV.11)$$

$[K^d]$: matrice de rigidité couplage magnéto-mécanique est donnée par

$$[K^d] = \int_v [B_u]^T [d] [B_w] dv \quad (IV.12)$$

$[M^\rho]$: matrice d'inertie est donnée par

$$[M^\rho] = \int_v [N_u]^T [N_u] dv \quad (IV.13)$$

Les tenseurs S^E et ε^σ sont dans le plan des états de déformation et pour les transformer dans le plan des états de contraintes, on a utilisé les équations suivantes :

$$[s'^E] = [s^E] - [e]^T [S^E] [e] \quad (IV.14)$$

$$[\varepsilon'^\sigma] = [\varepsilon^\sigma] - [e]^T [S^E] [e] \quad (IV.15)$$

IV.3.2 Capteur piézoélectrique

Nous avons choisi le céramique PZT-5H où les équations différentielles partielles qui nous ont permis de transmettre la déformation du stator au potentiel électrique, c'est l'effet de couplage électromécanique fort:

$$e \nabla \cdot DU - \varepsilon^\sigma \nabla^2 V = Q \quad (IV.16)$$

$$\rho \omega^2 U + \nabla \cdot S^E DU + e^T \nabla^2 V = f \quad (IV.17)$$

Après la discrétisation et l'assemblage on peut écrire le système d'équations algébriques comme suite :

$$\begin{bmatrix} [K^\varepsilon] & [K^e] \\ [K^e]^T & [K^S] + \rho \omega^2 [M^\rho] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ f \end{Bmatrix} \quad (IV.18)$$

Où : $[K^\varepsilon]$: la matrice de rigidité électrique est définie par la relation suivante:

$$[K^\varepsilon] = - \int_v [B_w]^T [\varepsilon'^\sigma] [B_w] dv \quad (IV.19)$$

$[K^S]$: la matrice de rigidité mécanique est définie par la relation suivante:

$$[K^S] = \int_v [B_u]^T [s'^E] [B_u] dv \quad (IV.20)$$

$[K^e]$: la matrice de couplage électromécanique est donnée par

$$[K^e] = \int_v [B_u]^T [e] [B_w] dv \quad (IV.21)$$

Les tenseurs S^E et ε^σ sont dans le plan des états de déformation et pour les transformer dans le plan des états de contraintes, on a utilisé les équations suivantes :

$$[s'^E] = [s^E] - [e]^T [S^E] [e] \quad (IV.22)$$

$$[\varepsilon'^\sigma] = [\varepsilon^\sigma] - [e]^T [S^E] [e] \quad (IV.23)$$

IV.3.3 Bobinages statoriques

Dans les bobines d'alimentation il y a un courant qui est imposé par le circuit électrique extérieur :

$$\text{Phase a: } \nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_a \quad (IV.24)$$

$$\text{Phase b: } \nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_b \quad (IV.25)$$

$$\text{Phase c: } \nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A}) = -\mathbf{J}_c \quad (IV.26)$$

IV.3.4 Barres rotoriques

Dans les barres il y a un courant induit par le mouvement relatif de champ tournant par rapport à eux. Nous avons le glosé par l'équation différentiel partielle suivante :

$$j\omega_r \sigma \mathbf{A} + \nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{0} \quad (IV.27)$$

Avec :

ω_r : Pulsation des courants dans les barres du rotor.

IV.3.5 Entrefer

Dans l'entrefer l'induction magnétique est proportionnelle au champ magnétique $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ donc :

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{0} \quad (IV.28)$$

IV.4 Résultats

IV.4.1 Défauts statoriques

L'incorporation du capteur piézoélectrique peut perturber le fonctionnement de la machine comme le montre la Fig IV.2, pour cela on doit choisir sa position de tel façon ne perturbe pas les lignes de champ d'une part et sa position le permet d'absorber le maximum de déplacement total Fig IV.4 pour nous donne un potentiel électrique important d'autre part. La Fig IV.3 représente la distribution de la densité de flux magnétique dans le stator et nous montre que le flux est minimal dans les encoches pour ces raisons nous installons le capteur dans l'encoche comme montre la Fig IV.5.

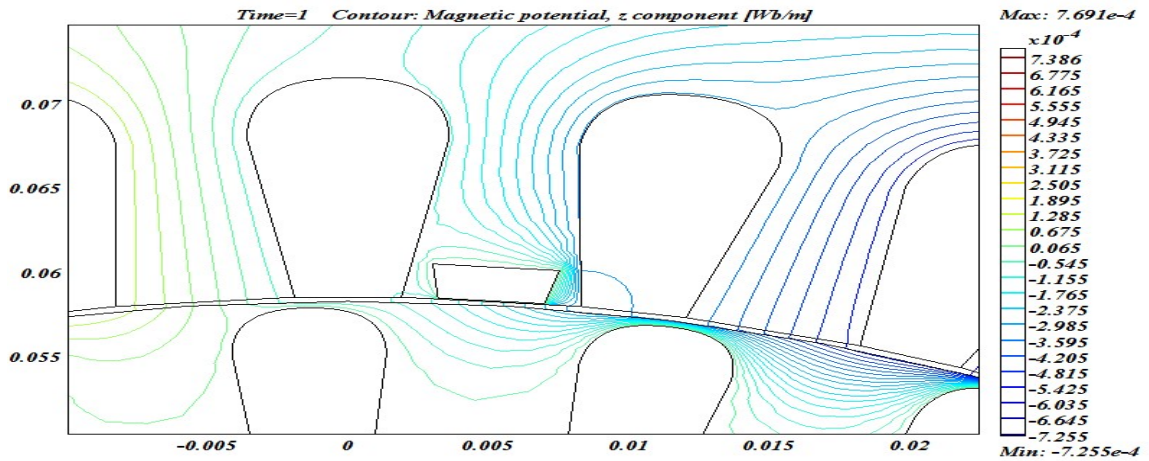


Fig IV. 2 L'effet d'incorporation de l'actionneur piézoélectrique dans la machine

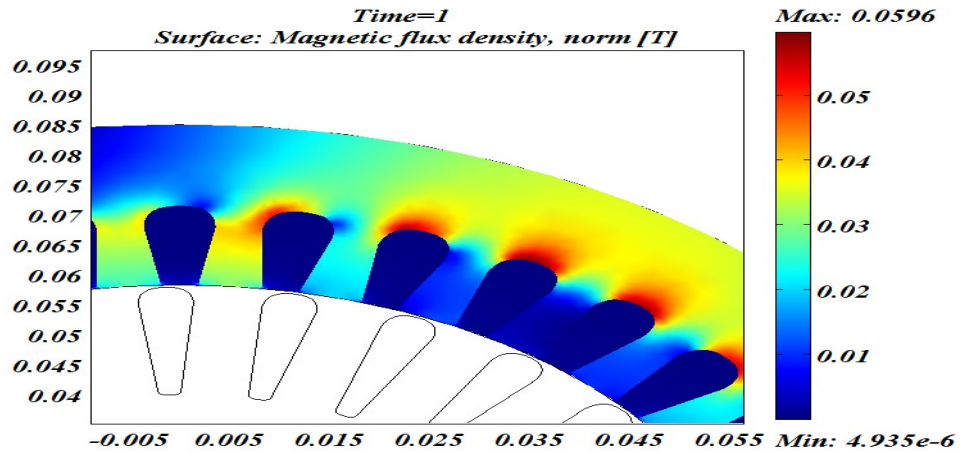


Fig IV. 3 :Distribution de la densité de flux magnétique dans le stator

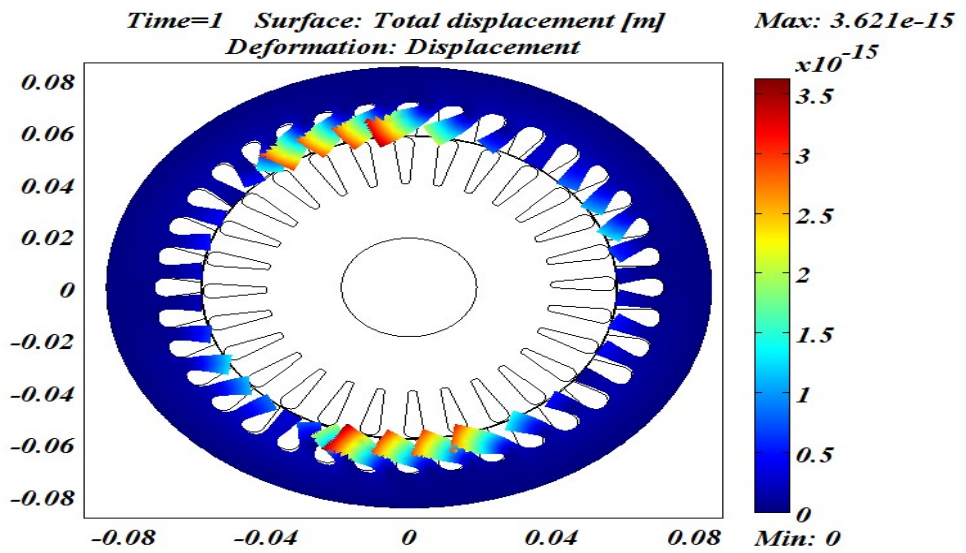


Fig IV. 4 : Déplacement total dans le stator

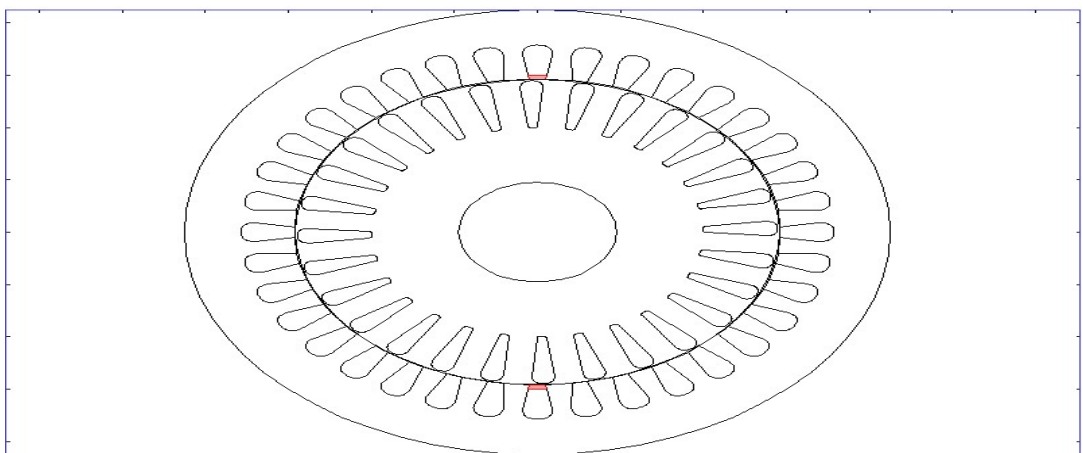


Fig IV. 5 : Position des capteurs dans le stator.

La polarisation de matériau piézoélectrique joue un rôle très important et influe directement sur la tension induite aux bornes de capteur. Pour bien choisir cette polarisation il faut déterminer les déplacements sur les axes (ox) et (oy). Puis nous le polarisons selon le déplacement supérieur. Donc, suivant les Figs IV.6 et IV.7 la matrice de couplage électromécanique sera :

$$e = \begin{bmatrix} d_{12} & d_{12} & 0 \\ 0 & 0 & d_{22} \end{bmatrix}$$

Et le tenseur de couplage :

$$e = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ d_{12} & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & d_{22} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

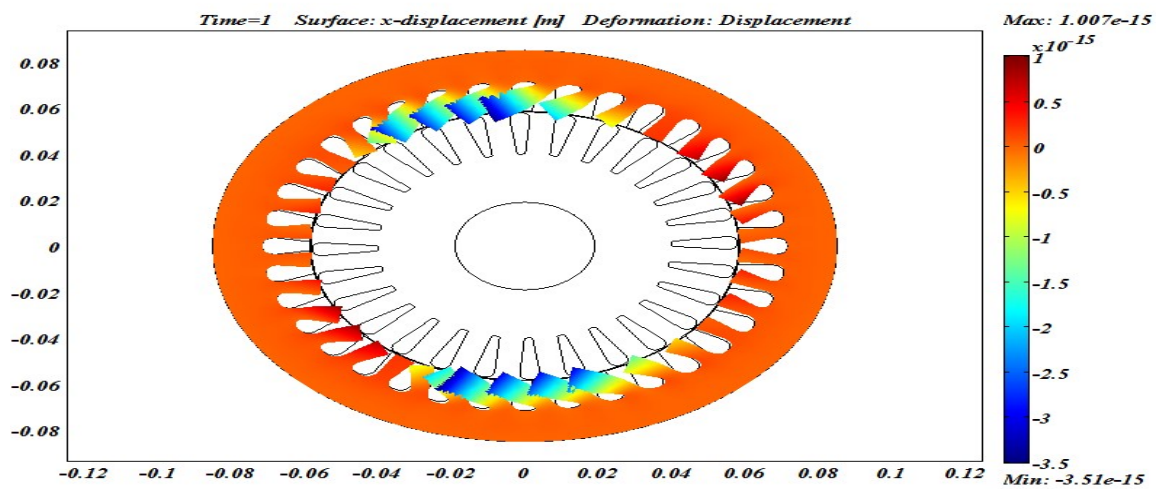


Fig IV. 6 :Déplacement u selon l'axe (ox) dans le stator

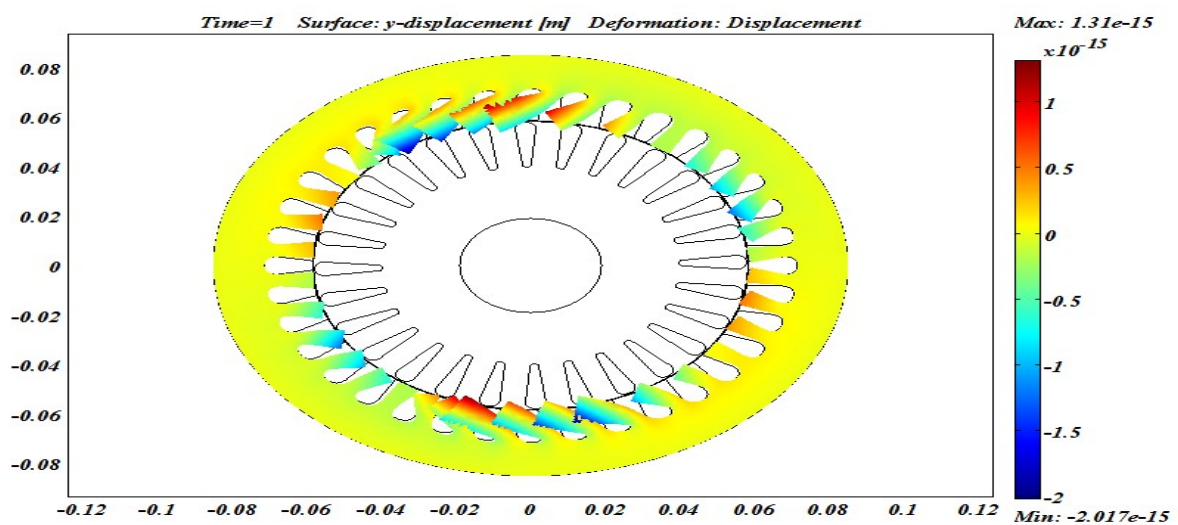


Fig IV. 7 : Déplacement v selon l'axe (oy) dans le stator

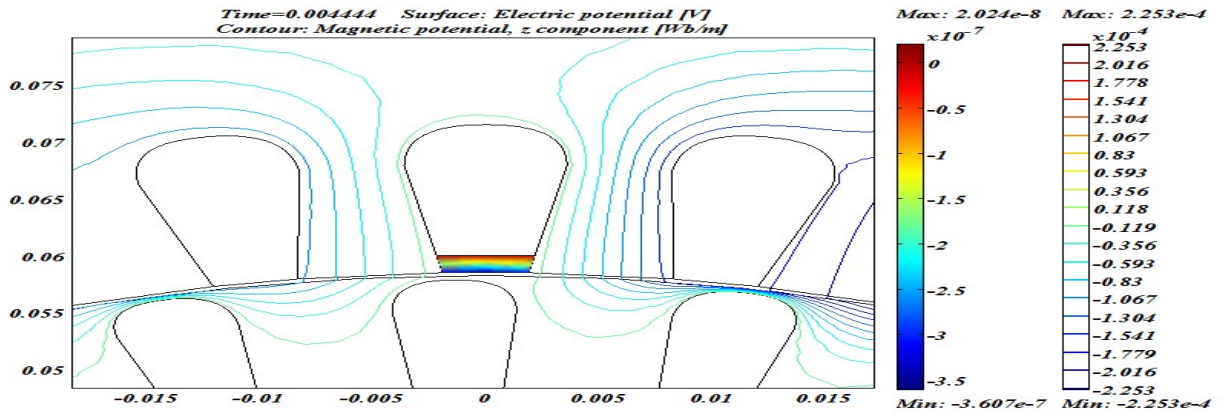


Fig IV. 8 :Distribution de potentiel électrique dans le capteur

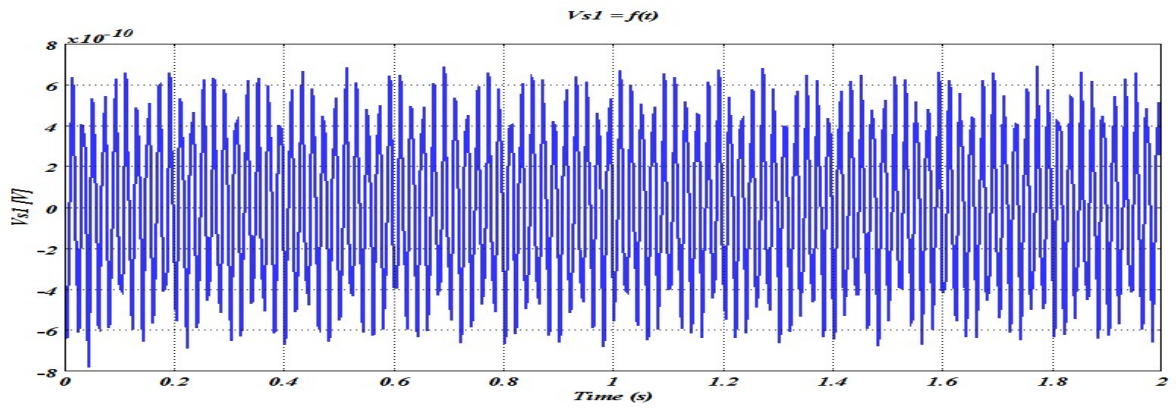
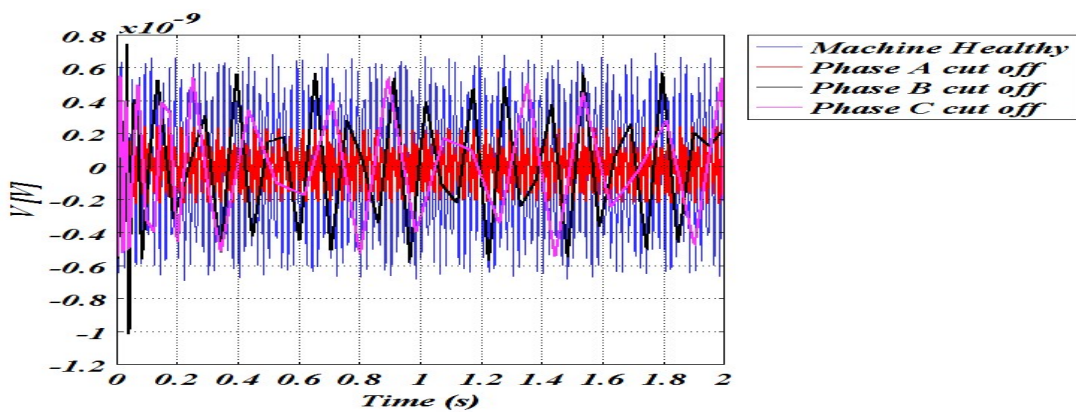
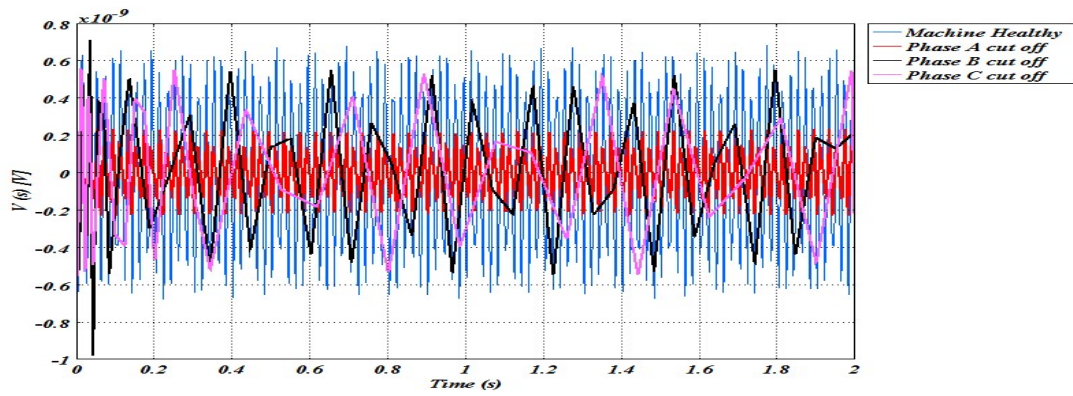


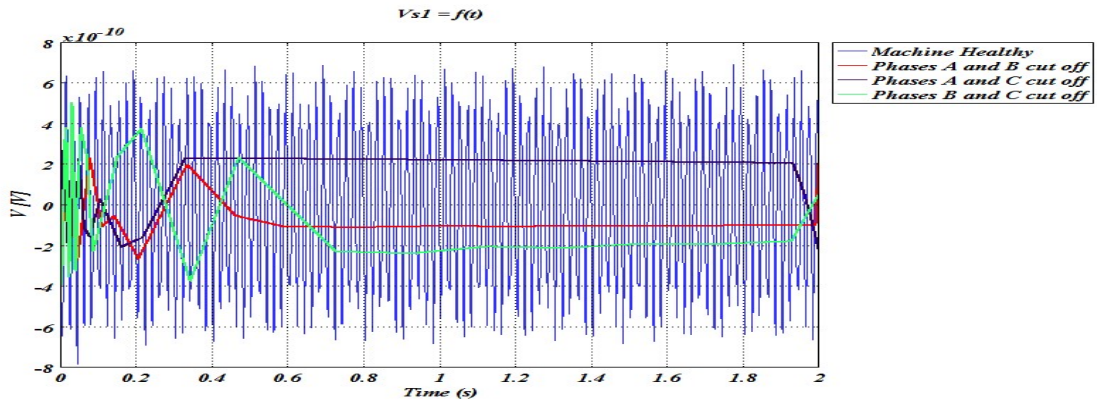
Fig IV. 9 : Potentiel électrique aux bornes de capteur en fonction de temps où la machine est saine.



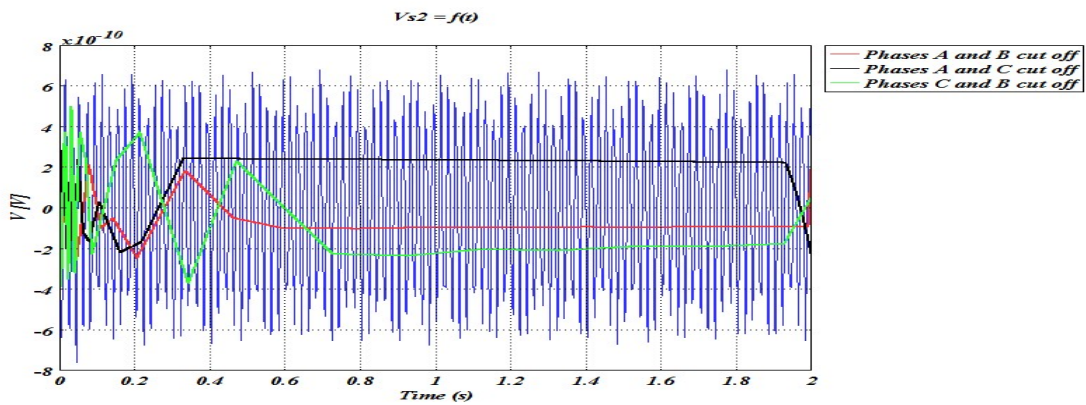
(a) Tension obtenue dans le premier capteur où il y a une coupure de phase



(b) Tension obtenue dans le deuxième capteur où il y a une coupure de phase



(c) Tension obtenue dans le premier capteur où il y a deux coupures de phase



(d) Tension obtenue dans le deuxième capteur où il y a deux coupures de phase

Fig IV. 10 : Tensions obtenues dans les différents défauts statoriques.

IV.4.1 Défauts rotatoriques

Pour nous installons notre capteur de telle façon nous obtenit le maximum de potentiel électrique, nous avons suivi les étapes comme dans les défauts statoriques.

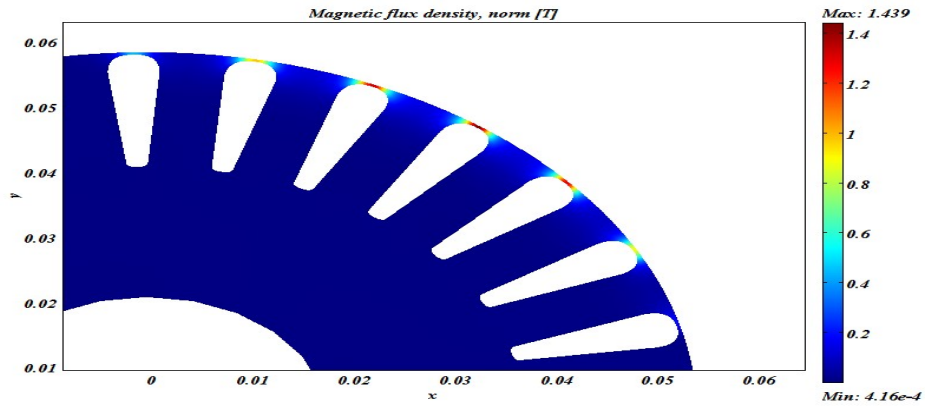


Fig IV. 11 : Densité de flux magnétique dans le rotor.

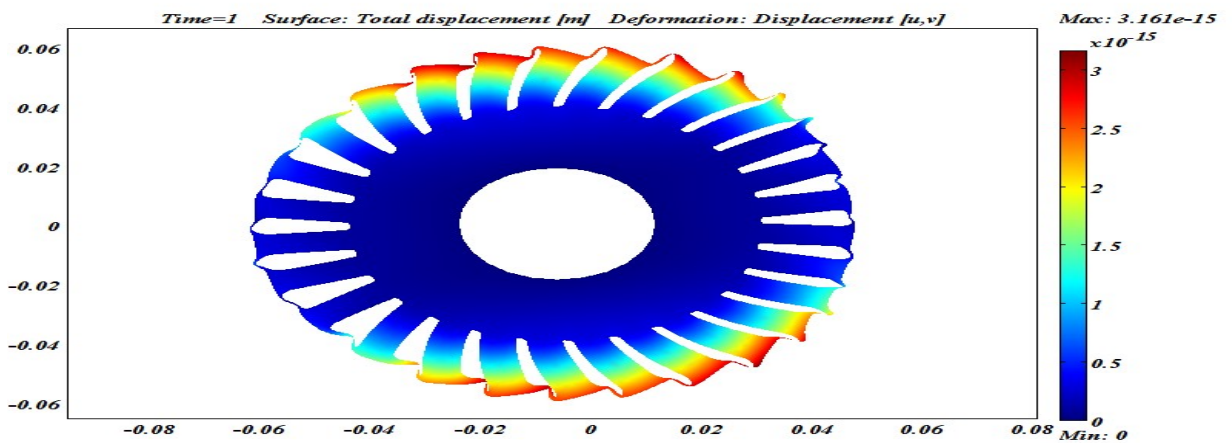


Fig IV. 12 : Déplacement total dans le rotor

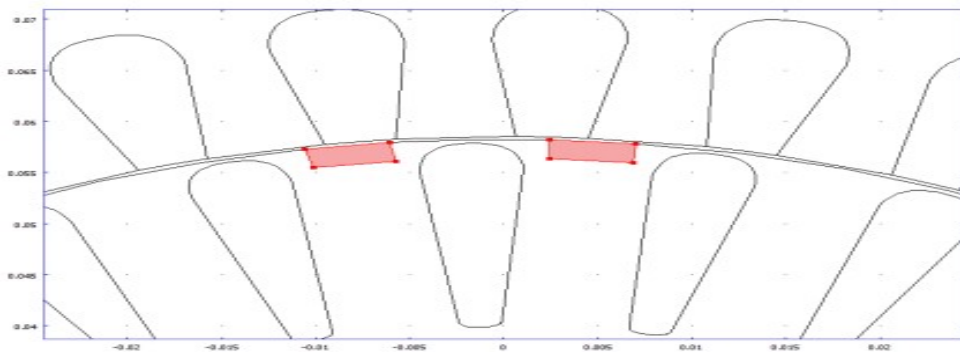


Fig IV. 13 : Position des capteurs dans le rotor

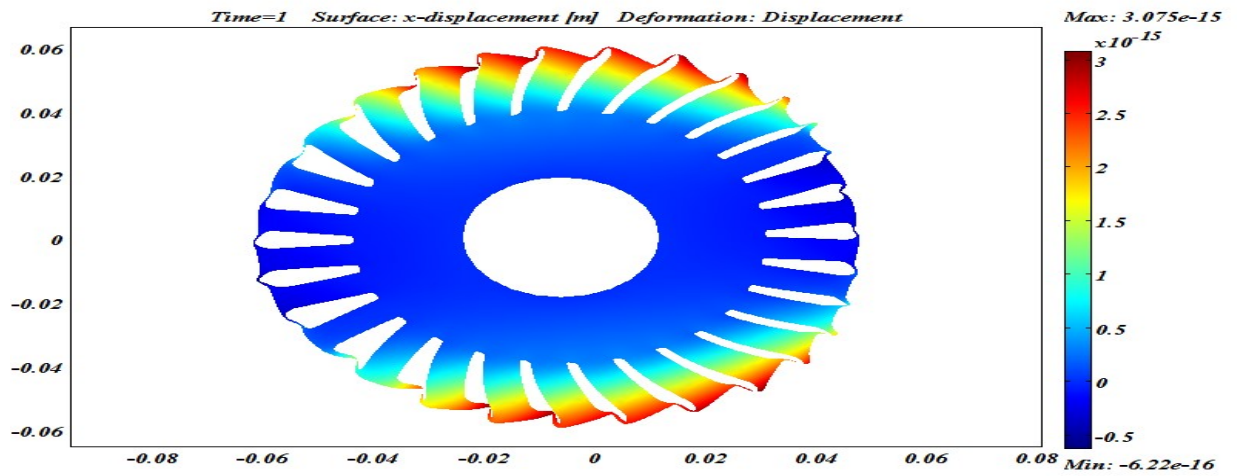


Fig IV. 14 : Déplacement u selon l'axe (ox) dans le rotor

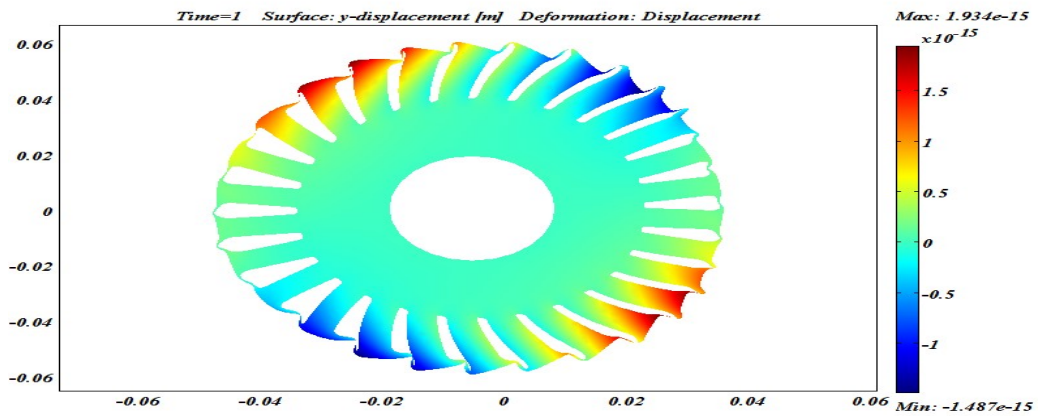


Fig IV. 15 : Déplacement v selon l'axe (oy) dans le rotor

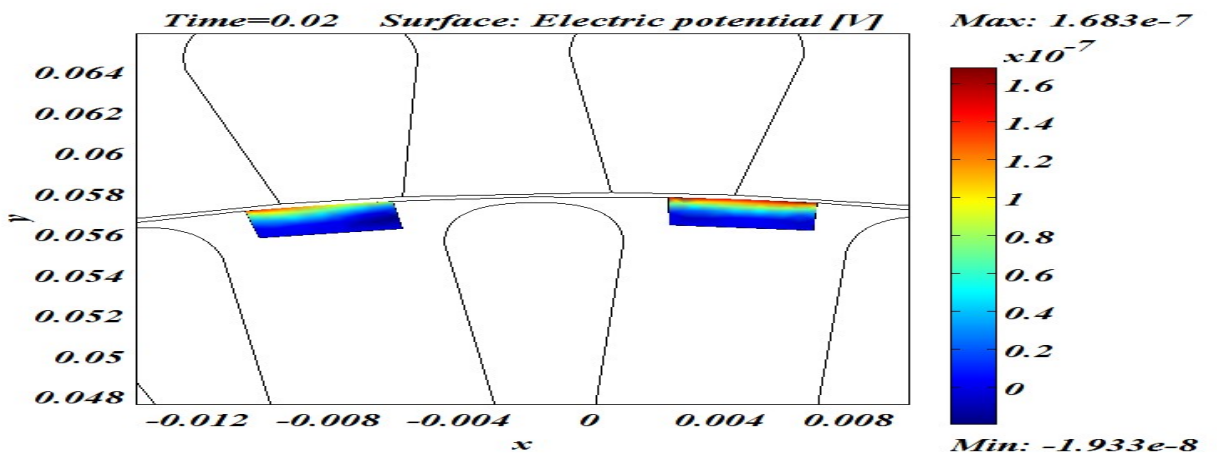


Fig IV. 16 : Distribution de potentiel électrique dans le capteur

La Fig IV. 17 indique la diminution de tension induit aux bornes du capteur quand il y a une rupture des barres rotoriques. Cette diminution peut justifier par l'augmentation de pénétration de champ magnétique dans le rotor comme montrent les Figs IV.18 (a) et (b).

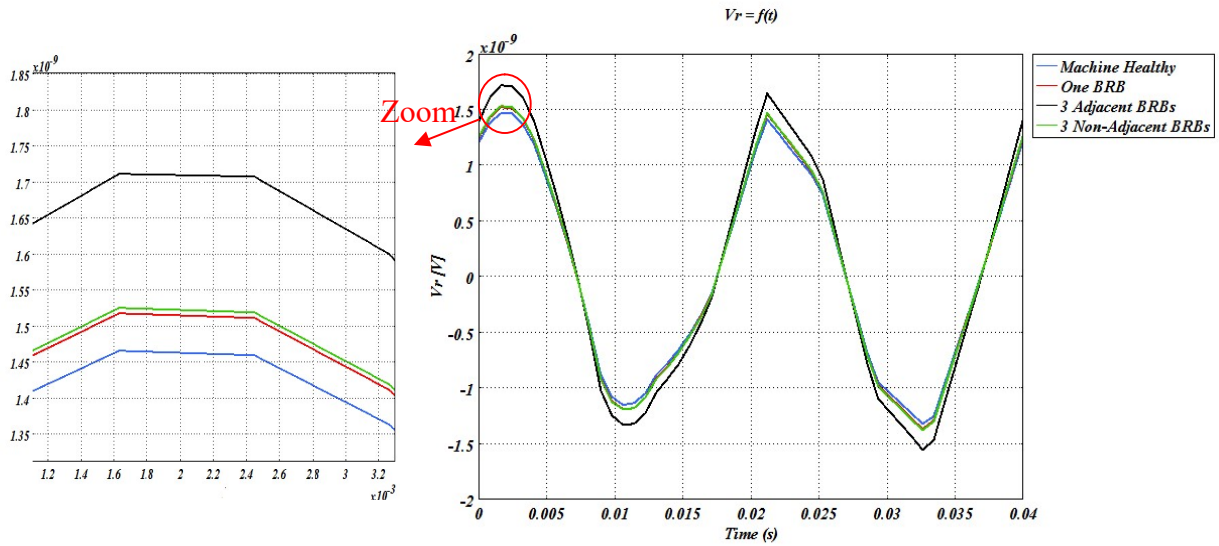
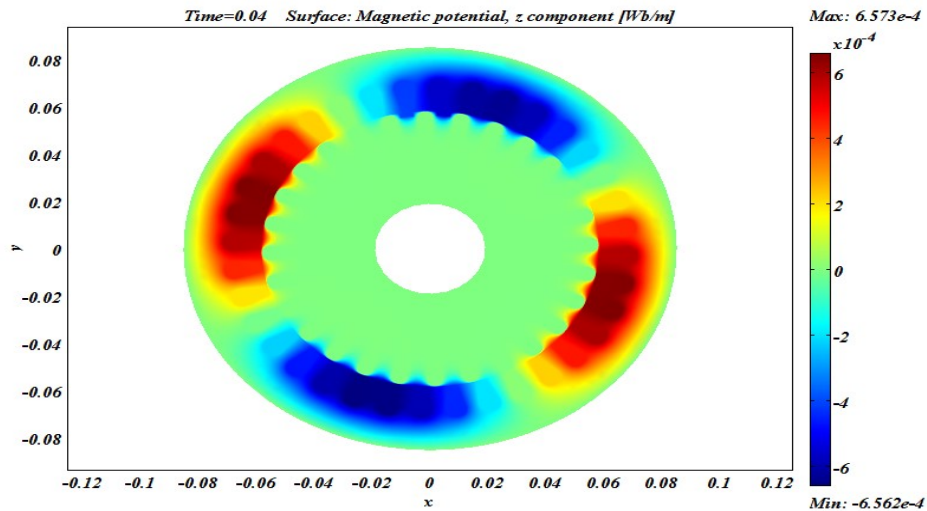
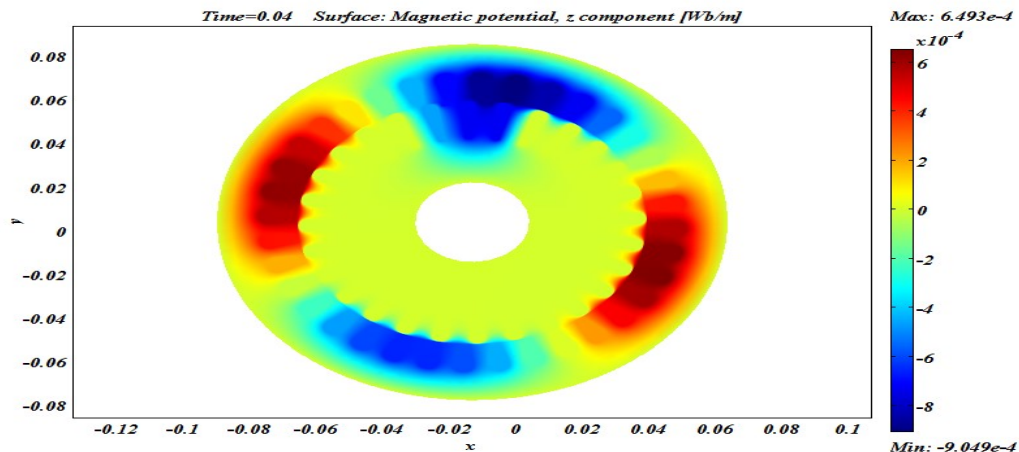


Fig IV. 17 Tensions obtenues dans les différents défauts rotoriques en fonction de temps.



(a)



(b)

Fig IV. 18 : Lignes du flux pour une machine (a) saine (b) présence d'une barre cassée.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle technique pour le diagnostic des machines électriques triphasées. Le principe basé sur l'exploitation du phénomène de la magnétostriction des alliages qui constituent le stator et le rotor pour nous obtenons une déformation. la modélisation et la simulation des phénomènes de couplage magnéto-mécanique fort nous permettent de localiser le maximum de déformation, puis nous avons installé un capteur piézoélectrique une fois dans le stator pour capter les coupures des phases dans le stator, et autre fois dans le rotor pour capter les cassures des barres dans le rotor et cet fois la modélisation et la simulation des phénomènes de couplage électromécanique fort nous permettent d'observer le potentiel électrique induit sur les électrodes de capteur piézoélectrique. Toute fois, on l'a comparé avec la valeur de référence où la machine saine pour localiser le défaut.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les matériaux actifs constituent un domaine de recherche dynamique, grâce aux possibilités offertes par leur utilisation, et ouvert, à cause de la complexité de leur caractérisation et de leur modélisation. Dans le domaine du génie électrique, ces matériaux rendent possible la conception de nouveaux dispositifs exploitant leurs propriétés électromagnétiques et élastiques fortement couplées.

Le travail présenté dans cette thèse est l'étude et la modélisation des lois de comportements de ces matériaux actifs qui représentent la matière première d'une nouvelle génération d'actionneurs magnétostrictifs et piézoélectrique. Ces actionneurs sont très prometteurs et devraient à terme trouver leur place dans l'aéronautique et l'industrie automobile, comme nous avons proposé de les utiliser dans la détection des défauts dans le domaine de diagnostic des machines électriques.

Nous avons présenté, dans une première partie, les phénomènes qui entrent en jeu dans les matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs, et qui sont le fondement de la compréhension de la magnétostriction et la piézoélectricité. Par la suite, nous avons exposé les effets les plus remarquables qui mettent l'accent sur les caractéristiques actives et donc attractives de ces matériaux. Nous avons poursuivi en faisant la comparaison de quelques composés, au milieu desquels se dégagent les matériaux à magnétostriction géante. Ces matériaux, qui sont aujourd'hui les plus étudiés, présentent les caractéristiques les plus intéressantes en matière d'allongements et de forces développées.

La deuxième partie, quant à elle, expose les différents enjeux économiques débouchant sur l'étude des systèmes et des matériaux actifs. Une comparaison que nous avons également énoncé quelques éléments actifs, en faisant le point sur les différents avantages et inconvénients de chacun. Une étude bibliographique sur les différents types d'actionneurs que sont produits par la NASA ou la NAVY, et leurs réelles caractéristiques demeurent secrètes. Pourtant, il ressort de leur fonctionnement une extrême complexité de mise en œuvre.

La troisième partie de ce travail présente la modélisation et l'implémentation des lois de comportement électromécanique dans les matériaux piézoélectrique et magnéto-mécanique dans les matériaux magnétostrictifs, dans le cadre de la méthode des éléments finis qui montre sa

puissance de résolution notamment dans les géométries plus complexes par rapport à les autre méthode numérique (Différences finis, volumes finis...).

Le modèle de déformation de magnétostriction utilisé est comme la plupart des modèles, indépendant de la contrainte. Mais la majorité des matériaux ferromagnétiques dont la déformation de magnétostriction dépend fortement de l'état de contraintes. Il semble donc indispensable de prendre en considération cet effet de la contrainte sur la déformation de magnétostriction. Il sera alors peut-être plus judicieux de considérer le comportement magnéto-mécanique avec le champ magnétique comme variable d'état. Cette évolution impose la définition d'une nouvelle loi de comportement magnétique, ainsi qu'un changement de la formulation éléments finis du problème magnétique.

Pour les aspects expérimentaux, un objectif à court terme est la mesure des coefficients de comportement qui représentent double non-linéarité c.à.d. $\sigma=f(H)$ d'une part et $\Delta l/l=f(H)$ d'autre part dans les matériaux magnétostrictifs et la non-linéarité $D=f(E)$ dans les matériaux piézoélectriques.

Enfin, si on souhaite mettre en place un outil multi-physique complet pour la modélisation des dispositifs électromagnétiques, l'intégration des aspects thermiques, tant d'un point de vue expérimental que numérique, est indispensable. Le développement d'une caractérisation magnéto-thermo-mécanique paraît envisageable sur la base de la plateforme de caractérisation au prix de quelques adaptations.

On l'a donc vu le domaine des matériaux actifs fait intervenir de nombreux phénomènes de couplage multi-physique, et l'absence de modèles entièrement satisfaisant à ce jour nécessite de nombreux développements

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] M. Ohring, "The material science of thin films", Academic Press Inc., 1992.
- [2] P. Lorrain, D.R. Corson, "Champ et ondes électromagnétiques", AnnandCollin, coll. U, 1992.
- [3] H.T. Savage, A.E. Clark, J.M. Powers, "Magnetomechanical coupling and the effect in highly magnetostrictive rare earth-iron alloys", IEEE Trans. Magn., Vol. 12, N05, pp 1355-1357, Sept. 1975.
- [4] E. du Trémolet de Lacheisserie, "Magnétostriction: Theory and applications of Magnetoelasticity", Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [5] A.E. Clark, Appl. Phys. Letter 11, pp642, 1973.
- [6] A.E. Clark, M. Wun-Fogle, J.P. Teter, J.B. Restorff, S.F. Cheng, "Magnetization, Young's moduli and magnetostriction of rare-earth-iron alloys with $R=Tb_{0.6}Dy_{0.4}$ ", J. Appl. Phys. 76, pp 7009-7011, 1994.
- [7] O.D. Mc aster, "Magnetostrictivematerials", Proc. Int. Work on Power Transducers for Sonics and Ultrasonics. Ed. B.F. Harmonic and all: Toulon, France, pp 21-25, 1992.
- [8] C. Tyren, "Giant magnetostrictive alloys", Proc.First Int. Conf.On Giant Magnetostrictive Alloys and their Impact on Actuator and Sensor technology", Ed. C. Tyren. Lund: Fotynova, pp 215-227, 1987.
- [9] A.E. Clark, "Magnetoelastic coupling and the origin of giant magnetostriction", Proc. GMM&A Tokyo Symposium, Japan, pp 9-14, Nov 1992.
- [10] A.E. Clark, M.L. Spano, H.T. Savage, "Effet of stress on the magnetostriction and magnetization of rare earth-Fel.95 alloys", IEEE Trans. Magn., Vol. 19, N05, 1964-1966, Sept 1983.
- [11] A.E. Clark "Magnetostrictive rare earth Fe₂ compounds" Chap.7 in Ferromagnetic materials, Vol.1, ed by E.P. Wohlfarth [North Holland 1980], pp 531-589.
- [12] A.E. Clark, "Magnetic and magnetoelastic properties of highly magnetostrictive rare earth-iron laves phase compounds", AIP Conference Proceedings, No 18, Part 2, pp. 1015-1029, 1974.
- [13] C. Cartier-Million, « Actionneurs rotatifs magnétostrictifs a accumulation de pas ». Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, Français, 2002.
- [14] Etrema commercial datasheets, Ames, Ia, (US), www.etrema-usa.com. March 2000.

- [15] J.L. Fanson, "On the use of electrostrictive actuators in recovering the optical performance of the Hubble space telescope", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 360, p. 109-120, 1995.
- [16] R.L. Forward, "Electronic damping of vibrations in optical structures", *Applied Optics*, vol. 18 (S), p. 690-697, 1979.
- [17] P.D Atherton, K.Uchino, "New Developments in Piezo Motors and Mechanisms", *Proc of ACTUATOR 98 Conf*, Pub Messe Bremen, pp 164-169, 1998.
- [18] U. Döbbem, "Piezoelectric Actuators in Multilayer Technique", *Proc of ACTUATOR 94 Conf*, Pub Messe Bremen, pp 114-118, 1994.
- [19] R. Le Letty, F. Claeysen, *Catalogue of CedratPiezo products*, Ed CedratRecherche SA, Meylan, France, June 1998, 50p. or <http://www.cedrat.com>.
- [20] Cedrat, "Amplified Piezoelectric Actuators", CEDRAT Technologies, <http://www.cedrat.fr/>, 2005.
- [21] H. Bruneau, R. Le Letty, F. Claeysen, F. Barillot, "Application of a new amplified piezoelectric actuator to semi-active control of vibrations", *Proc of MV2 conf*, Lyon, 22-23 Oct.97, 12p.
- [22] F.Claeysen, R. Le Letty, "Low voltage piezoelectric piezoactuators and control of shapes", *Workshop on Materials and Smart Structure for shape control*, ONERA Chatillon, Jan 15-17, 1998.
- [23] S. Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic motors: theory and applications", Clarendon Press-Oxford, 1993.
- [24] F. Lepoitevin, "Développement et réalisation de briques de base pour la conception de micro-relais électromagnétiques et magnétostrictifs", *Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble*, thèse, Nov 2001.
- [25] L. Kiesewetter, *Proc. of sec. int. conf. on GMA*, Ed. C.Tyren, Amter (Fr), Ch.7, 15p, 1988.
- [26] A. Stanley (US), R. Gregory (US), US NAVY, "Magnetostrictive peristaltic pump", No. Publication: US6074179, 2000.
- [27] G. Anatas (US), J. Goldie (US), Satcon Technologie Corp (US), "Transverse field activated magnetostrictive motor", No Publication US5465015, Sept 1993.
- [28] Clark (US), J. Teter (US), US NAVY, "High torque magnetic angular positioning motor", No Publication: US5041753, 1991.
- [29] H. Hayes, "Apparatus for measuring tickness", U.S. Patente n 2.10S.479, 1938.
- [30] G. Bergstrand, A. Tove, "Magnetostrictive unit", U.S. Patente n 3.439.199, 1969.

- [31] Edson, "Magnetostrictive apparatus and process", U.S. Patente n 3.634.742, 1972.
- [32] B. Macabee, "Magnetostrictive motor system", US NAVY, No Publication: USS3410S6, 1994.
- [33] J. Vranish (US), NASA US, "Magnetostrictive roller drive motor", No.Publication: USS079460, 1992.
- [34] R. Venkataraman,"A Hybrid Actuator", University of Maryland, thèse, 1995.
- [35] A. Regaz, "Contribution à l'étude d'un actionneur à matériau magnétostrictif", Mémoire de Magister, EMP, Algérie, Alger, 2009.
- [36] A. Benyattou, "Etude magnétique et simulation d'un actionneur spiral magnétostrictif", Mémoire de Master en MII, Université Ziane Achour, Djelfa, Alger, 2012.
- [37] D.V. Smith, Griffiths, "Programming the finite element method", Second Edition, University of Manchester, UK, 1988.
- [38] T.T. Nguyen," Modeling with finite elements of magneto-electric composite materials", PhD thesis, University of Paris (2011) (in French).
- [39] K. Srinivasa Rao, "Design and simulation of MEMS based piezoelectric shear actuated beam". American J. Mater. Sci. 2(6), 179-184, 2012.
- [40] R. Eernisse. Holland, "Design of Resonant Piezoelectric Devices", Research Monograph No. 56, M.I.T. Press, 1969.
- [41] A. Benjeddou, M.A. Trindade, R. Ohayon,"A unified beam finite element model for extension and shear piezoelectric actuation mechanisms". J. Intell. Mater. Syst. Struct. 8(12), 1012-1025, 1997.
- [42] A. Benjeddou, M.A. Trindade, R. Ohayon,"New shear actuated smart structure beam finite element". J. AIAA 37, 378-383, 1999.
- [43] A. Regaz, B. Zegnini, D. Mahi, L. Boukezzi, "Static and harmonic behaviour of piezoelectric beam bending actuators", in Electrotechnica, Electroniac, Automatica, (EEA), 2017, Vol. 65, no. 4, pp. 30-36, ISSN 1582-5175.
- [44] A. Regaz, L. Boukezzi, B. Zegnini, D. Mahi, "Contribution to the study of piezoelectric beam bending actuator in harmonic mode".5th International Conference on Electrical Engineering (ICEE-B), pp 1-5, 2017.
- [45] K. Azoum, M. Besbes, F. Bouillaut, "3D FEM magnetostriction phenomena used coupled constitutive laws", International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics, 19, 367-371, 2004.

- [46] X. Mininger, N. Galopin, F. Bouillaut, M. Gabsi, "Analysis of electromagnetic strains on structure such as switched reluctance machine", *European Physics Journal: Applied Physics*, 39, 191-196, 2007.
- [47] A. Regaz, L. Boukezzi, B. Zegnini, D. Mahi, "Contribution to the study of piezomagnetic materials". 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE-B), pp 1-4, 2015.
- [48] J. Faiz, S. Moosavi, "Eccentricity fault detection – From induction machines to DFIG"— A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp 169–179, 2016.
- [49] M.Y.M. Kaikaa, M. Hadjami, and A. Khezzar, "Effects of the Simultaneous Presence of Static Eccentricity and Broken Rotor Bars on the Stator Current of Induction Machine". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), pp 2942–2942, 2014.
- [50] K. Boughrara, N. Takorabet, R. Ibtouen, O. Touhami, and F. Dubas, "Analytical analysis of cage rotor induction motors in healthy, defective, and broken bars conditions". *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 51, no 2, pp 1–17, 2015.
- [51] A.J. Moses, "Effect of stress on the magnetic properties of grain-oriented silicon iron magnetized in various directions". *IEEE Transactions on Magnetics*, 17(6) :2872–2874, 1981.
- [52] C. Gourdin, L. Hirsinger, G. Barbier, et R. Billardon, Experimental identification of the coupling between the anhysteretic magnetic and magnetostrictive behaviours. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 177-181(1):201–202, 1998.
- [53] A. Belahcen, "Magnetoelasticity, magnetic forces and magnetostriction in electrical machines". Ph. D, Helsinki University of Technology, Finlande, 2004.
- [54] C. Schneider, J. Richardson, "Biaxial magnetoelasticity in steels". *Journal of Applied Physics*, 53(11) :8136–8138, 1982.
- [55] J. Pearson, P.T. Squire, M.G. Maylin, et J.G. Gore (2000). Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure iron. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5) :3251–3253.
- [56] V. Maurel, "Influence de l'état mécanique multiaxial induit par la découpe sur les propriétés d'usage des tôles magnétiques". Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [57] J. Curie et P. Curie. Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 91 :294–295, 1880a.
- [58] J. Curie et P. Curie. Sur l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 91:383–387, 1880b.