

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Par : Yasser Bouraba

Akram Belkhiri

Sujet

Contribution au développement et la modélisation des micro-transformateurs

Soutenu publiquement, le 2 / 7 /2023, devant le jury composé de :

Mme Tahï Wassila	MAA	Univ-BBA	Président
Mme Zaher Djamila	MCB	Univ-BBA	Examineur
Mme Cherif Aida	Pr	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement :

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au Dieu le plus puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entreprendre et de terminer ce mémoire.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement notre encadrante, le **Pr. Aida Cherif**, d'avoir accepté de diriger notre thèse. Un grand merci pour vos conseils, votre disponibilité et vos jugements éclairés qui nous ont été d'une aide précieuse. Votre soutien pédagogique, administratif et moral nous a été d'une grande utilité depuis le début de notre thèse.

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'évaluation pour avoir consacré leur temps et leurs compétences à l'évaluation de notre travail. Leurs commentaires et suggestions ont enrichi notre réflexion et nous ont aidés à améliorer la qualité de ce mémoire.

Nous n'oublions pas de remercier nos familles et nos amis pour leur soutien indéfectible tout au long de nos études. Leur amour, et leurs encouragements ont été nos sources de motivation pendant les moments difficiles.

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien moral, vos discussions inspirantes ont été d'une valeur inestimable.

Dédicace

Avec une immense joie et émotion, je dédie cette mémoire et cette étape importante de ma vie entière aux mon père MOUSTAFA et ma mère OUM SAAD, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs, mon petit cher frère YUCEF merci pour tous les sacrifices que vous avez faits pour moi, merci pour votre soutien moral. Leur présence me donne la patience et l'inspiration pour tout ce qui est beau, elles sont la véritable signification de la famille et du soutien. Cette dédicace serait le meilleur moyen pour moi de vous honorer et de vous montrer à quel point vous avez été merveilleuses.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

A toute mes amies : MAHTAL Amine – HAMMOUDI Sif Edine – LEHOUIBI Salah –
MAHTAL Noufel - BOUSOIR Mehdi - BOUDJELAL Allaoua

Merci d'être toujours là pour moi.

BELKHAIR Akram

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère maman

Pour leur patience, leur soutien, leurs sacrifices, et leur encouragement

Pour celle qui m'a entourée pour que rien n'entrave le déroulement de mes études. Pour toi

" Maman"

Ce que je vous dédie est incomparable devant vos sacrifices.

Et j'espère être toujours à la hauteur de vos espérances.

A mes sœurs : Je dédie ce mémoire à mes sœurs qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours académique. Votre amour, votre soutien et votre camaraderie ont été une source d'inspiration et de force pour moi. Votre présence dans ma vie a apporté de la joie, du réconfort et de l'encouragement lorsque j'en avais le plus besoin. Je suis reconnaissant d'avoir des sœurs aussi merveilleuses et je vous dédie ce travail en signe de gratitude pour tout ce que vous avez apporté à ma vie. Que notre lien fraternel continue de grandir et de s'épanouir au fil des années

A mon père : Ta sagesse, ton soutien inconditionnel et ta foi en moi ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours académique, Tu as été mon modèle de persévérance, Merci d'avoir toujours cru en moi, d'avoir été mon mentor et mon guide. Que cette dédicace soit un symbole de ma reconnaissance éternelle envers toi.

Je le dédie à tous ce qui m'a donné leur moindre coup de pouce pour réussir ce travail...

yasser

Résumé :

Le transformateur piézoélectrique présent plusieurs avantages, par rapport au transformateur conventionnel tels que : dimension très réduite, léger, sans champ magnétique. Les transformateurs piézoélectriques atteignent des densités de puissance plus importantes que leurs homologues magnétiques. Cependant, un des principaux facteurs limitant la densité de puissance est la déformation maximale admissible par le matériau constituant le transformateur. L'échauffement des transformateurs piézoélectriques est principalement d'origine mécanique. Cet échauffement engendre une dégradation des caractéristiques. Dans ce travail, on explore une voie d'amélioration de ces comportements qui consiste à ajouter un alliage à mémoire de forme avec l'élément piézoélectrique pour augmenter la tension générée par le secondaire de manière à accroître le pouvoir de conversion mécano-électrique.

Mots clés : transformateur piézoélectrique, rendement, tension de sortie, alliage à mémoire de forme (AMF).

Abstract:

Piezoelectric transformers have a number of advantages over conventional transformers, such as being very small, lightweight and free of magnetic fields. Piezoelectric transformers achieve higher power densities than their magnetic counterparts. However, one of the main factors limiting power density is the maximum permissible deformation of the transformer material. The heating of piezoelectric transformers is mainly of mechanical origin. This heating leads to a degradation of the characteristics. This work explores a way of improving these behaviours by adding a shape memory alloy to the piezoelectric element to increase the voltage generated by the secondary in order to increase the mechanical-electrical conversion power.

Key words: piezoelectric transformer, efficiency, output voltage, shape memory alloy (SMA).

ملخص:

يتمتع المحول الكهروضغطي بالعديد من المزايا على المحول التقليدي مثل: صغير جداً، خفيف الوزن، بدون مجال مغناطيسي. تحقق المحولات الكهروضغطية كثافة طاقة أعلى من نظيراتها المغناطيسية. ومع ذلك، فإن أحد العوامل الرئيسية التي تحد من كثافة الطاقة هو التشوه الأقصى المسموح به لمادة المحول. تسخين المحولات الكهروضغطية ميكانيكية بشكل أساسي. يتسبب هذا التسخين في تدهور الخصائص. في هذا العمل، نستكشف طريقة لتحسين هذه السلوكيات التي تتمثل في إضافة سبيكة ذاكرة الشكل مع العنصر الكهروضغطي لزيادة الجهد الناتج عن المرحلة الثانوية من أجل زيادة قوة التحويل الميكانيكي والكهربائي.

الكلمات الرئيسية: محول كهروضغطي، مخرج، جهد إخراج، سبيكة ذاكرة الشكل.

Sommaire

Abréviation et symbole :

<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
Introduction	1
1 Généralités sur les matériaux intelligents	2
1.1 Introduction	2
1.2 Historique	2
1.3 Piézoélectricité.....	3
1.4 Symétrie et piézoélectricité	4
1.5 Equations piézoélectriques	6
1.5.1 Définition des grandeurs	6
1.5.2 Equations.....	7
1.6 Matériaux piézoélectriques.....	7
1.7 Coefficient de couplage	8
1.8 Facteur de qualité mécanique	8
1.9 Application des matériaux piézoélectrique.....	9
1.9.1 L'effet piézoélectrique fonctionne avec les capteurs et les moteurs.....	9
1.9.2 Capteurs piézoélectriques dans les applications industrielles	10
1.9.3 Actionneurs piézoélectriques dans les applications industrielles.....	11
1.9.4 Capteurs piézoélectriques dans les applications médicales.....	12
1.9.5 Actionneurs piézoélectriques dans l'électronique grand public	13
1.9.6 Piézoélectricité dans les applications de défense	15
1.10 Alliages à mémoire de forme.....	16
1.10.1 Définition	16
1.10.2 Historique sur les alliages à mémoire de forme	16
1.10.3 Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme.....	16
1.10.4 Effet mémoire à double sens	17
1.10.5 Application classique des alliages a mémoire de forme	18
1.11 Conclusion	18
2 Micro-transformateur piézoélectrique	18
2.1 Introduction	18
2.2 Etat de l'art de transformateur piézoélectrique.....	18
2.3 Principe de transformateur piézoélectrique	19
2.4 Avantages et inconvénients de transformateur piézoélectrique	20
2.4.1 Avantages des transformateurs piézoélectriques.....	20

2.4.2	Inconvénients des transformateurs piézoélectriques	20
2.5	Les différentes structures des transformateurs piézoélectriques	20
2.5.1	Transformateur de Rosen	20
2.5.2	Transformateur en mode transverse	21
2.5.3	Transformateur épaisseur (multicouches)	21
2.5.4	Transformateur en mode radial	22
2.5.5	Transformateurs multicouches en mode radial	23
2.6	Modélisation de transformateur piézoélectrique	23
2.6.1	Modélisation des éléments piézoélectriques	23
2.6.2	Modélisation d'un élément piézoélectrique en vibration.....	25
2.6.3	Transformateurs parallèles	25
2.6.4	Réduction du modèle d'un transformateur piézoélectrique	26
2.7	Modélisation d'un transformateur	27
2.7.1	Présentation de modèle.....	27
2.7.2	Les équations différentielles.....	28
2.7.3	Les Equations dans le domaine fréquentiel.....	28
2.8	Conclusion.....	30
3	Performances du transformateur piézoélectrique à base d'AMF.....	31
3.1	Introduction	31
3.2	Modélisation d'un alliage à mémoire de forme.....	31
3.3	Transformateur piézoélectrique à base de l'alliage à mémoire de forme.....	34
3.4	Simulation.....	35
3.4.1	Etude des changements de la force de l'alliage à mémoire de forme en fonction de la température.....	35
3.4.2	Performance de transformateur piézoélectrique sans alliage de mémoire de forme	37
3.4.3	Amélioration des performances de transformateur à base d'AMF	42
3.5	Conclusion.....	45
	Conclusion.....	46

Liste des figures

Figure 1. 1 : Mécanisme de quartz qu'est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges	3
Figure 1. 2: Mécanisme de la piézoélectricité directe qu'est utilisé dans les briquets pour une charge électrique qui donne feu au gaz.	3
Figure 1. 3: Cristal possédant un centre de symétrie	4
Figure 1. 4 : Cristal ne possédant pas de centre de symétrie, le barycentre des charges Déplace, créant une polarisation P_o	5
Figure 1. 5 : Organigrammes des différentes classes cristallines	6
Figure 1. 6: capteur de pression piézoélectrique.	11
Figure 1. 7 : Nettoyeurs ultrasoniques piézoélectriques	12
Figure 1. 8: Imagerie ultrasonore	13
Figure 1. 9: Imprimante matricielle	14
Figure 1. 10: Imprimante à jet d'encre en état de marche	14
Figure 1. 11: Haut-parleurs piézoélectriques.	15
Figure 1. 12: Micro-robotique piézoélectrique	15
Figure 1. 13 : cycle thermodynamique typique d'un alliage a mémoire de forme	17
Figure 2. 1: Principe d'un transformateur piézoélectrique	19
Figure 2. 2: Transformateur de Rosen.....	21
Figure 2. 3: Transformateur en mode transverse.	21
Figure 2. 4: Transformateur en mode épaisseur avec primaire en multicouches	22
Figure 2. 5 : Transformateur en mode radial	23
Figure 2. 6 : Transformateur Transoner multicouches en mode radial	23
Figure 2. 7: Raideur	24
Figure 2. 8 : Capacité	24
Figure 2. 9 : Convertisseur électromécanique	24
Figure 2. 10 : Cellule (masse, ressort, amortisseur) élémentaire modélisant un fonctionnement vibratoire en quart de longueur d'onde	25
Figure 2. 11 : Principe de fonctionnement d'un transformateur	26
Figure 2. 12: Modèle d'un transformateur barreau du transformateur (primaire ou secondaire)	26
Figure 2. 13: Réduction d'un résonateur inclus dans un transformateur	27
Figure 2. 14: Modèle de transformateur	27
Figure 3. 1: Déformation d'un bilame sous forme de poutre soumis à une variation de température a : bilame encasté d'un côté ; b : bilame libre	32
Figure 3. 2 : Transformateur piézoélectrique à base de l'alliage de mémoire de forme.....	34
Figure 3. 3: Force d'alliage en fonction de la température.	36
Figure 3. 4 : Tracé de CM et KoutM	38
Figure 3. 5: Le gain de tension en fonction de la charge	38
Figure 3. 6 : Vitesse de vibration en fonction de la charge.....	39
Figure 3. 7: Puissance absorbée en fonction de la charge.....	40
Figure 3. 8: Puissance transmise en fonction de la charge.....	41
Figure 3. 9: Tracé de rendement sans AMF en fonction de la charge	42
Figure 3. 10: Gain de tension en fonction de la charge.....	43
Figure 3. 11: Rendement avec et sans AMF en fonction de charge.....	44

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Définition des grandeurs	6
Tableau 1. 2: Equations de la piézoélectricité	7
Tableau 3. 1: Caractéristique d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF)	35
Tableau 3. 2: Valeurs de la force maximale F en fonction de la température.	36
Tableau 3. 3: Valeurs de la force F à T=50°C.	37
Tableau 3. 4: Dimensions du transformateur piézoélectrique	37

Abréviation et symbole :

Abréviation :

Symbole	Signification
BaTiO ₃	Titanate de baryum
PZT	Titanate de plomb-zirconate
KNbO ₃	Niobate de potassium
PLA	Acide polylactique
PVDF	Fluorure de polyvinylidène
PVDF-ZnO	Poly fluorure de vinylidène-oxyde de zinc
Fe	Fer
Cu	Cuivre
Co	Cobalt
Zn	Zinc
Ni	Nickel
Be	Béryllium
AMF	Alliage à Mémoire de Forme
As	Austénite Start
Af	Austénite Finish

Nomenclature :

Symboles	Grandeurs
D	Induction électrique
E	Champ électrique
ϵ	Permittivité
B	Inverse de la permittivité
S	Tenseur de déformation
T	Tenseur des contraintes
C	Rigidité
S	Souplesse
H	Constantes piézo-électrique du matériau
G	La Constante de la charge
D	La Constante de la tension
L	La longueur
Q_m	Facteur de qualité mécanique
C_0	Capacité bloquée
C_M	Capacité mécanique
F	La force appliquée
K	Le raideur propre
K_{in}	Rigidité primaire
K_{out}	Rigidité secondaire
M	La masse dynamique
C_{in}	Capacité primaire
C_{out}	Capacité secondaire
α_{in}	Coefficient de conversion électromécanique primaire
α_{out}	Coefficient de conversion électromécanique secondaire
R_L	La résistance de la charge

R_T	Rayon de courbure à la température cible
R_0	Rayon de courbure à la température de Référence
M	Rapport des épaisseurs des deux couches
N	Apport des modules de Young des deux couches
α_1	Coefficients de dilatation thermique (CDT)
α_2	Coefficients de dilatation thermique (CDT)
F_0	Force à la température de référence
T_0	Température de référence
L_0	Langueur initial
Y	Module de Young
S	L'épaisseur de bilame
L	La largeur
T	Température
K_{eff}	Coefficient de couplage
V	Tension mécanique
U	Le dépalcement
F	La fréquence
F_{AMF}	La force d'alliage a base de mémoire de forme

Introduction générale

Introduction

Les transformateurs jouent un rôle essentiel dans la transmission et la distribution de l'énergie électrique. Avec l'évolution des technologies et la demande croissante de miniaturisation, les micro-transformateurs ont suscité un grand intérêt. Dans ce mémoire intitulé "Contribution au développement et la modélisation des micro-transformateurs", nous explorons les avancées dans ce domaine passionnant.

Ce mémoire se compose de trois chapitres qui abordent différents aspects des micro-transformateurs. Dans le premier chapitre, nous nous concentrons sur les matériaux intelligents, qui jouent un rôle clé dans le développement de ces transformateurs miniaturisés. Nous présentons les principaux types de matériaux intelligents, tels que les matériaux piézoélectriques et les alliages à mémoire de forme. Nous discutons de leurs caractéristiques, de leurs avantages et de leurs limites, tout en mettant en évidence quelques exemples d'utilisation innovante de ces matériaux.

Le deuxième chapitre se concentre sur le principe de fonctionnement des transformateurs piézoélectriques, qui sont l'un des principaux types de micro-transformateurs étudiés. Nous explorons en détail leur fonctionnement, leurs différents types et leurs avantages et inconvénients. Comprendre ces aspects est essentiel pour concevoir et optimiser les performances des micro-transformateurs.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons à la modélisation des micro-transformateurs. Nous étudions spécifiquement la modélisation d'un fil d'alliage à mémoire de forme, un matériau prometteur pour les micro-transformateurs. Nous examinons également la modélisation des performances d'un transformateur piézoélectrique basé sur cet alliage de mémoire de forme. Cette étude de modélisation est cruciale pour prédire le comportement du micro-transformateur et optimiser ses performances.

En conclusion, ce mémoire vise à apporter une contribution significative au domaine des micro-transformateurs en mettant l'accent sur les matériaux intelligents, la modélisation et les performances. Il offre une vision complète des avancées actuelles et des perspectives futures pour le développement de ces dispositifs essentiels dans le domaine de l'énergie électrique.

Chapitre 1 :
Généralités sur les matériaux
intelligents

1 Généralités sur les matériaux intelligents

1.1 Introduction

Les matériaux intelligents sont des matériaux qui peuvent modifier leurs propriétés en fonction de stimuli externes, tels que la température, la lumière, le champ électrique ou magnétique, etc. Ces matériaux sont conçus pour être sensibles, adaptatifs et évolutifs, et offrent de nombreuses applications potentielles dans divers domaines, comme l'aérospatiale, la biomédecine, la robotique ou le secteur militaire. Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux types de matériaux intelligents, leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs limites, ainsi que quelques exemples d'utilisation innovante de ces matériaux.

1.2 Historique

Les matériaux piézoélectriques ont été découverts en 1880 par les frères curie, pierre et jacques [1], qui ont observé que certains cristaux, tel que le quartz, produisaient une charge électrique lorsqu'ils étaient soumis à une contrainte mécanique. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet piézoélectrique direct.

Au début du XXe siècle, les chercheurs ont commencé à explorer les propriétés des matériaux piézoélectriques pour des applications pratiques, tel que les transducteurs acoustiques. Les transducteurs piézoélectriques ont été utilisés pour la première fois en 1917[2], pour la production et la détection d'ondes sonores.

Dans les années 1940[3], les ingénieurs ont commencé à utiliser des matériaux piézoélectriques dans des applications militaires, telles que la détection de sous-marins et la production d'ondes acoustiques pour le sonar. Les transducteurs piézoélectriques ont également été utilisés dans l'industrie pour la mesure de la pression, de la force et la tension.

Dans les années 1960 et 1970[4], les matériaux piézoélectriques ont commencé à être utilisés dans les domaines de la médecine et de la biologie pour les ultrasons, l'imagerie médicale et les applications de simulation nerveuse. Les transducteurs piézoélectriques ont également été utilisés dans les instruments de musique électroniques, tels que les synthétiseurs. Au fil des ans, de nombreux matériaux piézoélectriques ont été développés, Y compris des céramiques, des polymères et des cristaux synthétiques. Les matériaux piézoélectriques sont aujourd'hui utilisés dans une large gamme d'application, notamment dans les capteurs, les actionneurs, les transducteurs, les dispositifs d'imagerie et les instruments de mesure.

1.3 Piézoélectricité

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux cristallins à produire une charge électrique proportionnelle à la contrainte mécanique qui les déforme c'est l'effet piézoélectrique direct et ce phénomène est réversible l'application d'un champ électrique externe provoque une déformation mécanique du matériau. ce sont les frères pierre et jacques curie qui expliquent l'effet direct et indirect, ils ont montré que le quartz soumis à une tension électrique vibre à une fréquence très stable et bien définie c'est l'effet piézoélectrique indirect c'est pour cette propriété que le quartz est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges en appliquant au quartz une tension provenant d'une pile celui-ci vibre et permet la mesure du temps la piézoélectricité directe est utilisée dans les briquets pour créer une charge électrique qui donne feu au gaz [5].



Figure 1. 1 : Mécanisme de quartz qu'est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges [5]

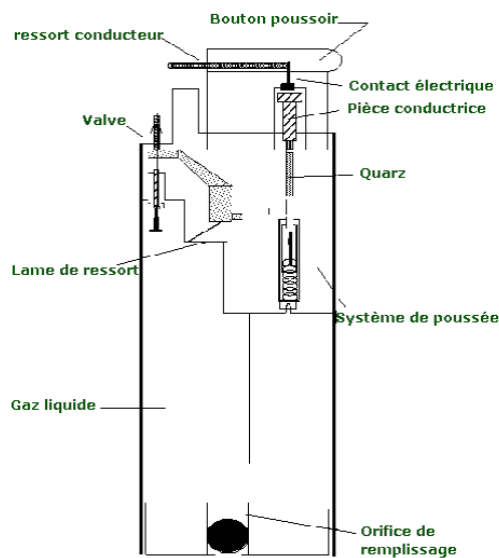


Figure 1. 2: Mécanisme de la piézoélectricité directe qu'est utilisé dans les briquets pour une charge électrique qui donne feu au gaz [5].

1.4 Symétrie et piézoélectricité

L'effet piézoélectrique direct désigne la capacité de certains matériaux à produire une charge électrique en réponse à une contrainte mécanique appliquée sur leur surface. Cette charge est proportionnelle à la force appliquée. Ce phénomène est également réversible, ce qui signifie que ces mêmes matériaux peuvent subir une déformation sous l'influence d'un champ électrique, connu sous le nom d'effet inverse. Pour être considéré comme piézoélectrique, un matériau doit être dépourvu de centre de symétrie, c'est-à-dire que les centres de charge positifs et négatifs doivent être situés à des endroits différents dans la structure cristalline. Ainsi, seuls les cristaux présentant cette propriété de non-centro-symétrie peuvent manifester des caractéristiques piézoélectriques. Cette propriété est clairement illustrée dans les figures (1.3 et 1.4). En revanche, si un cristal possède un centre de symétrie, une contrainte mécanique ne provoquera pas de déplacement des centres de charge positifs et négatifs, et donc aucune polarisation électrique ne sera observée [6].

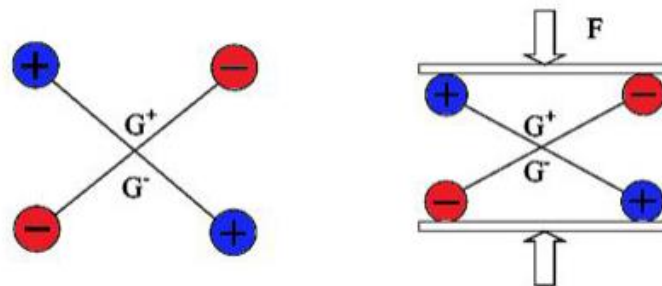


Figure 1. 3: Cristal possédant un centre de symétrie [6]

Si un matériau possède un centre de symétrie, comme illustré dans la figure 1.3, l'application d'une contrainte mécanique ne provoque pas de déplacement des centres de charge positifs et négatifs, également appelés barycentres (G^+ et G^-). Par conséquent, aucune polarisation électrique ne se manifeste, même si la contrainte mécanique entraîne une déformation du matériau.

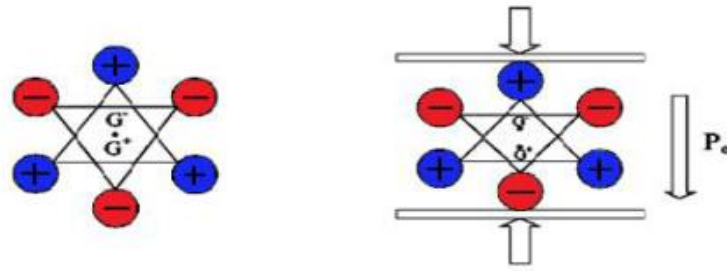


Figure 1. 4 : Cristal ne possédant pas de centre de symétrie, le barycentre des charges Déplace, créant une polarisation P_0 [6]

Dans le cas d'un cristal dépourvu de centre de symétrie, comme illustré dans la figure (1.3), une déformation induit un déplacement des centres de charge positifs et négatifs (G^+ et G^-). Ce déplacement entraîne l'apparition d'une polarisation électrique, notée P_0 , qui est proportionnelle à la déformation subie par le matériau. (Figure1.4) [6].

Lorsqu'une force externe est appliquée à un cristal, on s'attend généralement à ce que les positions des atomes dans le réseau changent en réponse aux contraintes mécaniques. Si cette réponse entraîne également un changement de polarisation, le matériau est appelé piézoélectrique.

La piézoélectricité, ainsi que la pyroélectricité et la ferroélectricité, est une propriété matérielle fortement liée aux symétries cristallines. Comme nous le verrons en détail, seuls les cristaux qui ne présentent pas de symétrie d'inversion sont potentiellement piézoélectriques. Des 32 groupes de points, 21 sont non centrosymétriques, et de ces 20 groupes de points montrent piézoélectrique. Les groupes de points piézoélectriques peuvent être divisés en dix groupes polaires et dix groupes non polaires. Les premiers présentent une polarisation spontanée et sont appelés pyroélectriques. Pour certains groupes pyroélectriques, cette polarisation spontanée peut être inversée avec un champ électrique extérieur, et ces matériaux sont alors appelés ferroélectriques. Autrement dit tous les ferroélectriques en phase polaire sont pyroélectriques et donc piézoélectriques. Cependant, pas tous les piézoélectriques montre pyro ou ferroélectrique [7].

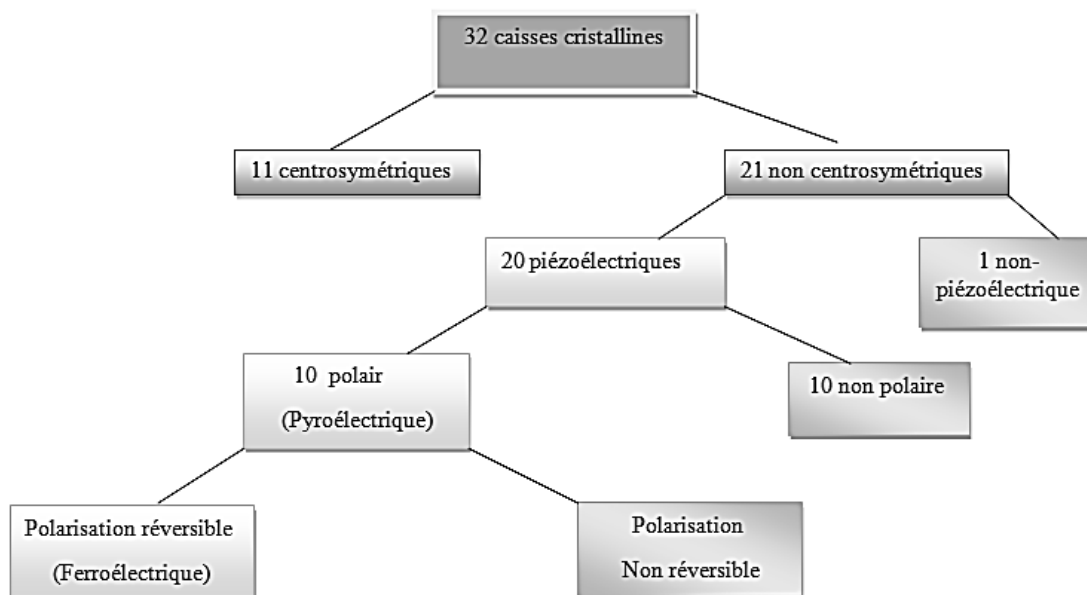


Figure 1. 5: Organigrammes des différentes classes cristallines [7].

1.5 Equations piézoélectriques

Les équations de la piézoélectricité relient les variables électriques (induction et champ électrique) aux variables mécaniques (déformation relative et contrainte).

1.5.1 Définition des grandeurs

Les différentes grandeurs physiques et notations associées sont données dans le tableau ci-dessous

Tableau 1. 1: Définition des grandeurs [8]

Nature	Notation		Unité	Dim
Electrique	D	Induction électrique	C/m^2	3×1
	E	Champ électrique	V/m	3×1
	ϵ	Permittivité	F/m	3×1
	β	Inverse de la permittivité	m/F	3×3
Mécanique	S	Tenseur de déformation		6×1
	T	Tenseur des contraintes	N/m^2	6×1
	C	Rigidité	N/m^2	6×6
	S	Souplesse	m^2/N	6×6
Piézo-électrique	H	Constante piézoélectrique	N/C	3×6
	e	du matériau	N/Vm	3×6
	g		m^2/C	3×6

	d		m/V	3×6
--	---	--	-----	-----

1.5.2 Equations

Les équations de la piézoélectricité sont rappelées dans le tableau 2, où $()^t$ indique la transposée de la matrice considérée et $()^X$ précise que la grandeur considérée est définie à X constant [8].

Tableau 1. 2: Equations de la piézoélectricité [8]

	T	S
E	$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E$ $D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E$	$T = c^E \cdot S - e^t \cdot E$ $D = e \cdot S + \varepsilon^S \cdot E$
D	$S = s^D \cdot T + g^t \cdot D$ $E = -g \cdot T + \beta^t \cdot D$	$T = c^D \cdot S - h^t \cdot D$ $E = -h \cdot S + \beta^S \cdot E$

1.6 Matériaux piézoélectriques

Il existe environ 200 matériaux piézoélectriques utilisés dans les applications de collecte d'énergie, répartis en quatre catégories principales :

- Les monocristaux (sel de Rochelle, niobite de lithium, cristaux de quartz).
- Céramiques (titanate de baryum (BaTiO₃), titanate de plomb-zirconate (PZT), niobate de potassium (KNbO₃)).
- Polymères (acide polylactique (PLA), fluorure de polyvinylidène (PVDF), co-polymères, cellulose et dérivés).
- Composites ou nanocomposites polymères (polyfluorure de vinylidène-oxyde de zinc (PVDF-ZnO), cellulose BaTiO₃, polyimides-PZT).

Une autre classification des matériaux piézoélectriques est :

- **Naturels** : Quartz, sel de Rochelle, Topaze, groupe des tourmalines
- **Synthétiques** : Titanate de baryum, titanate de plomb, niobite de lithium, titanate de zirconate de plomb.

Le choix d'un matériau piézoélectrique dépend non seulement de ses propriétés piézoélectriques et de la fonctionnalité du secteur d'application, mais aussi de paramètres tels que la souplesse de conception, la fréquence d'application et le volume disponible.

Bien que le quartz soit plus précis et présente une qualité acoustique élevée, il coûte plus cher que les céramiques piézocéramiques en titanate de zirconate et présente une sensibilité plus

faible ce qui limite la résolution des capteurs à mode de charge à quartz. Les matériaux les plus couramment utilisés pour les dispositifs de collecte d'énergie piézoélectrique étaient auparavant des matériaux à base de plomb tels que le PZT. Cependant, en raison des mesures législatives concernant la toxicité du plomb [9], le PZT a été remplacé par d'autres matériaux sans plomb tels que le BaTiO₃, dont l'efficacité de transduction est plus faible. Malgré leurs meilleures propriétés piézoélectriques, les céramiques piézoélectriques présentent certains inconvénients : rigidité, fragilité, densité élevée, coefficient de tension plus faible, limitation physique dans la production de céramiques piézoélectriques de petite taille et manque de flexibilité dans la conception.

Les polymères piézoélectriques sont de meilleurs candidats pour les applications de collecte d'énergie piézoélectrique car ils sont mécaniquement flexibles et peuvent donc résister à des déformations importantes. Ils génèrent également une tension appropriée avec une puissance de sortie suffisante, malgré leur faible densité de puissance, et ils peuvent résister à des champs d'entraînement plus élevés parce qu'ils ont une rupture diélectrique plus élevée et possèdent une force de champ fonctionnelle maximale ; ils ont un faible coût de fabrication, et le traitement est plus rapide par rapport aux composites à base de céramique [9].

1.7 Coefficient de couplage

Le coefficient piézoélectrique (d_{xy}) qui représente la charge générée par unité de force appliquée ou la déviation par unité de tension électrique appliquée. En raison de sa nature vectorielle intrinsèque, le coefficient piézoélectrique est généralement écrit sous la forme d_{yx} et y indiquant la direction du champ électrique et de la contrainte ou de la déformation, respectivement. Dans la littérature, le coefficient piézoélectrique longitudinal (d_{33}), le coefficient piézoélectrique transversal (d_{31}) et le coefficient piézoélectrique tangentiel (d_{15}) sont couramment rapportés [10].

Le coefficient de couplage électromécanique (K), qui représente le rapport entre les énergies électrique et mécanique associées à la réalisation de la transformation piézoélectrique :

$$K = \sqrt{\frac{\text{énergie mécanique de sortie}}{\text{énergie électrique d'entrée}}} = \sqrt{\frac{\text{énergie électrique de sortie}}{\text{énergie mécanique d'entrée}}} \quad (1.1)$$

1.8 Facteur de qualité mécanique

Le facteur de qualité mécanique Q_m est le rapport entre la réactance et la résistance dans le circuit équivalent en série représentant le résonateur piézoélectrique, qui est lié à la netteté de la fréquence de résonance. Le Q_m mécanique peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (1.2)$$

Où f_r est la fréquence de résonance, et f_1 et f_2 sont des fréquences à 3 dB de l'admittance maximale [10].

1.9 Application des matériaux piézoélectrique

De nos jours, tous les appareils électriques ne se limitent pas à une connexion électrique entre eux, mais la piézoélectricité est un élément commun à toutes les applications. Les téléphones portables, les injecteurs de carburant diesel, les allumeurs de grill, les transducteurs ultrasoniques, les micros de guitare acoustique, les capteurs de vibrations, certaines imprimantes et les cartes de vœux musicales, etc. utilisent la piézoélectricité [11]. Le développement supplémentaire de matériaux piézoélectriques artificiels, dont les céramiques piézoélectriques.

Les applications de la piézoélectricité comprennent les domaines suivants :

- Moteurs piézoélectriques.
- Actionneurs dans le secteur industriel.
- Capteurs dans le secteur médical.
- Actionneurs dans l'électronique grand public (imprimantes, haut-parleurs).
- Buzzers piézoélectriques.
- Capteurs d'instruments.
- Microphones.
- Allumeurs piézoélectriques.
- Nanopositionnement en AFM, STM.
- Micro-robotique (défense).

1.9.1 L'effet piézoélectrique fonctionne avec les capteurs et les moteurs

Tout d'abord, les briquets électriques et les grils à gaz ont une source d'énergie à haute tension par rapport à d'autres applications de l'effet piézoélectrique. Dans ces cas, un marteau frappe un morceau de matériau piézoélectrique, qui produit alors suffisamment de courant pour créer une étincelle qui enflamme le gaz inflammable en sa présence. Toutefois, dans d'autres applications telles que les capteurs, le marteau est généralement remplacé par d'autres formes d'énergie telles que les ondes sonores y compris les ultrasons, le marteau étant un excitateur du matériau piézoélectrique.

Lorsqu'ils sont utilisés avec des capteurs, les matériaux piézoélectriques détectent même certaines perturbations et anomalies infimes, ce qui en fait des dispositifs uniques et idéaux pour les essais industriels non destructifs et l'imagerie médicale.

D'autre part, les moteurs piézoélectriques peuvent effectuer des mouvements très précis et répétables. Cette caractéristique en fait d'excellents dispositifs pour les mouvements de précision des appareils optiques sensibles tels que les télescopes et les microscopes [11].

1.9.2 Capteurs piézoélectriques dans les applications industrielles

Le secteur industriel contribue à ses applications avec des capteurs piézoélectriques pour une variété d'utilisations. Parmi les utilisations courantes, on peut citer :

a. Capteurs de cliquetis du moteur

Les fabricants de moteurs sont de temps en temps confrontés à des défis liés au contrôle des dispositifs du moteur. Dans certaines situations difficiles, les moteurs à essence sont susceptibles de subir un phénomène indésirable connu sous le nom de détonation. Lorsque le processus de détonation se produit, la charge air/carburant explose au lieu de brûler en douceur, ce qui endommage le moteur. C'est la raison pour laquelle les moteurs ont été conçus avec des marges opérationnelles conservatrices au détriment de l'efficacité, afin d'éviter ce problème notoire. Grâce à l'amélioration des systèmes de contrôle, les paramètres du moteur peuvent être ajustés en temps réel pour maximiser l'efficacité et la puissance. Si une détonation commence à se produire, des capteurs de détonation piézoélectriques peuvent être utilisés pour détecter la détonation avant qu'elle ne devienne problématique. Les systèmes de contrôle ont ainsi le temps de procéder aux ajustements nécessaires [11].

b. Capteurs de pression

Dans presque toutes les applications de mesure des variations dynamiques de pression, l'utilisation de capteurs de pression piézoélectriques donne des résultats plus fiables que l'utilisation de capteurs de pression électromécaniques conventionnels (Figure 1.6). La raison en est que les dispositifs piézoélectriques ont une réponse en fréquence élevée et une conversion de signal sans qu'il soit nécessaire d'utiliser un soufflet, un diaphragme ou tout autre type de liaison mécanique en conjonction avec une jauge de contrainte ou un capteur de déplacement [11].



Figure 1. 6: capteur de pression piézoélectrique [11].

c. Équipement de sonar

Les équipements sonar dépendent particulièrement des capteurs piézoélectriques pour transmettre et recevoir des "pings" ultrasoniques dans la gamme 50-200 kHz. Outre une réponse en fréquence idéale pour de telles applications, les transducteurs piézoélectriques ont une densité de puissance élevée qui permet de transmettre de grandes quantités de puissance acoustique à partir d'un petit boîtier. Par exemple, un transducteur de seulement (100 mm) de diamètre peut être capable de gérer une puissance de sortie supérieure à 500 watts [11].

1.9.3 Actionneurs piézoélectriques dans les applications industrielles

À l'heure où les capteurs piézoélectriques sont très utiles au secteur industriel, celui-ci utilise également des actionneurs piézoélectriques pour toute une série d'applications :

a. Injecteurs de carburant diesel

Au cours de la dernière décennie, les réglementations sur les émissions des moteurs diesel sont devenues de plus en plus strictes. En outre, les clients continuent d'exiger des moteurs plus silencieux avec des courbes de puissance et de couple améliorées. Afin de répondre à ces exigences strictes en matière de conformité et de performance, les fabricants de moteurs ont eu recours à des injections de carburant précisément synchronisées et dosées pendant le processus de combustion .

Outre les autres applications des dispositifs piézoélectriques, un seul injecteur de carburant peut activer et désactiver le flux de carburant à des pressions supérieures à 1800 bars (26 000 psi) plusieurs fois en succession rapide au cours d'une seule course de puissance. Ce contrôle précis d'un fluide à haute pression est rendu possible par l'utilisation d'actionneurs piézoélectriques contrôlant de petites soupapes à l'intérieur des injecteurs de carburant.

Les équipements qui concernent les émissions des moteurs diesel sont devenus de plus en plus stricts, mais les demandes des clients pour des moteurs plus silencieux avec une puissance accrue ont conduit les principales entreprises mondiales dans le domaine des technologies d'injection de carburant à investir dans une recherche et un développement intensifs. Pour répondre aux demandes des clients tout en restant conformes et en devançant les pressions réglementaires, les injecteurs piézo-diesel ont été développés pour réduire les émissions en rendant la combustion du carburant dans le cylindre plus efficace. Ces progrès technologiques ouvrent une nouvelle phase avec des possibilités d'amélioration des performances et de réduction des émissions grâce à des injections de carburant dosées et programmées avec précision au cours du processus de combustion du diesel [12].

b. Nettoyage par ultrasons

Les actionneurs piézoélectriques contribuent également aux applications de nettoyage par ultrasons. Pour effectuer un nettoyage par ultrasons, les objets sont immergés dans un solvant (eau, alcool, acétone, etc.). Un transducteur piézoélectrique agit ensuite le solvant. Cette méthode permet de nettoyer de nombreux objets dont les surfaces sont inaccessibles [11].



Figure 1. 7 : Nettoyeurs ultrasoniques piézoélectriques [11].

Les nettoyeurs ultrasoniques piézoélectriques (figure 1.7) permettent notamment de briser les calculs rénaux par ultrasons et d'éliminer la plaque dentaire. Ils sont utilisés pour effectuer des mesures précises afin d'identifier les défauts et autres anomalies détectés entre les émetteurs et les récepteurs d'ondes ultrasoniques.

1.9.4 Capteurs piézoélectriques dans les applications médicales

Les transducteurs piézoélectriques sont souvent utilisés dans les équipements médicaux à ultrasons. Les progrès réalisés dans ce domaine au cours des décennies ont permis d'améliorer le suivi des grossesses et de faciliter les procédures chirurgicales peu invasives (figure 1.8).

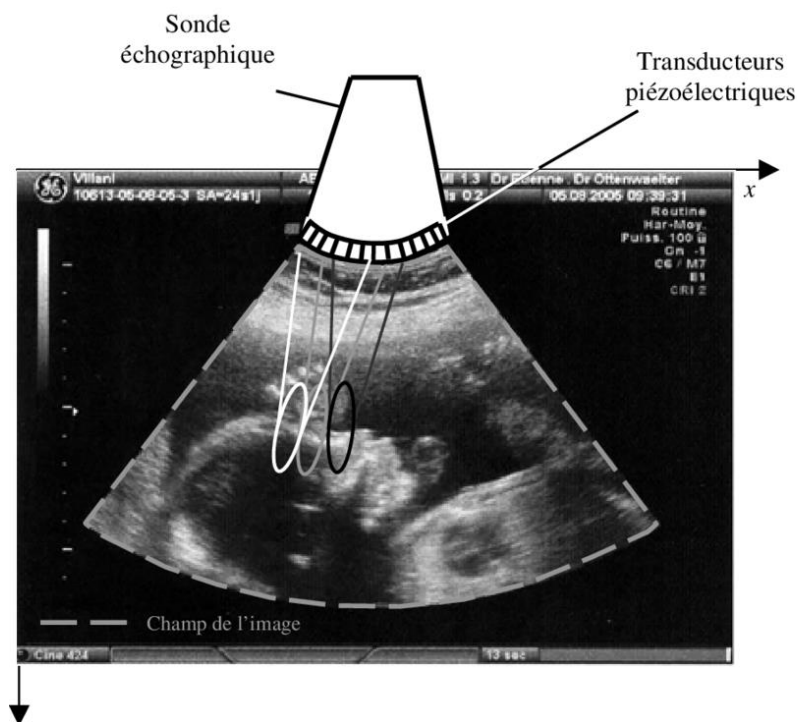


Figure 1. 8: Imagerie ultrasonore [13].

1.9.5 Actionneurs piézoélectriques dans l'électronique grand public

L'électronique grand public et la technologie vendue dans les magasins de tout le pays comportent des actionneurs piézoélectriques.

a. Imprimantes piézoélectriques

Il existe deux principaux types d'imprimantes qui utilisent des actionneurs piézoélectriques :

b. Imprimante matricielle

Dans une imprimante matricielle piézoélectrique (figure 1.9), les actionneurs piézoélectriques de la tête de l'imprimante déplacent des aiguilles qui traversent une bande d'encre (semblable à celle d'une machine à écrire) et s'appuient sur un morceau de papier selon différents motifs pour former des caractères. Pour la plupart des applications, les imprimantes matricielles ont été remplacées par d'autres technologies. Toutefois, l'imprimante matricielle est la seule technologie d'impression capable de générer des impressions en double ou en triple exemplaire [11].



Figure 1. 9:Imprimante matricielle[11].

c. Imprimante à jet d'encre

Dans une imprimante à jet d'encre piézoélectrique, les actionneurs piézoélectriques de la tête d'impression agissent sur de petits diaphragmes ou modifient la géométrie d'un encrier de manière à faire sortir des gouttelettes d'encre d'un orifice pour les déposer sur le papier. Il s'agit de l'une des technologies dominantes sur le marché des imprimantes à ce jour (figure 1.10) [11].

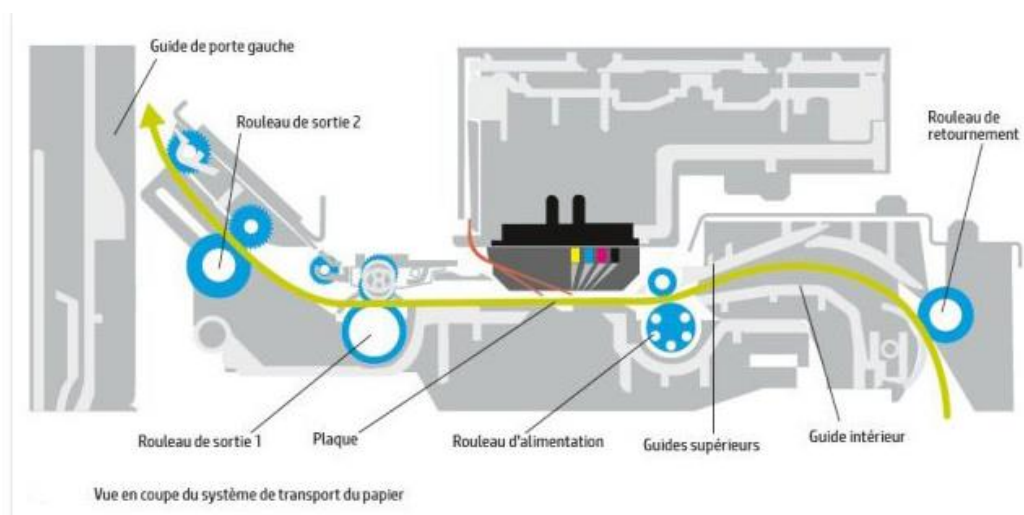


Figure 1. 10:Imprimante à jet d'encre en état de marche[14].

d. Haut-parleurs piézoélectriques

Les haut-parleurs piézoélectriques sont présents dans pratiquement toutes les applications qui doivent produire efficacement du son à partir d'un petit gadget électronique. Ces types de haut-parleurs sont généralement peu coûteux et nécessitent peu d'énergie pour produire des volumes

sonores relativement importants. Ainsi, les haut-parleurs piézoélectriques (figure 1.11) sont souvent présents dans des appareils tels que les suivants [11] :

- Téléphones portables
- Ecouteurs
- Jouets sonores
- Cartes de vœux musicales
- Ballons musicaux



Figure 1. 11: Haut-parleurs piézoélectriques[11].

1.9.6 Piézoélectricité dans les applications de défense

Dans le domaine de la petite robotique, il est nécessaire de disposer d'actionneurs et de capteurs mécaniques peu gourmands en énergie. Grâce aux actionneurs piézoélectriques, il est techniquement possible de construire un objet aussi petit qu'une mouche robotisée capable de ramper et de voler. En fait, un nouveau domaine de la technologie robotique connu sous le nom de Micro Air Véhicules vise à construire de petits drones de la taille d'un insecte ou d'un oiseau qui volent en battant des ailes (figure 1.12). Ils contrôlent les surfaces comme le font les oiseaux et les insectes. Ces types de prouesses en matière de miniaturisation sont possibles, en partie, grâce à l'utilisation d'actionneurs piézoélectriques [11].



Figure 1. 12: Microrobotique piézoélectrique [11].

1.10 Alliages à mémoire de forme

1.10.1 Définition

Ce sont généralement des alliages métalliques à deux, trois, voire quatre composants, avec des compositions chimiques particulière afin de garantir cette propriété. Il existe de nombreux alliages à mémoire de forme, mais très peu sont employés industriellement, principalement en raison de leur coût et/ou des propriétés partiellement intéressantes. Les deux principales familles sont les alliages nickel-titane-X (X en faible proportion : Fe, Cu, Co, ...) et les matériaux « base cuivre » Cu-Al (Zn, Ni, Be, ...).

Ces matériaux sont dits à « mémoire », car ils présentent la capacité de retrouver leur forme initiale, c'est-à-dire de « se souvenir » des traitements thermomécaniques qu'on leur a fait subir. La clé physique du phénomène mémoire de forme repose sur une transformation structurale de type martensitique réversible, entre une phase mère austénite (A dite haute température) et une phase fille appelée martensite (M dite basse température) [15].

1.10.2 Historique sur les alliages à mémoire de forme

L'effet mémoire de forme a été observé pour la première fois vers 1939 par des chercheurs russes sur des alliages de type cupro-aluminium. Une décennie plus tard, des chercheurs américains montrent qu'une énergie non négligeable est associée à la restitution de forme par chauffage d'un alliage or-cadium. En 1961, Buehler et al. Découvrent cette même propriété sur un alliage équiatomique nickel-titane. Dans la foulée, le premier développement d'application commerciale, avec l'effet mémoire de forme est utilisé sur les raccords de tuyauterie des avions F-14.

Toutefois la connaissance réelle de ce comportement thermomécanique fut lente, limitant le développement de nouveaux alliages et leur utilisation pérenne dans les années 1970-1980. Les recherches scientifiques sur la compréhension de ce phénomène ont réellement commencé dans les 80's avec les premières investigations expérimentales et les premières tentatives de modélisation associées [15].

1.10.3 Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme

Cette propriété AMF (Alliage à Mémoire de Forme) est définie comme l'aptitude d'un échantillon ayant subi une déformation importante à l'état martensitique, donc un changement de forme notable, à récupérer sa forme initiale à l'état austénitique, dont il a gardé le « souvenir », par chauffage à température supérieure à la température « austénite finish » (Af).

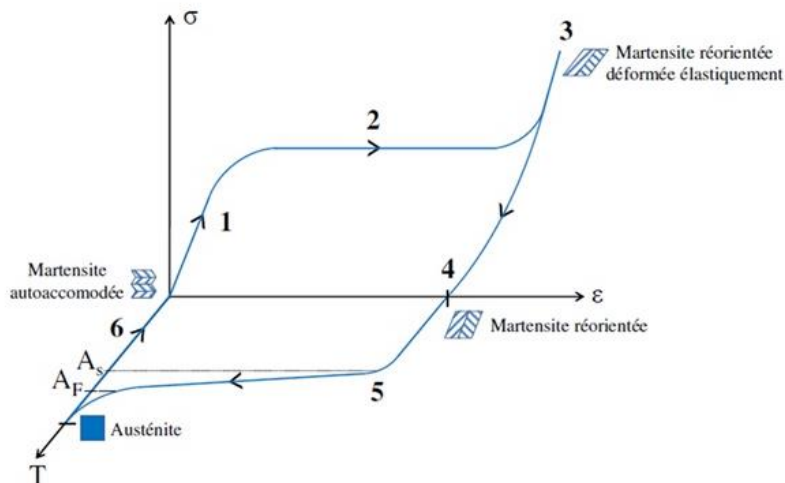


Figure 1.13 : cycle thermodynamique typique d'un alliage à mémoire de forme[15].

Une représentation schématique de l'effet mémoire de forme est montrée ci-dessus, et son mécanisme peut être résumé comme suit. L'application d'une contrainte sur une microstructure martensitique auto-accommodante (1) entraîne le mouvement des interfaces mobiles des différentes variantes, de sorte que les variantes de martensite accommodant au mieux la déformation progressent au détriment des autres (2). Ce changement d'orientation des variantes permet d'obtenir la meilleure accommodation possible de la déformation, jusqu'à atteindre une déformation maximum (3). Lorsque la contrainte cesse, une faible partie de la déformation est recouverte : elle correspond à un retour partiel des interfaces inter-variantes.

Il subsiste une déformation permanente car la martensite est stable à cette température (4). Pour obtenir le retour à l'état initial du matériau, il est nécessaire d'effectuer un chauffage à contrainte nulle jusqu'à une température supérieure à A_f afin d'atteindre une transformation inverse complète (5). Le recouvrement de la déformation s'explique par le retour du matériau en phase austénitique. Enfin le retour à température ambiante entraîne une transformation de phase sous contrainte nulle. Le phénomène d'accommodation prend alors place et reforme le mélange de variantes de martensite initial (6) : c'est l'effet mémoire de forme simple sens. [14]

1.10.4 Effet mémoire à double sens

L'apparition d'un effet mémoire à double sens n'a lieu que lorsque l'échantillon a été préalablement éduqué et requiert donc une procédure d'entraînement. Ceci peut se faire de plusieurs façons, et notamment en cyclant thermiquement l'échantillon et en lui imposant à chaque passage à basse température de prendre la forme désirée. Une autre méthode consiste à effectuer des cycles de transformations sous contrainte. Dans les deux cas, la procédure a pour but d'introduire des défauts propres aux variantes apparaissant lors de la mise en forme à basse température. Ces défauts sont le plus souvent des réseaux de dislocations qui ne sont

énergétiquement pas favorables à toutes les variantes, et qui provoqueront l'apparition des mêmes variantes que celles obtenues lors de l'éducation du matériau. Cette réorganisation des défauts oriente les variantes de martensite et ainsi permet au matériau de retrouver la forme mémorisée [15].

1.10.5 Application classique des alliages a mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme appartiennent à une classe de matériaux dit adaptatif, et sont appréciés pour leurs bonnes propriétés mécaniques telles que la ténacité, et sont capables de remplir de nombreuses fonctions dans des domaines variés. On peut citer comme exemple d'utilisation des secteurs comme l'industrie biomédicale (implant, prothèses, agrafes orthopédiques, fils pour appareils orthodontiques, corbeilles pour calculs rénaux ou encore des stents, imprimante 3D fabricant des implants sur mesures en AMF), l'aéronautique (décalage de fréquences nuisibles, atténuation de bruits), l'aérospatiale (déploiement d'antennes), l'horlogerie (ressort dans le mécanisme d'une montre), le nucléaire (tubes), le bâtiment (lamelle de matériau mémoire de forme pour renforcer par précontrainte le béton pour la construction de ponts, structure antisismique) ou enfin l'énergie (amélioration des performances de batterie lithium-ion) [15].

1.11 Conclusion

En conclusion, les matériaux piézoélectriques sont des matériaux importants qui ont une propriété unique de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et inversement. Ils sont utilisés dans des nombreuses applications, notamment dans les domaines de l'énergie, de la médecine, de la communication et de la fabrication. Malgré les défis tels que le cout élevé et la fragilité mécanique, les avancées technologiques continuent d'améliorer la performance et la fiabilité de ces matériaux. Avec des recherches et des développements continus de nouveaux matériaux piézoélectriques pourraient être découverts et de nouvelles applications pourraient être développées, offrant ainsi les possibilités pour les solutions innovantes dans des nombreux domaines. En sommes, les matériaux piézoélectriques jouent un rôle important dans notre vie quotidienne et ont un potentiel énorme pour devenir encore plus importants dans l'avenir.

Chapitre 2 :
Micro-transformateur piézoélectrique

2 Micro-transformateur piézoélectrique

2.1 Introduction

Un micro-transformateur piézoélectrique est un composant qui réalise une transformation de tension électrique à l'aide d'un couplage électromécanique. Il utilise la piézoélectricité, qui est la capacité de certains matériaux de générer une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une déformation mécanique et inversement de changer de forme lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Les micro-transformateurs piézoélectriques offrent des performances supérieures aux transformateurs magnétiques traditionnels, comme une fréquence de travail élevée, une efficacité énergétique, une isolation électrique renforcée et une compatibilité avec les technologies microélectroniques. Ils trouvent des applications dans des domaines tels que l'alimentation de circuits intégrés, la conversion d'énergie pour les systèmes embarqués ou la production de hautes tensions. Dans ce chapitre nous allons parler sur le principe de fonctionnement d'un transformateur piézoélectrique, leurs principaux types et leur avantages et inconvénients et finalement on à étudier la modélisation de ce micro-transformateur.

2.2 Etat de l'art de transformateur piézoélectrique

Un transformateur piézoélectrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa en utilisant les effets piézoélectriques directs et inverse. Les premiers travaux sur les transformateurs piézoélectriques ont été effectués par Alexander Maclean Nicolson dans les années 1920, qui a utilisé des cristaux piézoélectriques constitués de Sel de Seignette fixés ensemble à l'aide d'une structure externe [16]. Plus tard, la découverte des céramiques piézoélectriques telles que le Titanate de Barium a permis le développement des transformateurs piézoélectriques, avec Charles A. Rosen étant le premier à utiliser une seule céramique avec différentes électrodes et des polarisations différentes dans le matériau [17]. Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, les différentes applications des céramiques PZT ont permis le développement des transformateurs piézoélectriques, mais leur coût élevé, leur manque de fiabilité mécanique et la complexité des circuits de commande ont limité leur utilisation à grande échelle par rapport aux transformateurs magnétiques. Cependant, avec leur utilisation pour l'alimentation des lampes fluorescentes à cathode froide [18] dans les écrans LCD, les techniques de fabrication des transformateurs piézoélectriques ont été développées et leur fiabilité a augmenté. Depuis le passage des écrans LCD aux écrans LED, les transformateurs

piézoélectriques sont utilisés dans de nombreuses autres applications dans le domaine de l'ingénierie électrique.

Dans une autre étude, les performances de sortie de deux types de transformateurs piézoélectriques sont comparées. L'un fonctionne dans le mode de vibration longitudinale du deuxième ordre, tandis que l'autre fonctionne dans un mode de vibration longitudinale du troisième ordre. Les valeurs d'efficacité pour les deux atteignent un maximum en connectant une résistance de charge de 50 k Ω aux bornes de sortie. En termes de puissance de sortie, le second, avec sept couches de céramique dans la section conductrice, génère une puissance de sortie de 3,3 W, soit deux fois plus que le premier avec neuf couches de céramique. La différence est due aux pertes mécaniques qui dépendent des niveaux de vibration et de la structure multicouche, ainsi qu'à la variation de l'impédance aux bornes de sortie.[19]

2.3 Principe de transformateur piézoélectrique

Le fonctionnement d'un transformateur piézoélectrique est basé sur une double conversion électromécanique (effet piézoélectrique inverse) puis mécano-électrique (effet piézoélectrique direct) de l'énergie. Pour cela, un transformateur piézoélectrique est formé d'une céramique piézoélectrique sur laquelle sont déposés deux jeux de deux électrodes primaires et secondaires. Si l'on impose une tension alternative au niveau des électrodes primaires, on génère une vibration alternative de la céramique qui induit à son tour une tension alternative entre les électrodes secondaires. Le rapport de transformation est alors fonction du type de polarisation de la céramique et des dimensions géométriques caractéristiques des primaires et des secondaires. Dans la mesure où le fonctionnement est basé sur la mise en vibration d'une céramique piézoélectrique le rapport de transformation et les performances du transformateur ne sont vraiment intéressants qu'au voisinage de la résonance mécanique de la structure [20]

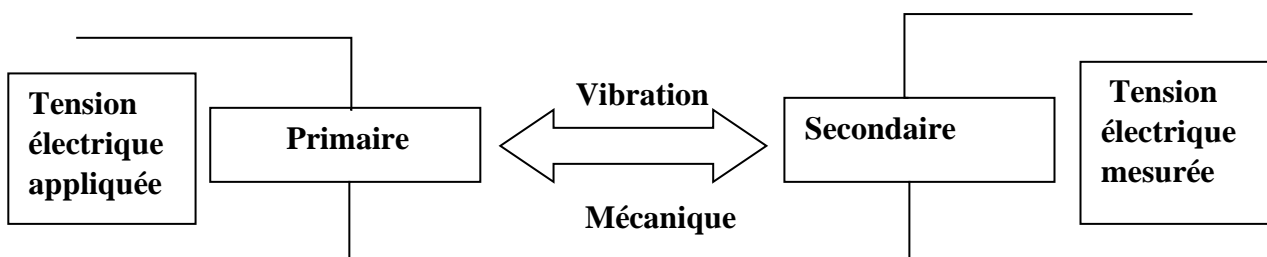


Figure 2. 1: Principe d'un transformateur piézoélectrique [21].

2.4 Avantages et inconvénients de transformateur piézoélectrique

Les transformateurs piézoélectriques sont utilisés pour transformer les signaux électriques en signaux acoustiques et vice versa. Ils ont des avantages et des inconvénients qui dépendent des besoins de l'application .

2.4.1 Avantages des transformateurs piézoélectriques

- **Haute efficacité** : Les transformateurs piézoélectriques ont une efficacité de conversion élevée, ce qui signifie qu'ils peuvent convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, avec peu de pertes d'énergie.[22]
- **Taille compacte** : Les transformateurs piézoélectriques sont beaucoup plus petits que les transformateurs électromagnétiques de même puissance, ce qui les rend adaptés aux applications où l'espace est limité.[23]
- **Faible bruit** : Les transformateurs piézoélectriques produisent généralement moins de bruit que les transformateurs électromagnétiques, ce qui les rend adaptés aux applications où le bruit est un problème.[24]

2.4.2 Inconvénients des transformateurs piézoélectriques

- **Fréquence limitée** : Les transformateurs piézoélectriques sont généralement limités en fréquence, ce qui signifie qu'ils ne conviennent pas à toutes les applications.[25]
- **Tension limitée** : Les transformateurs piézoélectriques ont généralement une tension de sortie limitée, ce qui signifie qu'ils ne conviennent pas à toutes les applications.[26]
- **Sensibilité aux chocs** : Les transformateurs piézoélectriques peuvent être sensibles aux chocs et aux vibrations, ce qui peut les endommager ou affecter leur performance.[27]

2.5 Les différentes structures des transformateurs piézoélectriques

2.5.1 Transformateur de Rosen

Le transformateur de Rosen (figure 2.2) est une structure très étudiée dans la littérature en raison de son principe de fonctionnement basé sur le couplage des modes transverses au primaire et longitudinal au secondaire. Cette conception permet d'obtenir un gain en tension élevé, lié notamment au rapport entre la longueur du barreau et son épaisseur, ainsi qu'une tenue en tension plus élevée et une capacité inter-électrodes plus faible au secondaire, ce qui réduit les pertes. Le primaire peut être réalisé en multicouches pour augmenter le champ appliqué et le gain en tension de la structure. Cependant, le transformateur de Rosen ne possède généralement pas d'isolation galvanique en raison de ses trois électrodes, mais il est possible d'ajouter une

électrode de référence pour le secondaire pour créer une isolation, en la plaçant loin du primaire pour une isolation plus forte. Enfin, la zone de transition entre les polarisations est sujette à des contraintes élevées pouvant causer une fatigue plus rapide.

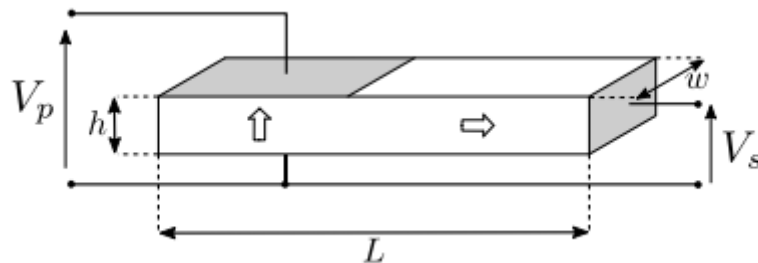


Figure 2. 2: Transformateur de Rosen[28]

2.5.2 Transformateur en mode transverse

Le transformateur en mode transverse est constitué d'un barreau céramique polarisé dans l'épaisseur et de deux jeux d'électrodes à la surface, et sa structure est représentée par la figure (2.3). En raison de la symétrie du système, les gains en tension sont relativement faibles et la taille et la position des électrodes ne peuvent pas être modifiées de manière significative, car elles dépendent du mode de résonance excité. Les transformateurs en mode transverse sont principalement utilisés comme transformateurs d'isolation grâce à l'isolation galvanique assurée par la séparation des électrodes primaires et secondaires.

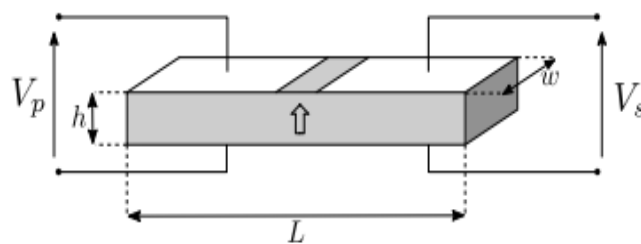


Figure 2. 3 : Transformateur en mode transverse [28].

2.5.3 Transformateur épaisseur (multicouches)

Le transformateur épaisseur (représenté dans la figure 2.4) est formé d'un parallélépipède divisé en deux parties. Cette structure, brevetée par NEC [28] en 1992, présente plusieurs couches au niveau du primaire afin d'augmenter le champ électrique et d'exciter le mode épaisseur. Le mode épaisseur est également utilisé au niveau du secondaire. Le gain en tension de ce type de transformateur dépend du rapport entre les épaisseurs du primaire et du secondaire, ainsi que du

nombre de couches du primaire. La séparation du primaire en plusieurs couches permet de contrôler le gain en tension sans modifier la fréquence de résonance du transformateur. L'isolation galvanique est assurée par un isolant placé entre le primaire et le secondaire. Les transformateurs de ce type fonctionnent généralement à des fréquences autour du MHz. Toutefois, le coefficient de couplage transverse effectif est assez similaire à celui en épaisseur pour le PZT, ce qui peut entraîner l'apparition de modes parasites qui limitent les performances du transformateur. L'utilisation de matériaux fortement anisotropes peut réduire cet effet. Cette structure peut également être utilisée en mode transversal, dans ce cas, on parle de transformateur en mode contour, avec une fréquence de fonctionnement autour de 100 kHz.

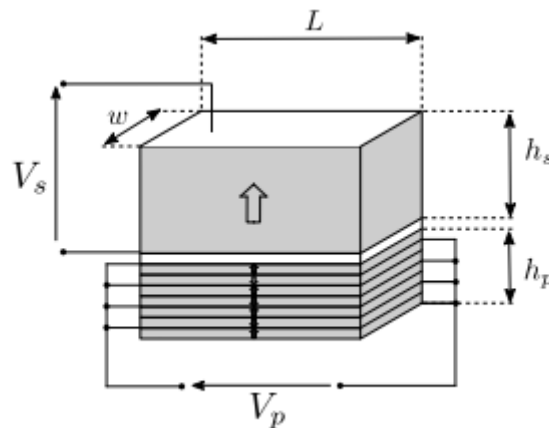


Figure 2. 4: Transformateur en mode épaisseur avec primaire en multicouches [28].

2.5.4 Transformateur en mode radial

Le transformateur en mode radial (figure 2.5) est constitué d'un disque polarisé dans l'épaisseur et de deux sections à la surface. Contrairement au transformateur transverse, ce transformateur bénéficie d'un coefficient de couplage électromécanique plus élevé ($k_p > k_{31}$) et permet un meilleur contrôle sur le gain en tension grâce à la dissymétrie entre les sections primaires et secondaires. Le périmètre de chaque section peut être ajusté pour obtenir le gain de tension désiré.

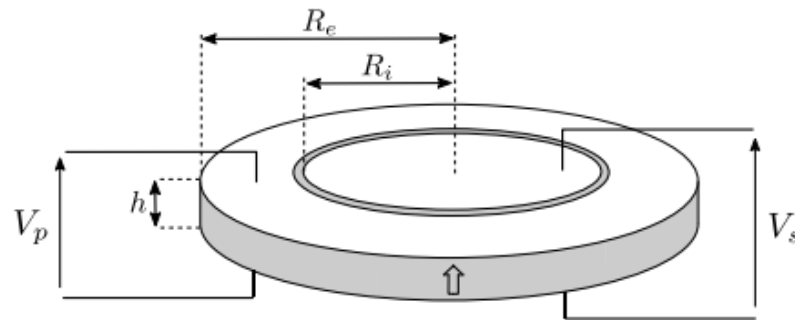


Figure 2. 5 : Transformateur en mode radial [28].

2.5.5 Transformateurs multicouches en mode radial

Le transformateur Transoner (figure 2.6), développé par Face Electronics [29], est basé sur le mode de vibration radiale, mais avec le primaire et le secondaire séparés dans le sens de l'épaisseur. Selon l'application, les primaires et les secondaires peuvent être multicouches. Un isolant rigide permet de les séparer électriquement tout en conservant un fort couplage mécanique. Ces transformateurs piézoélectriques offrent les meilleures performances en termes de densité de puissance, avec des puissances pouvant atteindre 30 W.

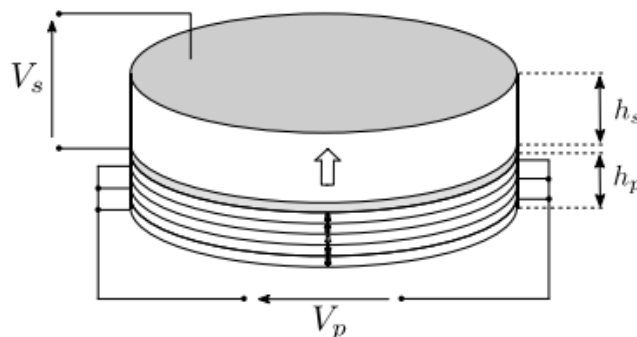


Figure 2. 6 : Transformateur Transoner multicouches en mode radial [28]

2.6 Modélisation de transformateur piézoélectrique

2.6.1 Modélisation des éléments piézoélectriques

Les équations couplant la contrainte et le déplacement électrique à la déformation et au champ électrique sont rappelées sous forme tensorielle par (3.1).

$$\begin{pmatrix} T \\ D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C^E & e \\ e & e^S \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S \\ E \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Ces équations peuvent être écrites de manière à lier la force et le courant (F, I) à l'élongation du matériau et à la tension (u, V) ces relations sont données dans le système d'équation (2.2) [30]

$$\begin{cases} F = k^E \cdot u + \alpha \cdot V \\ I = \alpha \cdot \dot{u} + C_0 \cdot \dot{V} \end{cases} \quad (2.2)$$

Cette équation traduit les trois comportements d'un élément piézoélectrique :

Un comportement purement élastique traduit par la relation (2.3) et graphiquement par la figure ci-dessous.

$$F_{elast} = k \cdot u \quad (2.3)$$

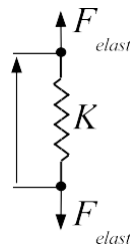


Figure 2. 7:Raideur [30]

Un comportement purement diélectrique, traduit par (2.4). I_{diel} est le courant associé au déplacement de charge dans le matériau.

$$I_{diel} = C_0 \cdot \dot{V} \quad (2.4)$$

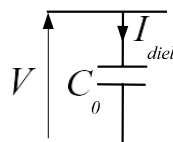


Figure 2. 8 : Capacité[30]

Et enfin un comportement lié à la conversion électromécanique, traduit par les relations du système.

$$\begin{cases} F_{elec} = \alpha \cdot V \\ I_{mec} = \alpha \cdot \dot{u} \end{cases} \quad (2.5)$$

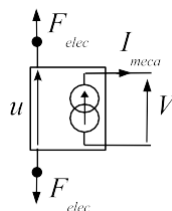


Figure 2. 9 : Convertisseur électromécanique [30]

2.6.2 Modélisation d'un élément piézoélectrique en vibration

Classiquement, la modélisation de systèmes mécaniques résonants est basée sur l'utilisation de modèles {masse, ressort, amortisseur}. La figure (2.10) représente une barre bloquée d'un côté et libre de l'autre, soumise à un déplacement d'amplitude U_M . En parallèle, on montre le système {masse, ressort, amortisseur} le modélisant soumis au même déplacement. Le lien entre le système mécanique réel et son modèle apparaît ainsi très intuitif. Afin de refléter le fonctionnement de ce type de résonateur, les systèmes {masse, ressort, amortisseur} utilisés ont les caractéristiques suivantes

- D'un côté, le système possède une référence mécanique, représentant un nœud de vibration où le déplacement mécanique est nul,
- De l'autre côté, le système possède une masse dynamique, représentant un ventre de vibration où le déplacement est maximum.

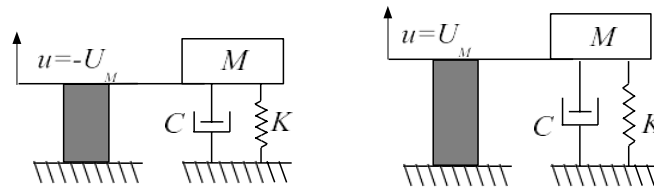


Figure 2. 10 : Cellule (masse, ressort, amortisseur) élémentaire modélisant un fonctionnement vibratoire en quart de longueur d'onde [30]

L'élaboration des modèles de transformateur repose sur l'utilisation de tels systèmes, qu'on appellera cellules élémentaires. Ces cellules modélisent les fractions du transformateur fonctionnant en quart de longueur d'onde. Pour modéliser un élément piézoélectrique, il suffit donc de remplacer la raideur traduisant le comportement purement élastique d'un matériau inerte, par l'ensemble {raideur, capacité, cellule de couplage} défini par le système d'équations (2.5).

2.6.3 Transformateurs parallèles

Les transformateurs parallèles sont construits de telle manière que le primaire et le secondaire subissent la même déformation. L'axe principal de vibration est contenu dans le plan définissant l'interface entre le primaire et le secondaire. La figure (2.11) permet de se faire une idée précise de la disposition du primaire et du secondaire. En noir, l'interface entre le primaire et le secondaire se déforme sous l'action du primaire entraînant la déformation du secondaire.

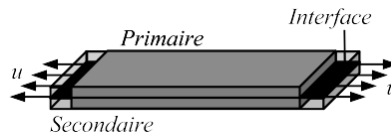


Figure 2. 11 : Principe de fonctionnement d'un transformateur [30]

2.6.4 Réduction du modèle d'un transformateur piézoélectrique

Afin de limiter le nombre de déplacements à calculer, il peut être pratique de réduire le modèle. Cette réduction porte essentiellement sur le modèle d'un résonateur fonctionnant en demi-longueur d'onde. Compte tenu de l'influence que pourra avoir l'état de charge sur la raideur du résonateur, cette réduction ne sera permise que si le résonateur est complètement inclus dans une partie

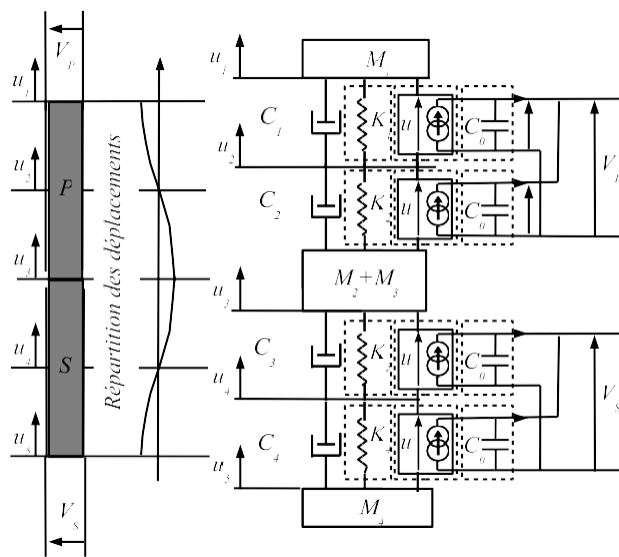


Figure 2. 12: Modèle d'un transformateur barre du transformateur (primaire ou secondaire) [30]

Dans le cas d'un transformateur parallèle, la répartition des déplacements dans le transformateur est indépendante des raideurs du primaire et du secondaire. On verra par la suite que la valeur de la charge modifie la valeur de la raideur du secondaire. Ce type de transformateur est caractérisé par une symétrie par rapport au nœud de vibration quel que soit l'état de charge du secondaire. Il pourra donc être réduit de la manière indiquée sur la figure (2.13). Après réduction, les constantes du modèle sont indiquées, en fonction des constantes du modèle non réduit, sur la figure (2.13).

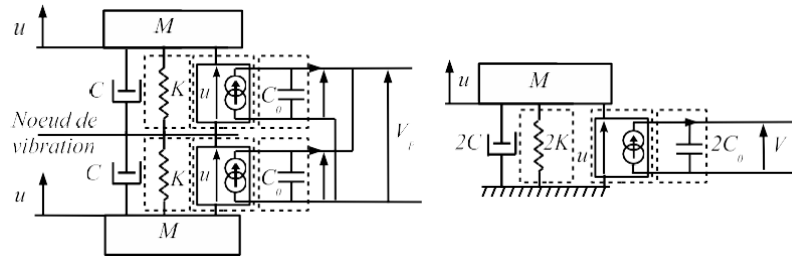


Figure 2. 13: Réduction d'un résonateur inclus dans un transformateur [30]

2.7 Modélisation d'un transformateur

2.7.1 Présentation de modèle

Dans cette section, le modèle d'un transformateur ainsi que les équations en découlant sont présentés. Le domaine de validité de ce modèle a été présenté plus haut. Le synoptique graphique est donné par la figure (2.14) : on y montre la correspondance entre le modèle {masse, ressort, amortisseur} et une structure physique. Conformément aux principes que nous avons exposés plus haut, ce modèle repose sur l'association en parallèle de deux résonateurs réduits à deux systèmes {masse, ressort, amortisseur}, un étant associé au primaire et l'autre au secondaire. Les masses dynamiques des deux systèmes sont solidaires et sont réduites à une seule masse commune aux raideurs primaires et secondaires. Ce modèle ne compte qu'une seule variable de déplacement.

La masse M est soumise à l'action de deux cellules piézoélectriques caractérisées par leur facteur de force a , leur capacité bloquée C_0 ainsi que leur raideur propre K . Les paramètres sont les suivants : α_{in}, C_{0in} et K_{in}^E , pour le primaire et α_{out}, C_{0out} et K_{out}^E pour le secondaire. L'exposant des raideurs signifie que leurs valeurs sont définies à champs constant (ou en court-circuit). Les pertes mécaniques sont caractérisées globalement par la constante C . Sur la figure (2.14), les ensembles {cellule de conversion, capacité}, précédemment définis, ont été remplacés par des symboles plus compacts qui seront conservés dans la suite de ce manuscrit.

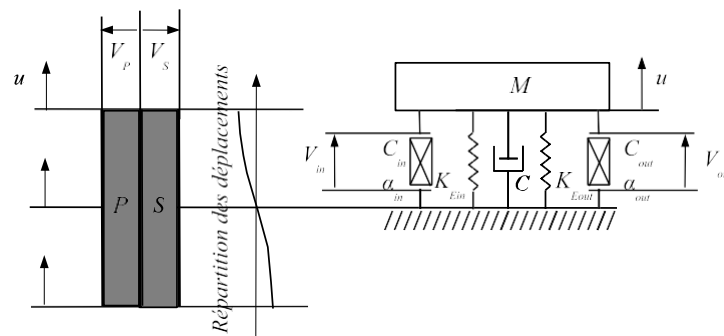


Figure 2. 14: Modèle de transformateur [30]

2.7.2 Les équations différentielles

A partir du système d'équations (2.2), on déduit les relations piézoélectriques de base pour le primaire (2.5) et pour le se secondaire (2.6).

$$\begin{cases} F = k_{in}^E \cdot u + \alpha_{in} \cdot V_{in} \\ U = \alpha_{in} \cdot \dot{u} + C_{0in} \cdot V_{in} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} F = K_{out}^E \cdot u + \alpha_{out} \cdot V \\ U = \alpha_{out} \cdot \dot{u} + C_{0out} \cdot V_{out} \end{cases} \quad (2.6)$$

Le principe fondamental de la dynamique appliquée à la masse M conduit à l'équation du mouvement (2.7). Cette équation régit le comportement mécanique du transformateur

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (K_{Ein} + K_{Eout})u = -\alpha_{in} \cdot V_{in} - \alpha_{out} \cdot V_{out} \quad (2.7)$$

La manière la plus simple d'étudier l'emportement d'un transformateur piézoélectrique est d'étudier l'effet d'une variation de la résistance connectée au secondaire. L'équation différentielle (2.8) décrit la tension aux bornes du secondaire en fonction de la résistance RL et du déplacement u. Cette équation est obtenue à partir de l'équation électrique du système (2.6)

$$V_{out} + \frac{1}{R_L \cdot C_{out}} \cdot V_{out} = \frac{\alpha_{out}}{C_{out}} \cdot \dot{u} \quad (2.8)$$

On va tout d'abord exprimer les équations mécaniques et électriques dans le domaine fréquentiel. On en déduira le comportement des grandeurs caractéristiques des transformateurs (puissances, rendement, vitesse de vibration) [28].

2.7.3 Les Equations dans le domaine fréquentiel

En régime permanent, on exprime les équations (2.7) et (2.8) dans le domaine fréquentiel. Du point de vue mécanique, on obtient l'équation (2.9), l'équation électrique devenant (2.10).

$$-\omega^2 \cdot M \cdot u + (K_{Ein} + K_{Eout}) \cdot u + j \cdot \omega \cdot C_{in} \cdot u = -\alpha_{in} \cdot V_{in} - \alpha_{out} \cdot V_{out} \quad (2.9)$$

$$V_{out} = -\frac{j \cdot \alpha_{out} \cdot R_L \cdot \omega}{1 + j \cdot \omega \cdot R_L \cdot C_{out}} \cdot u \quad (2.10)$$

En intégrant (2.9) dans (2.10), il vient la forme compacte de l'équation mécanique (2.11) dans laquelle n'apparaît plus la tension secondaire (V_{out}). En revanche, la raideur associée à la sortie devient un terme de raideur équivalent, K_{outM} , exprimé en fonction de la résistance R_L par l'équation (2.12). Ce terme intervient directement sur la variation de la pulsation de résonance comme nous allons le voir par la suite. Le terme de perte C devient un terme de perte équivalent C_M décrit par (2.13). Ce terme traduit à la fois les pertes mécaniques et la puissance utile

convertie par le secondaire et transmise à la charge. Il intervient donc directement dans la variation des grandeurs mécaniques et électriques.

$$-\omega^2 \cdot M \cdot u + (K_{Ein} + K_{outM}) \cdot u + j \cdot \omega \cdot C_M \cdot u = -\alpha_{in} \cdot V_{in} \quad (2.11)$$

$$K_{outM} = K_{Eout} + \frac{\alpha_{out}^2 \cdot C_{out} \cdot (R_L \cdot \omega)^2}{1 + (\omega \cdot R_L \cdot C_{out})^2} \quad (2.12)$$

$$C_M = C + \frac{\alpha_{out}^2 \cdot R_L}{1 + (\omega \cdot R_L \cdot C_{out})} \quad (2.13)$$

L'équation (2.12) et (2.13) montre l'évolution typique de ces deux paramètres en fonction de la valeur de la résistance de charge. La variation de la raideur équivalente K_{outM} sur l'équation (2.12) explique la variation de la pulsation de résonance en fonction de la charge. Sur l'équation (2.13), le coefficient C_M admet un maximum traduisant un pouvoir de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique du secondaire. Le gain en tension est donné par la relation suivante :

$$V_{in} = \frac{-\omega^2 \cdot M + (K_{Ein} + K_{outM}) + j \cdot \omega \cdot C_M}{-\alpha_{in}} \quad (2.14)$$

$$V_{out} = -\frac{j \cdot \alpha_{out} \cdot R_L \cdot \omega}{1 + j \cdot \omega \cdot R_L \cdot C_{out}} \quad (2.15)$$

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.16)$$

La puissance absorbée

$$p_{in} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\alpha_{in} \cdot V_{in})^2}{C + \frac{\alpha_{out}^2}{1 + (\omega \cdot R_{out})^2}} \quad (2.17)$$

La puissance transmise :

$$p_{out} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_L \cdot (\alpha_{in} \cdot \alpha_{out} \cdot V_{in})^2}{(1 + (\omega \cdot R_L \cdot C_{out})^2) \cdot \left(C + \frac{\alpha_{out}^2 \cdot R_L}{1 + (\omega \cdot R_L \cdot C_{out})^2} \right)^2} \quad (2.18)$$

Le rendement :

$$\eta = \frac{R \cdot \alpha_{out}^2}{(1 + (\omega \cdot R \cdot C_{out})^2) \cdot \left(C + \frac{\alpha_{out}^2 \cdot R}{1 + (\omega \cdot R \cdot C_{out})^2} \right)^2} \quad (2.19)$$

2.8 Conclusion

Les transformateurs piézoélectriques sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Ils sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les dispositifs de contrôle de vibration, les dispositifs de stockage d'énergie, les capteurs de force et les dispositifs de micro fluidique. Les micro-transformateurs piézoélectriques sont des dispositifs miniaturisés qui ont de nombreuses applications dans les domaines de la microélectronique et des dispositifs médicaux. Les performances des transformateurs piézoélectriques dépendent de nombreux facteurs, tels que la qualité de la conception, la qualité des matériaux et les conditions de fonctionnement. Les performances peuvent être améliorées en utilisant des matériaux piézoélectriques de haute qualité et en optimisant la géométrie du transformateur. Les performances peuvent également être améliorées en utilisant des techniques avancées de fabrication, telles que la lithographie UV et la gravure au plasma.

En conclusion, les transformateurs piézoélectriques sont des dispositifs polyvalents et utiles dans de nombreux domaines. Les progrès récents dans la fabrication de micro-transformateurs piézoélectriques ont permis de miniaturiser ces dispositifs pour une utilisation dans des applications hautement spécialisées. Les recherches futures viseront à améliorer les performances des transformateurs piézoélectriques en optimisant la conception et en utilisant des techniques de fabrication avancée.

Chapitre 3 :

Performances du transformateur piézoélectrique à base d'alliage à mémoire de forme

3 Performances du transformateur piézoélectrique à base d'AMF

3.1 Introduction

Les performances du transformateur piézoélectrique à base d'alliage à mémoire de forme sont remarquables à plusieurs égards. Tout d'abord, sa haute efficacité énergétique en fait une solution attrayante pour les applications nécessitant une conversion d'énergie efficace, comme les systèmes de gestion de l'énergie dans les véhicules électriques. De plus, sa compacité et sa légèreté en font un choix idéal pour les applications où l'espace et le poids sont des contraintes, telles que les dispositifs électroniques portables.

En outre, le transformateur piézoélectrique à base d'alliage à mémoire de forme présente une grande fiabilité. Grâce à l'utilisation de l'alliage à mémoire de forme, qui est un matériau résistant à la fatigue mécanique, ce type de transformateur peut fonctionner de manière stable et fiable pendant de longues périodes, sans dégradation significative de ses performances.

Dans ce chapitre nous allons étudier la modélisation d'un fil d'alliage à mémoire de forme et aussi la modélisation et les performances d'un transformateur piézoélectrique à base d'un AMF.

3.2 Modélisation d'un alliage à mémoire de forme

Le concept de l'effet bilame repose sur la courbure d'un empilement constitué de deux matériaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents. L'étude initiale de cet effet a été réalisée par S. Timoshenko [31], qui a analysé le comportement des bilames dans le contexte des thermostats. Un bilame, sous la forme d'une poutre, est fixé d'un côté et initialement plat (figure 3.1). Lorsque la température change, il adopte une forme d'arc de cercle. Le rayon de courbure de cette déformation est déterminé par l'expression suivante [31] :

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1+m)^2}{3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn})} \cdot \frac{T - T_0}{S} \quad (3.1)$$

Avec :

- R_T : rayon de courbure à la température cible T ,
- R_0 : rayon de courbure à la température de Référence T_0 ,
- $m = \frac{S_1}{S_2}$: rapport des épaisseurs des deux couches,
- $n = \frac{Y_1}{Y_2}$: rapport des modules de Young des deux couches,

- α_1, α_2 : coefficients de dilatation thermique (CDT). L'index 2 correspond à la couche à haute dilatation thermique, située en haut sur la figure 3.1

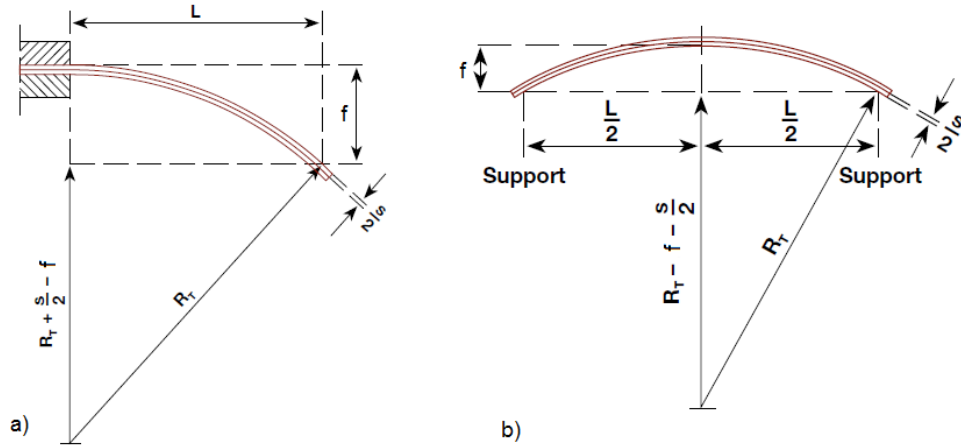


Figure 3. 1: Déformation d'un bilame sous forme de poutre soumise à une variation de température a : bilame encastré d'un côté ; b : bilame libre [31].

Dans le cas où le bilame est plat à la température de référence T_0 , et que les épaisseurs des couches, aussi bien que les modules de Young sont égaux, (3.1) peut être simplifiée vers :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \cdot \frac{T - T_0}{S} \tag{3.2}$$

Le rayon de courbure d'un bilame soumis à une variation de température est donc inversement proportionnel à la différence de CDT, et à la variation même. Ceci veut dire qu'une grande différence de CDT ou de température implique une forte déformation. Un bilame de faible épaisseur se déformera plus qu'un bilame épais. On définit la courbure spécifique du bilame :

$$K = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \tag{3.3}$$

La flèche, ou déplacement maximal sur sa longueur se calcule selon

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{s} \tag{3.4}$$

C'est une expression valable dans le cas où la flèche est inférieure à 10% de la longueur du bilame. Dans le cas où le déplacement du bilame est bloqué à son bout, il développe une force F calculée selon :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)ls^2}{4L} \tag{3.5}$$

Avec :

F_0 : force à la température de référence T_0 , égale le plus souvent à l'ambiante. La force est proportionnelle au rapport largeur sur longueur : l/L et au carré de l'épaisseur du bilame. Un bilame épais développe plus de force du fait de la raideur supérieure.

Un autre cas souvent rencontré en pratique est celui d'un bilame libre, ou simplement supporté (figure3.1b). Dans ce cas, la flèche se calcule selon :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{4s} \quad (3.6)$$

La flèche résultante est inférieure à celle d'une poutre encastree d'un côté de la même longueur. Ceci est dû au fait que le déplacement correspondant est pris au centre, plutôt qu'à une extrémité libre. Si une force est appliquée au centre du bilame de manière à limiter sa déformation, la flèche devient :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{4s} - \frac{(F - F_0)L^3}{4ls^3Y} \quad (3.7)$$

Avec :

F_0 : force à la température de référence T_0 .

Pour annuler la flèche, il faut appliquer une force égale à :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)ls^2}{L} \quad (3.8)$$

Un bilame libre développe une force maximale quatre fois supérieure à celle d'un bilame encastree d'un côté en raison de sa raideur accrue. Il mentionne également que le flambage peut se produire dans un bilame contraint aux extrémités, et une étude spécifique a été réalisée à ce sujet. Le bilame initial a une forme en arc de sinus avec une couche à haut coefficient de dilatation thermique en haut et une flèche orientée vers le bas. Lorsque chauffé, la couche à haute dilatation thermique tire le bilame vers le haut, le mettant en compression. À une certaine flèche instable (f_1), le bilame peut flamber et changer de direction, entraînant une flèche orientée vers le haut (f_2). Si le chauffage se poursuit, la flèche du bilame continue d'augmenter dans la même direction.

3.3 Transformateur piézoélectrique à base de l'alliage à mémoire de forme

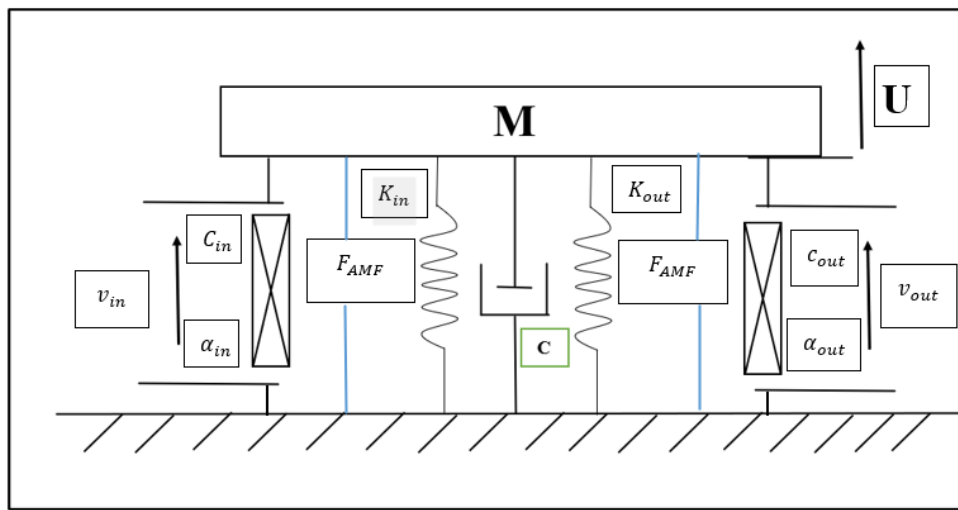


Figure 3. 2 : Transformateur piézoélectrique à base de l'alliage de mémoire de forme

Dans le but d'améliorer les performances de rendement d'un transformateur piézoélectrique on a ajouté une force d'un alliage de mémoire de forme (AMF) comme indique la figure ci-dessus, L'activation thermique de l'effet mémoire dans le fil AMF conduit à une variation de déformation, ce qui entraîne un changement de contrainte dans le fil. Cette variation de contrainte est responsable de l'augmentation de la force exercée sur le ressort, qui est liée à l'allongement du fil AMF.

Le système comporte deux cellules piézoélectriques, caractérisées par leur facteur de force α , leur capacité bloquée C_0 et leur raideur propre K . Le facteur de force α_{in} et la capacité bloquée C_{0in} et K_{in}^E sont spécifiques au primaire, tandis que α_{out} , C_{0out} et K_{out}^E sont propres au secondaire. L'exposant des raideurs indique que ces valeurs sont définies à champ constant ou en court-circuit.

Il est important de prendre en compte ces différents paramètres, notamment les facteurs de force, les capacités bloquées et les raideurs propres, afin de comprendre le comportement global du système. Ces paramètres influencent la réponse du système aux sollicitations mécaniques et électriques, et leur choix approprié est essentiel pour garantir un fonctionnement optimal du transformateur piézoélectrique.

La constante C , qui caractérise les pertes mécaniques, joue également un rôle important dans la performance globale du système. Elle peut être utilisée pour modéliser et prédire les pertes d'énergie et l'amortissement dans le transformateur piézoélectrique, ce qui permet de mieux comprendre les performances réelles du système et d'optimiser son rendement.

D'après ces études on a ajouté la force de l'alliage de mémoire de forme (F_{AMF}) dans les équations (2.7), (2.9) et (2.11) cette modification conduit finalement à reformuler le système des équations de sorte que :

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (F_{AMF} + K_{Ein} + K_{Eout})u = -\alpha_{in} \cdot V_{in} - \alpha_{out} \cdot V_{out} \quad (3.16)$$

$$-\omega^2 \cdot M \cdot u + (F_{AMF} + K_{Ein} + K_{Eout})u + j \cdot \omega \cdot C_{in} \cdot u = -\alpha_{in} \cdot V_{in} - \alpha_{out} \cdot V_{out} \quad (3.17)$$

$$V_{out} = -\frac{j \cdot \alpha_{out} \cdot R_L \cdot \omega}{1 + j \cdot \omega \cdot R_L \cdot C_{out}} u \quad (3.18)$$

$$-\omega^2 \cdot M \cdot u + (F_{AMF} + K_{Ein} + K_{Eout})u + j \cdot \omega \cdot C_M \cdot u = -\alpha_{in} \cdot V_{in} \quad (3.19)$$

Le rendement

$$\eta = \frac{F_{AMF} \cdot R \cdot \alpha_{out}^2}{(1 + (\omega \cdot R \cdot C_{out})^2) \cdot \left(C + \frac{\alpha_{out}^2 \cdot R}{1 + (\omega \cdot R \cdot C_{out})^2} \right)^2} \quad (3.20)$$

3.4 Simulation

3.4.1 Etude des changements de la force de l'alliage à mémoire de forme en fonction de la température

Nous utilisons l'équation (3.8) dans notre étude pour analyser comment la force d'un alliage à mémoire de forme évolue en fonction de la température. Cette analyse est effectuée en utilisant le logiciel MATLAB pour simuler les variations de température. Un alliage à mémoire de forme présente la capacité d'être facilement déformé dans des conditions martensitiques à basse température, puis de retrouver sa configuration initiale en chauffant dans la plage de températures correspondant à la transformation inverse. Ce phénomène, connu sous le nom de récupération gratuite, caractérise l'effet de mémoire de forme.

Caractéristiques d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF)

Tableau 3. 1: Caractéristique d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF) [32].

Symboles	Paramètre	Valeurs
L_0	Langueur initial	20×10^{-2}
Y	Module de Young	0.03×10^9
S	L'épaisseur de bilame	2×10^{-4}
α_1 :alpha 1	Coefficient de dilatation thermique(CDT)	2×10^{-4}
α_2 :alpha 2	Coefficient de dilatation thermique(CDT)	170×10^{-4}

F_0	Force à la température de référence T_0	0.01
L	Largeur	1×10^{-2}
T	Température	[0 120]

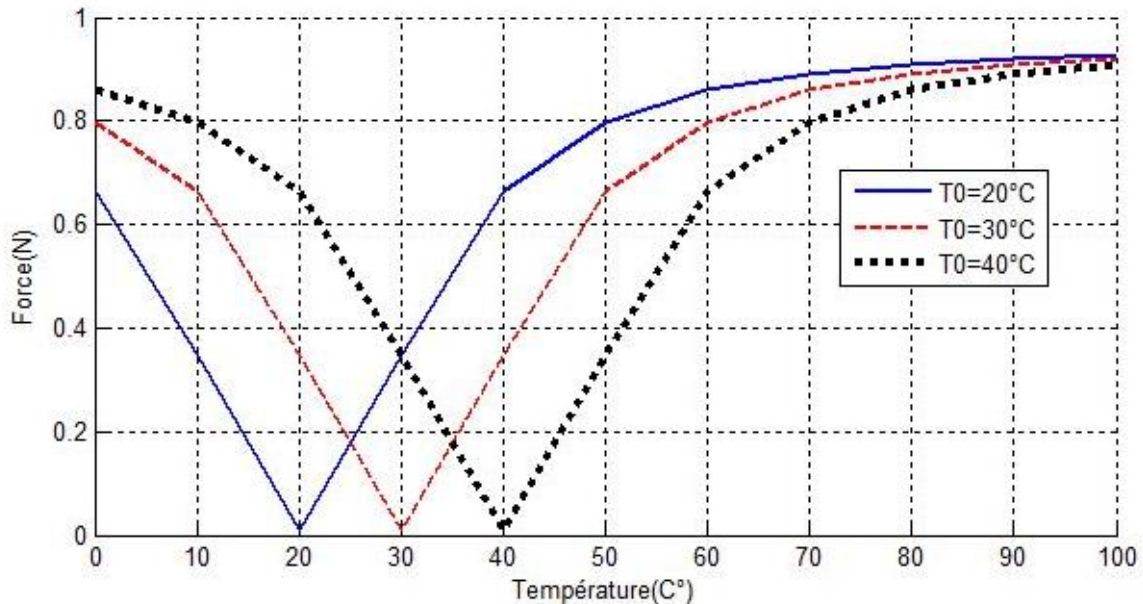


Figure 3. 3: Force d'alliage en fonction de la température.

Tableau 3. 2: Valeurs de la force maximale F en fonction de la température.

$T0(^{\circ}C)$	20	30	40
$T(^{\circ}C)$	100	100	100
F (N)	0.93	0.92	0.91

L'observation du tableau révèle les tendances suivantes pour la force de l'alliage à mémoire de forme à différentes températures de référence :

- À une température de référence de $T_0=20^{\circ}C$, la force de l'alliage augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum de 0.93N à une température de $T=100^{\circ}C$. Après cela, la force se stabilise à ce niveau.
- À une température de référence de $T_0=30^{\circ}C$, la force de l'alliage augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum de 0.92N à une température de $T=100^{\circ}C$. Ensuite, la force se stabilise à ce niveau.

- À une température de référence de $T_0=40^\circ\text{C}$, la force de l'alliage augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum de 0.91N à une température de $T=100^\circ\text{C}$. Par la suite, la force se stabilise à ce niveau.

Tableau 3. 3: Valeurs de la force F à $T=50^\circ\text{C}$.

$T(^\circ\text{C})$	50	50	50
$T_0(^\circ\text{C})$	20	30	40
F (N)	0.80	0.66	0.34

D'après le tableau3.3 nous constatons que la plus grande valeur de force pour l'alliage se produit à une température de 50°C , avec une valeur de 0.80N lorsque la température de référence est $T_0=20^\circ\text{C}$.

À $T_0=20^\circ\text{C}$, la valeur de la force de l'alliage est de 0.80N à 50°C et de 0.93N à 100°C . Par conséquent, nous pouvons conclure que la température a une influence sur la force de l'alliage.

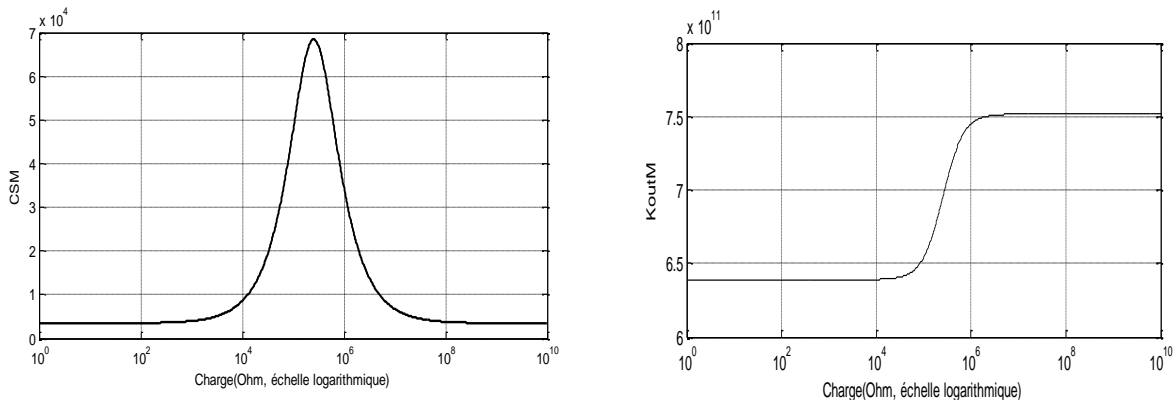
En conclusion, nous observons que plus la valeur de T_0 est petite, plus la force de l'alliage due à la dilatation est grande.

3.4.2 Performance de transformateur piézoélectrique sans alliage de mémoire de forme

Tableau 3. 4: Dimensions du transformateur piézoélectrique

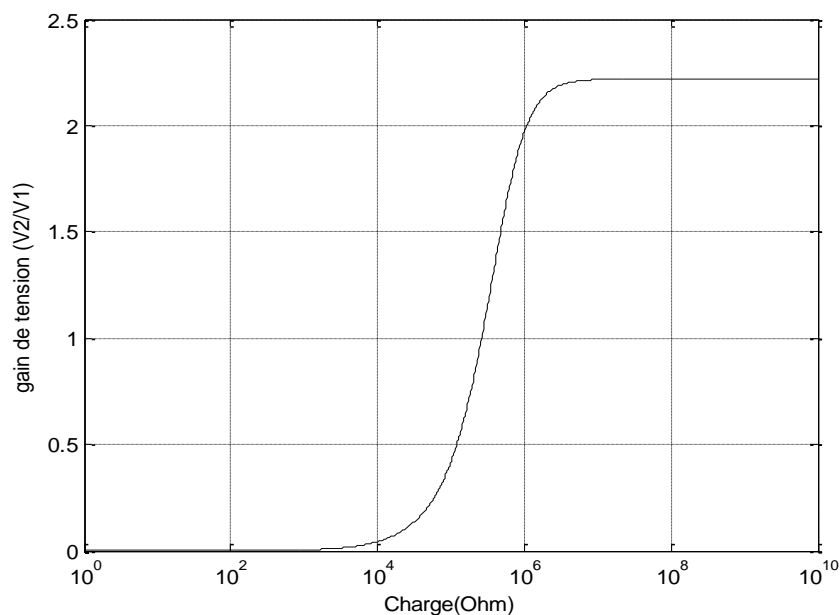
F	$67.4 \times 10^3 \text{ Hz}$
K_{out}	$0.1568 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$
K_{in}	$0.1568 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$
M	1g
α_{in}	28.034
α_{out}	0.3636
C_{in}	4.551×10^{-12}
C_{out}	4.551×10^{-12}
Q_m	360
K_{eff}	0.3875
v_{in}	1.8v

Pulsation de résonance en fonction de la charge

a) Tracé de C_M en fonction de la chargeb) Tracé de K_{outM} en fonction de la charge**Figure 3. 4 :** Tracé de C_M et K_{outM}

La figure (3.4) représente le traçage de raideur K_{outM} et le coefficient C_M en fonction de la charge, d'après cette figure nous allons voir que la pulsation de résonance en fonction de la charge d'un transformateur piézoélectrique parallèle est que la charge appliquée influence la rigidité du dispositif, ce qui à son tour affecte la pulsation de résonance. En ajustant la charge, il est possible de contrôler et d'optimiser la pulsation de résonance pour obtenir des performances maximales dans des applications spécifiques

L'influence de gain en fonction de la charge

**Figure 3. 5:** Le gain de tension en fonction de la charge

la figure (3.5) représente le traçe de gain de tension en fonction de la charge d'après cette figure nous avons voir que la courbe se divise en trois plages :

- Dans la plage de charge de 10^0 à 10^3 , il n'y a pas d'augmentation du gain. Cela suggère que le système ou le dispositif ne réagit pas de manière significative à ces niveaux de charge. Le gain reste constant ou ne change que très peu.
- Dans la plage de charge de 10^3 à 10^6 , le gain a commencer d'augmenter rapidement. Cela indique que le système ou le dispositif présente une réponse sensible et importante à ces niveaux de charge. L'amplification du signal est significative et augmente rapidement à mesure que la charge augmente.
- Dans la plage de charge plus de 10^6 , le gain stagne dans ça valeur maximale (2.3), Cela suggère que le système ou le dispositif est optimisé pour fonctionner avec des charges comprises dans cette plage. Au-delà de cette plage, le gain ne peut pas augmenter davantage et atteint un plateau, ce qui signifie que le dispositif a atteint sa limite de performance en termes d'amplification du signal.

La vitesse de vibration

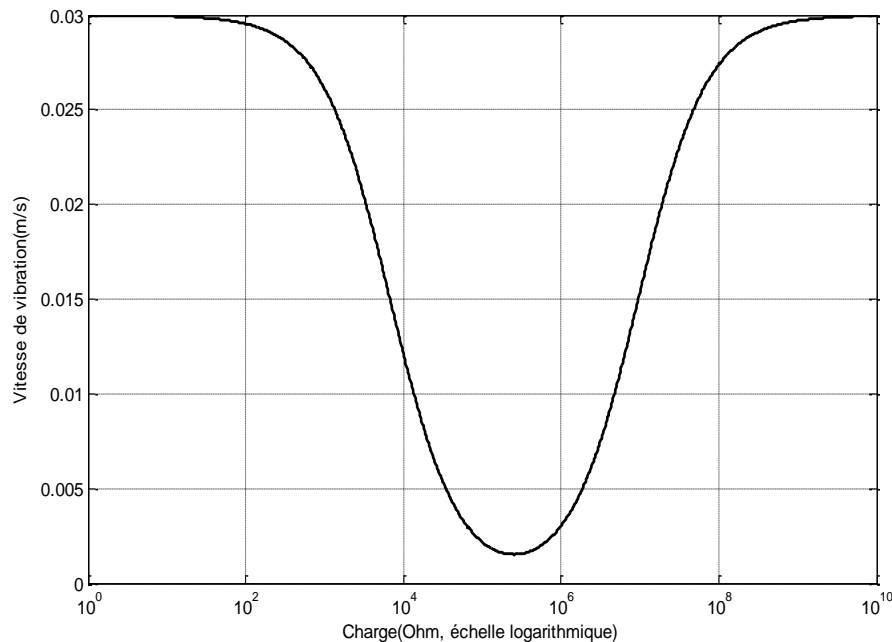


Figure 3. 6 : Vitesse de vibration en fonction de la charge

La figure (3.6) illustre le tracé de la vitesse de vibration en fonction de la charge d'après cette figure on remarque que :

- Lorsqu'une charge est connectée au transformateur, la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique induite par la charge a un effet d'amortissement sur le transformateur. Cela signifie que la présence de la charge réduit la vitesse de vibration du transformateur.
- L'effet de la charge sur la vitesse de vibration dépend de l'écart relatif entre les valeurs de capacité mécanique (C_M) pour les résistances de charge extrêmes ($R_L \rightarrow 0$ et $R_L \rightarrow \infty$) par rapport à la valeur maximale de C_M . Plus cet écart relatif est important, plus l'effet de la résistance de charge sur le transformateur est prononcé.
- Pour les valeurs extrêmes de résistance de charge, la valeur de C_M est égale à la valeur de capacité (C), qui est inversement proportionnelle au coefficient de qualité mécanique (Q_M). La valeur maximale de C_M est principalement déterminée par la valeur du coefficient de force (α_{out}). Dans tous les cas, l'écart relatif entre les valeurs minimales et maximales de C_M est faible, ce qui signifie que la charge a peu d'influence sur la vitesse de vibration du transformateur.

La puissance absorbée

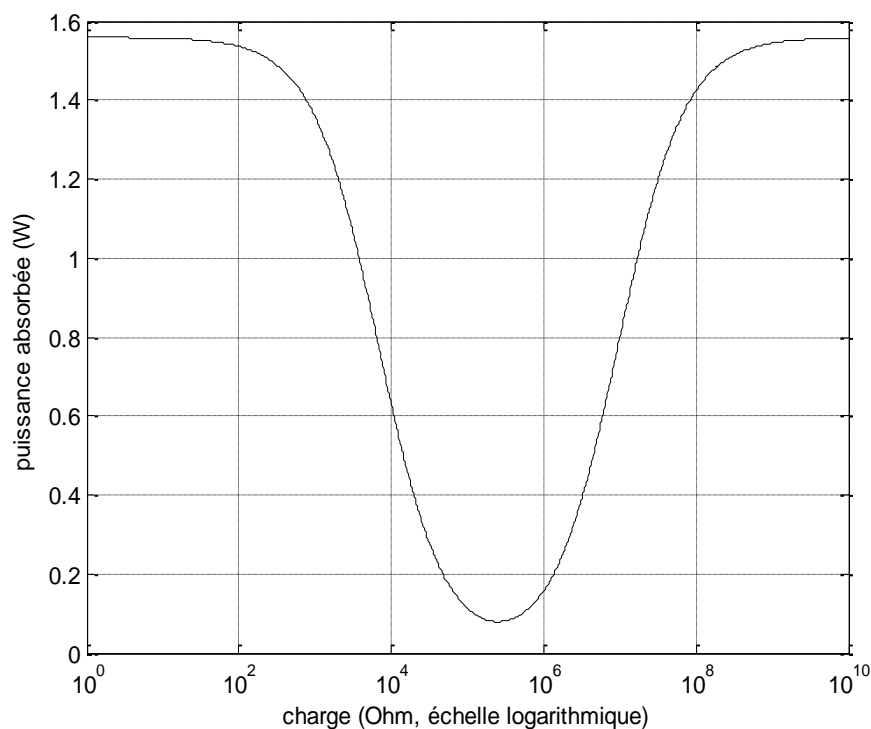


Figure 3. 7: Puissance absorbée en fonction de la charge

La figure (3.7) présente la relation entre la puissance absorbée par le transformateur et la charge appliquée cette figure suggère qu'il existe une corrélation entre la vitesse de vibration du

transformateur et la puissance absorbée. Le réglage de la résistance de charge pour minimiser les vibrations conduit à une consommation d'énergie minimale. Ainsi, le choix judicieux de la charge peut jouer un rôle crucial dans l'optimisation des performances et de l'efficacité du transformateur

La puissance transmise

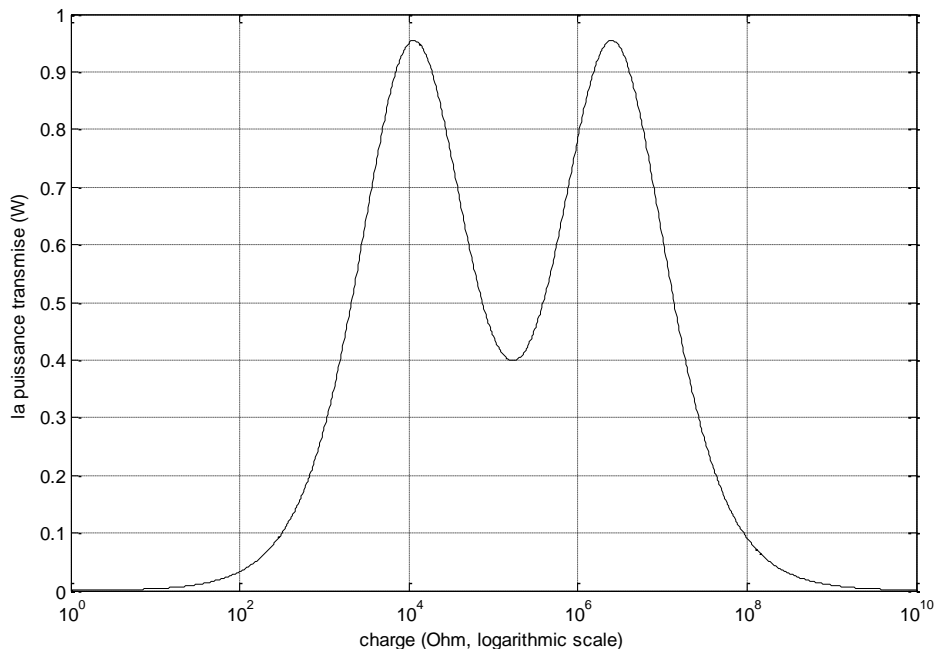


Figure 3. 8: Puissance transmise en fonction de la charge

La figure (3.8) représente la puissance transmise à la charge en fonction de la résistance de charge cette figure met en évidence la relation entre la puissance transmise à la charge et la résistance de charge. La courbe de puissance présente deux maximums et un minimum, qui sont déterminés par la variation de la capacité mécanique du transformateur. Le choix de la résistance de charge influence le transfert d'énergie et permet de trouver un point optimal où la puissance transmise est maximale.

Le rendement sans AMF :

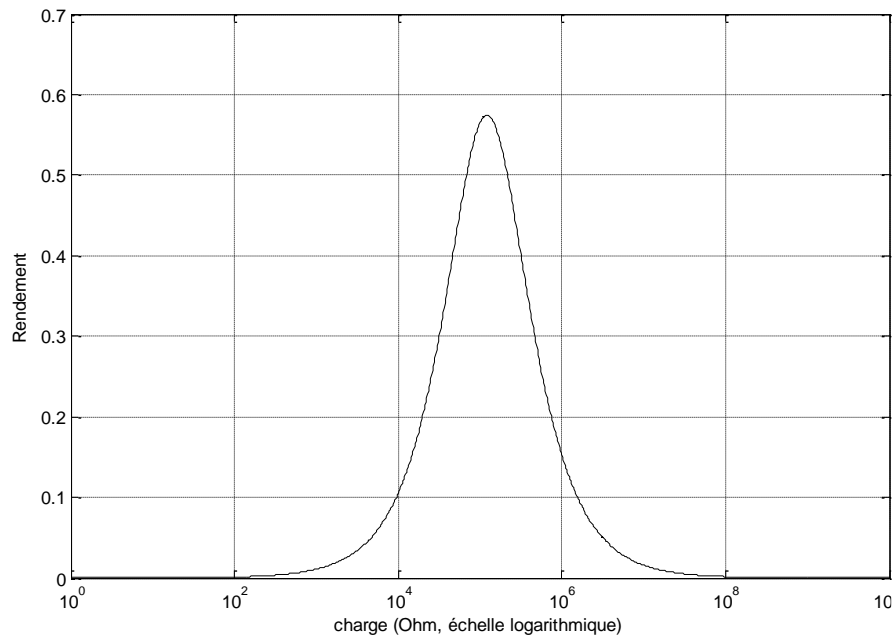


Figure 3. 9: Tracé de rendement sans AMF en fonction de la charge

La figure (3.9) représente le Tracé de rendement sans AMF en fonction de la charge. La principale observation de cette figure est que le rendement du système présente un seul maximum. Cela signifie qu'il existe une seule valeur de charge pour laquelle le système atteint son rendement optimal. En d'autres termes, la figure (3.9) indique qu'il existe une relation étroite entre la charge appliquée, le rendement du système et la vitesse de vibration de la structure. Lorsque la charge est réglée à la valeur correspondant au maximum de rendement, la structure atteint sa vitesse de vibration la plus basse.

3.4.3 Amélioration des performances de transformateur à base d'AMF

Le composite PZT-AMF combine les propriétés électro-élastiques du matériau piézoélectrique (PZT) avec la réponse thermique de l'AMF. Le matériau PZT est connu pour sa capacité à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique lorsqu'il est soumis à des contraintes ou des vibrations. En intégrant l'AMF dans le composite, nous pouvons exploiter les changements de température pour générer une déformation mécanique contrôlée.

Lorsque le composite PZT-AMF est soumis à des variations de température, le matériau AMF subit une transformation de phase, ce qui entraîne une déformation du composite. Cette déformation est captée par le matériau PZT, qui génère une charge électrique proportionnelle à la

déformation mécanique. Ainsi, l'énergie thermique disponible dans l'environnement peut être convertie en énergie électrique utilisable.

Cette approche présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de récupérer l'énergie thermique perdue dans divers systèmes et processus, offrant ainsi une solution d'énergie renouvelable et durable. De plus, le composite PZT-AMF peut être conçu pour s'adapter à différentes applications et environnements, ce qui le rend polyvalent.

Gain de tension on fonction de la charge

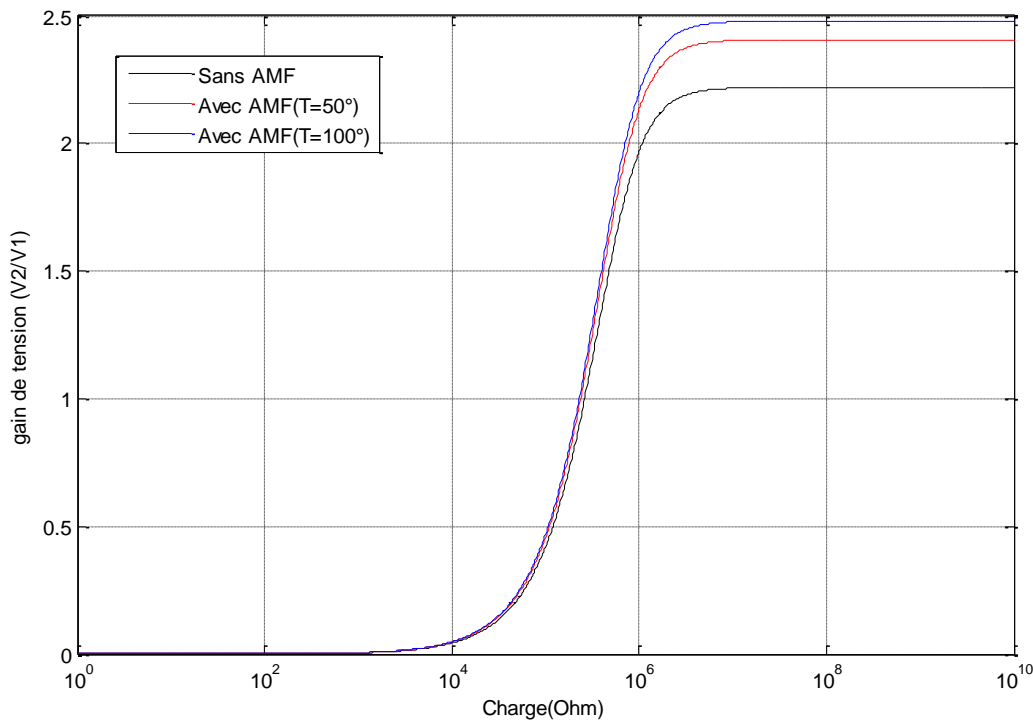


Figure 3. 10: Gain de tension en fonction de la charge

La figure (3.10) représente graphiquement la variation du gain de tension en fonction de la charge pour deux scénarios : sans alliage et avec alliage à deux températures différentes ($T = 50^{\circ}\text{C}$ et $T = 100^{\circ}\text{C}$).

On observe que pour le cas sans alliage, le gain de tension atteint une valeur maximale constante de 2.3, indépendamment de la charge appliquée. Cela suggère que le système sans alliage maintient un niveau de gain de tension élevé et constant, quelles que soient les fluctuations de la charge.

En revanche, pour le cas avec alliage à une température de $T = 50^{\circ}\text{C}$, le gain de tension atteint une valeur maximale constante de 2.4, également indépendamment de la charge. Cela indique

que l'ajout de l'alliage à cette température spécifique améliore légèrement le gain de tension par rapport au système sans alliage.

En augmentant la température à $T = 100^{\circ}\text{C}$, le gain de tension avec alliage atteint une valeur maximale constante de 2.5. Cela suggère que l'alliage est encore plus efficace pour augmenter le gain de tension à cette température plus élevée

Le rendement

La figure (3.11) représente le tracé du rendement d'un transformateur piézoélectrique avec et sans Alliage de Mémoire de Forme (AMF) cette figure suggère que l'utilisation de l'Alliage de Mémoire de Forme (AMF) dans le transformateur piézoélectrique a un impact significatif sur le rendement de celui-ci. Le rendement avec AMF de 78% est nettement supérieur à celui sans AMF de 58%, ce qui indique une amélioration considérable de l'efficacité énergétique lorsque l'AMF est utilisé.

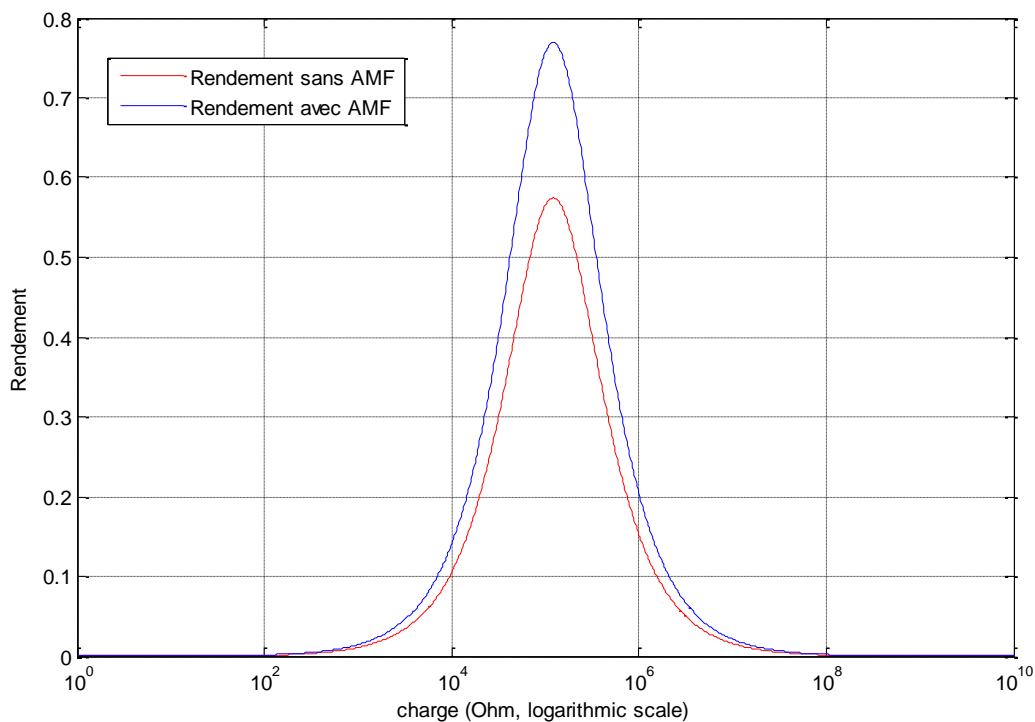


Figure 3. 11: Rendement avec et sans AMF en fonction de charge

3.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, le transformateur piézoélectrique offre des performances remarquables dans le domaine de la conversion d'énergie et de la transmission de puissance. Ses caractéristiques uniques lui confèrent des avantages significatifs par rapport aux transformateurs conventionnels. Une autre performance remarquable du transformateur piézoélectrique réside dans sa capacité à réduire les vibrations indésirables dans les structures. En ajustant la charge appliquée, il est possible de trouver une configuration optimale où le rendement est maximal et la vitesse de vibration de la structure est minimale, Cette fonctionnalité est précieuse dans les applications où la réduction des vibrations est essentielle pour assurer la fiabilité, la durabilité et le bon fonctionnement du système.

En conclusion, l'ajout d'un alliage à mémoire de forme aux transformateurs piézoélectriques offre de réelles opportunités pour améliorer leurs performances et élargir leur champ d'application. Cette combinaison de matériaux intelligents permet de créer des transformateurs plus efficaces, économes en énergie et adaptés aux exigences croissantes de l'industrie. Les recherches futures dans ce domaine promettent de repousser les limites des performances des transformateurs piézoélectriques avec l'intégration de l'AMF, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles avancées technologiques

Conclusion générale

Conclusion

Au terme de ce mémoire consacré au développement et à la modélisation des micro-transformateurs, nous pouvons affirmer que ces dispositifs jouent un rôle crucial dans la miniaturisation et l'efficacité énergétique des systèmes électroniques. Les avancées réalisées dans ce domaine offrent de nombreuses opportunités pour répondre aux besoins croissants de l'industrie des technologies de l'information et de la communication, ainsi que d'autres domaines d'application tels que l'électronique portable, les capteurs intelligents et les dispositifs médicaux.

Dans ce mémoire, nous avons abordé trois aspects essentiels des micro-transformateurs. Tout d'abord, nous avons exploré les matériaux intelligents, tels que les matériaux piézoélectriques et les alliages à mémoire de forme, qui sont fondamentaux pour la conception et les performances de ces transformateurs miniaturisés. Leur utilisation permet d'obtenir des propriétés électromécaniques remarquables, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications innovantes.

Ensuite, nous avons examiné le principe de fonctionnement des transformateurs piézoélectriques, en identifiant leurs avantages et leurs inconvénients. Nous avons souligné leur capacité à atteindre des densités de puissance plus élevées que les transformateurs magnétiques traditionnels, tout en mettant en évidence les contraintes liées à la déformation maximale admissible par les matériaux constituant ces transformateurs.

Enfin, nous avons étudié la modélisation des micro-transformateurs, en nous concentrant sur la modélisation d'un fil d'alliage à mémoire de forme et sur l'amélioration des performances du système en exploitant les techniques développées pour ce type de structure. Ces modèles de simulation avancés sont essentiels pour prédire le comportement du micro-transformateur, optimiser ses performances et guider les futures recherches dans ce domaine.

En conclusion, les micro-transformateurs jouent un rôle essentiel dans la conception de systèmes électroniques compacts et efficaces sur le plan énergétique. Leur développement et leur modélisation continue sont indispensables pour répondre aux exigences croissantes de l'industrie et de la société. Les résultats obtenus dans ce mémoire serviront de base solide pour de futures recherches et innovations visant à améliorer les performances des micro-transformateurs et à exploiter pleinement leur potentiel dans divers domaines d'application.

Les références bibliographiques

- [1] : curie, P. and curie. “ Développement par pression de l’électricité polaire dans les cristaux hémicédres à faces inclinées”. Bulletin de la société minéralogique de France, (1880). 3,90-93.
- [2] : curie, P. and curie. Sur un nouveau genre de phénomènes mécanique : “ la piézoélectricité réversible”. Journal de physique, (1917). 6(1),70-76.
- [3]: Jaffe, B, cook, W. R, and jaffe, H. “piezoelectric ceramics”. Academic press. (1971).
- [4]: Newnham, R.E, skinner, D.P, and cross, L.E. (1969).
- [5] : <https://spseriengabriel.wixsite.com/footenergie/blank-1>
- [6] :M. Domenjoud, “ caractérisation des propriétés électroacoustiques de structures piézoélectriques soumises à une contrainte statique de type électrique ou mécanique ”, thèse de doctorat, université François Rabelais de tours, France (2012).
- [7]: R.k pandey. “Fundamentals of electroceramics: materials, devices, and applications”
- [8]: G. Feld, E. Labouré, E. Hoang, B. Revol. “ mesure de la déformation d’un matériaux piézoélectrique par interférométrie ” École normale supérieure de Cachan, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan.
- [9]: Corina govaci,Aurel Gontean “ Piezoelectric Energy Harvesting Solutions”: Applied Electronics Department, Politehnica University Timisoara, 300006 Timisoara, Romania *Sensors* 2020, 20(12), 3512; <https://doi.org/10.3390/s20123512>
- [10] : Bio-piezoelectricity: “fundamentals and applications in tissue engineering and regenerative medicine” *.Biophys Rev.* 2022 Jun; 14(3): 717–733 doi: [10.1007/s12551-022-00969-z](https://doi.org/10.1007/s12551-022-00969-z).
- [11]: B. Chandra Sekhar, B. Dhanalakshmi, B. Srinivasa Rao, S. Ramesh, K. Venkata Prasad, P.S.V. Subba Rao and B. Parvatheeswara Rao. “Piezoelectricity and Its Applications” Submitted: October 9th, 2020 Reviewed: January 22nd, 2021 Published: September 8th, 2021 DOI: [10.5772/intechopen.96154](https://doi.org/10.5772/intechopen.96154)
- [12]: S. Singh, D.A. Draegest and J.E. Geusic, *Phys. Rev. B* (1970)2709. <https://doi.org/10.1063/1.4858400>
- [13]: Francois Vignon “Focalisation d'ultrasons par retournement temporel et filtre inverse, application à l'échographie transcrânienne”. septembre 2005.
- [14] : La technologie HP PageWide réinvente le jet d’encre. www.zednet.fr, janvier2014.
- [15]: Cécile Fizanne-MichelTM “Les alliages à mémoire de forme, une nouvelle famille de matériaux” Publié le 20 juin 2022
- [16]: A. M. Nicolson, “ Piezo-electric crystal transformer” US1829234A, 25-Jan-1927, <https://patents.google.com/patent/US1829234>.
- [17] : C. Rosen, “Analysis And Design Of Ceramic Transformers And Filter Elements”, Syracuse University, 1956, https://surface.syr.edu/eecs_etd/286.

- [18] : Kawashima et al., “Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter”, in Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium ULTSYM-94, 1994, pp. 525–530 vol.1, <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.1994.401643>.
- [19] : Sasaki Y, Yamamoto M, Ochi A, Inoue T, Takahashi S (1999) Jpn J Appl Phys Part 1 38:5598
- [20] :Aida Cherif. Thèse “ Optimisation du transformateur piézoélectrique ”.Application : contrôle semi-passive des vibrations.17 Octobre 2012. UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF UFAS ALGERIE.
- [21] :S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue S . “Hirose. Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer” and its Application to HighVoltage Power Inverter. IEEE Ultrasonics Symposium. (1994). P 525-530.
- [22]: Zhang, J., et al. "Design and Fabrication of a High-Efficiency Piezoelectric Transformer Using a Double-Mode Coupling Method." IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (2021).
- [23]: Kim, J., et al. "Development of a miniaturized piezoelectric transformer for low-power AC-DC converters." Journal of Power Electronics 21.4 (2021): 781-790.
- [24]: Yang, Y., et al. "Evaluation of a piezoelectric transformer for high-frequency, low-voltage DC-DC converters." IEEE Transactions on Power Electronics 36.6 (2021): 6662-6670
- [25]: Zou, X., et al. "A high-frequency piezoelectric transformer with a high voltage gain." IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 67.8 (2020): 1549-1557.
- [26]: Kim, D., et al. "Effect of the electrode structure on the performance of a piezoelectric transformer." Journal of the Korean Physical Society 76.1 (2020): 18-22
- [27] : Kim, Y., et al. "Robustness of piezoelectric transformers under shock and vibration." Smart Materials and Structures 30.1 (2021): 015003.
- [28]: Thomas Martinez Thèse “étude d’un transformateur piézoélectrique à onde progressive et son application à la conversion de puissance”.10 Octobre 2019 à Cachan.
- [29]: A. V. Carazo, “Multilayer piezoelectric transformer”, US6614144B2, 04-Oct-2001, <https://patents.google.com/patent/US6614144B2/es>.
- [30] : Christophe Magnet thèse “traitement non-linéaire de la tension de sortie d’élément piézoélectrique et son application aux transformateur piézoélectrique et au controle de vibration de cartes électroniques”.16 novembre 2006 à INSA de Lyon.
- [31] : Medjane Elaid. Saoud Ibrahim. “ L’optimisation des structures intelligente pour la récupération d’énergie vibratoire”Septembre2019