

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

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

*Faculté des Sciences et de la technologie*

**Département d'Electromécanique**

# ***Mémoire***

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande électrique**

Par

- **Mazit younes**
- **Benzaaza rimi**

*Intitulé*

***Amélioration des performances de micro-transformateur à base  
d'un alliage à mémoire de forme***

*Soutenu le : 25/06/2022*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Aouabed Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Chérif Aida</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Zaher Djamilia</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Amara Badria</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*

## *Dédicace*

C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Sans eux, je n'aurais certainement pas fait d'études supérieures. Ce projet de fin d'étude, représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de ma scolarité. Qu'ils en soient remerciés par cette trop modeste dédicace.

Je dédie aussi ce travail :

À mon frère : Said et ma sœur Hanan.

À mon chère binôme Benzaaza Rimi.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

*Mazit younes.*

## *Dédicace*

Je tien remercies le ALLAH unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie,

Je dédie ce modeste travail

À la mémoire de mon père que Dieu tout puissant l'accueille dans son vaste paradis.

À ma mère ! La lumière de mes jours, la flamme de mon bonheur que Dieu protège pour nous.

À mon frère : Messaoud Benzaaza

À mon chère binôme : Mazit Younes

À tous ceux qui m'aiment.

*Benzaaza Rimi*

## *Remerciements*

Nous tenons remercier tout premièrement DIEU le tout puissant pour la volonté, la sante et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Pr. AIDA CHERIF** pour avoir d'abord propose ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près de loin accomplir ce travail.

Nos remerciements le chef département d électromécanique qui ont contribué à notre formation, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.

# Liste des tableaux

## Chapitre 01

<b>Tableau 1.1:</b> Applications des matériaux Piézoélectriques en fonction de l'effet.....	21
<b>Tableau 1.2:</b> Constantes physiques de matériaux piézoélectriques.....	22
<b>Tableau 1.3:</b> Equation de la piézoélectricité.....	23
<b>Tableau 1.4:</b> Grandeurs des équations d'état de la piézoélectricité.....	24
<b>Tableau 1.5:</b> Coefficient de couplage électromécanique associé à chaque mode.....	25

## Chapitre 03

<b>Tableau 3.1:</b> Paramètres de simulation d'alliage de mémoire de forme (AMF).....	44
<b>Tableau 3.2:</b> Valeurs de la force $F$ en fonction de la température.....	45
<b>Tableau 3.3:</b> Dimensions du transformateur piézoélectrique.....	45

# Liste des figures

## Chapitre 01

<b>Figure 1.1</b> : Diagramme de phase simplifiée.....	6
<b>Figure 1.2</b> : Structure atomique de l'austénite et de la martensite.....	7
<b>Figure 1.3</b> : Cycle thermomécanique typique d'un alliage a mémoire de forme.....	7
<b>Figure 1.4</b> : Effet super élastique d'un alliage à mémoire de forme.....	9
<b>Figure 1.5</b> : Télescope Hubble lancé en avril 1990.....	10
<b>Figure 1.6</b> : Satellite Clémentine lancé le 25 janvier 1994.....	10
<b>Figure 1.7</b> : Couplage thermomécanique.....	11
<b>Figure 1.8</b> : Micro actuateur pour la robotique.....	11
<b>Figure 1.9</b> : Lunette avec monture super élastique.....	12
<b>Figure 1.10</b> : Stent cardiovasculaire comprimé après relâché.....	12
<b>Figure 1.11</b> : Valve cardiaque.....	13
<b>Figure 1.12</b> : Broche d'orthodontie.....	13
<b>Figure 1.13</b> : L'effet piézoélectrique.....	16
<b>Figure 1.14</b> : Structure du PVDF.....	16
<b>Figure 1.15 (a)</b> : Céramique.....	17
<b>Figure 1.15 (b)</b> : Quartz.....	18
<b>Figure 1.16</b> : Cristal possédant un centre de symétrie .....	18
<b>Figure 1.17</b> : Cristal ne possédant pas de centre de symétrie, le barycentre des charges Déplace, créant une polarisation $P_o$ .....	19
<b>Figure 1.18</b> : Organigramme des classes cristallines.....	20

<b>Figure 1.19</b> : Principaux modes de déformation selon les dimensions des échantillons et la direction de la polarisation.....	24
--	----

## Chapitre 02

<b>Figure 2.1</b> : Transformateur électromagnétique conventionnel.....	29
<b>Figure 2.2</b> : Principe du transformateur piézoélectrique.....	29
<b>Figure 2.3</b> : Transformateur piézoélectrique de type Rosen.....	31
<b>Figure 2.4</b> : Transformateur en mode transverse.....	31
<b>Figure 2.5</b> : Transformateur en mode épaisseur avec primaire en multicouches.....	32
<b>Figure 2.6</b> : Transformateur en mode radial.....	33
<b>Figure 2.7</b> : Transformateur Transenne multicouches en mode radial.....	33
<b>Figure 2.8</b> : raideur.....	34
<b>Figure 2.9</b> : capacité.....	34
<b>Figure 2.10</b> : convertisseur électromécanique.....	35
<b>Figure 2.11</b> : Modèle de transformateur radial.....	35

## Chapitre 03

<b>Figure 3.1</b> : Modèle analogique constitué d'un fil AMF en série avec un ressort linéaire.....	39
<b>Figure 3.2</b> : Mise en traction du fil AMF (initialement austénitique) pour le transformer partiellement en martensite .....	40
<b>Figure 3.3</b> : Déformation d'un bilame sous forme de poutres ou mis à une variation de température : a) bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre.....	41
<b>Figure 3.4</b> : Transformateur piézoélectrique à base de mémoire de forme de l'alliage.....	43
<b>Figure 3.5</b> : Force d'alliage en fonction de la température ( $T_0=30\text{ °C}$ ).....	45
<b>Figure 3.6</b> : Tracé de $K_{outM}$ en fonction de la charge.....	46
<b>Figure 3.7</b> : Tracé $C_M$ en fonction de la charge.....	47

<b>Figure 3.8:</b> Gain de tension en fonction de la charge.....	48
<b>Figure 3.9:</b> Puissance transmise à la charge en fonction de la charge.....	49
<b>Figure 3.10:</b> Rendement du transformateur en fonction de la charge.....	50
<b>Figure 3.11:</b> Tension de sortie en fonction de la charge ( $T_0=30^\circ\text{C}$ ).....	51
<b>Figure 3.12:</b> Variation de gain de tension en fonction de la charge ( $T_0=30^\circ\text{C}$ ).....	52

# Abréviations et symboles

## Liste des abréviations

### Abréviations :

Symboles	Signification
AMF	Alliages à Mémoire de Forme
Ti-Ni	Titane-Nickel
Cu-Zn-Al	Cuivre-Zinc-Aluminium
Cu-Al-Ni	Cuivre- Aluminium- Nickel
Cu-Al-Be	Cuivre- Aluminium-baryum
BaTiO <sub>3</sub>	Le Titane de Baryum
SiO <sub>2</sub>	Dioxyde de silicium
PZT	Titanate Zirconate de Plomb
MF	Martensite finish
MS	Martensite start
AS	Austénite start
AF	Austénite finish

### Nomenclature :

Symboles	Grandeurs
S	La déformation mécanique
D	Le déplacement (Induction) électrique
T	La contrainte mécanique
E	Le champ électrique
P	la polarisation
s	la souplesse
d	La constante de charge
g	La constante de tension
L	Longueur
$Q_m$	Facteur de qualité mécanique
$C_0$	Capacité bloquée
$C_m$	La capacité mécanique
F	la force appliquée
$K_{out}$	Rigidité primaire
$K_{in}$	Rigidité secondaire
M	Masse dynamique
$C_{in}$	Capacité du primaire
$C_{out}$	Capacité du secondaire
$k_{eff}$	Coefficient de couplage
$\alpha_{in}$	Coefficient de conversion électromécanique primaire
$\alpha_{out}$	Coefficient de conversion électromécanique secondaire
$L_0$	Longueur initiale

Y	Modules de Young
S	L'épaisseur du bilame
Alpha 1	Coefficients de dilatation thermique (CDT)
Alpha 2	Coefficients de dilatation thermique (CDT)
$F_0$	Force à la température de référence $T_0$
T	Températures
V	Tension électrique
k	Raideur
u	Le déplacement
f	Fréquence

## Résumé

La miniaturisation des circuits logiques par intégration à très grande échelle est un des exemples les plus connus. Avec donc le développement de la microélectronique, la demande de transformateurs de tension miniaturisés est plus grande avec la multiplication des équipements portables. En plus de son avantage d'être intégré avec l'électronique qu'il alimente, le transformateur piézoélectrique présente 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 clé : transformateur piézoélectrique, rendement, tension de sortie, alliage à mémoire de Forme (AMF).**

## موجز

يعد تصغير الدوائر المنطقية عن طريق تكامل واسع النطاق أحد أفضل الأمثلة المعروفة. لذلك مع تطور الإلكترونيات الدقيقة ، يكون الطلب على محولات الجهد المصغرة أكبر مع تكاثر المعدات المحمولة. بالإضافة إلى ميزة تكامله مع الإلكترونيات التي يوفرها ، فإن المحول الكهرضغطية له العديد من المزايا ، مقارنة بالمحول التقليدي مثل: حجم صغير جدًا ، ضوء ، بدون مجال مغناطيسي. تحقق المحولات الكهروإجهادية كثافة طاقة أكبر من نظيراتها المغناطيسية. ومع ذلك ، فإن أحد العوامل الرئيسية التي تحد من كثافة القدرة هو الحد الأقصى للتشوه المسموح به بواسطة المادة المكونة للمحول. تسخين المحولات الكهروإجهادية هو في الأساس من أصل ميكانيكي. يؤدي هذا التسخين إلى تدهور الخصائص. في هذا العمل ، نستكشف طريقة لتحسين هذه السلوكيات والتي تتمثل في إضافة سبيكة ذاكرة للشكل مع عنصر كهرضغطية لزيادة الجهد الناتج عن المرحلة الثانوية وذلك لزيادة قوة التحويل الميكانيكي والكهربائي.

**الكلمات الرئيسية: محول كهرضغطية، المرود، جهد إخراج، سبيكة ذاكرة الشكل**

## Abstract

The miniaturization of logic circuits by very large scale integration is one of the best known examples. With therefore the development of microelectronics, the demand for miniaturized voltage transformers is greater with the multiplication of portable equipment. In addition to its advantage of being integrated with the electronics it supplies, the piezoelectric transformer has several advantages, compared to the conventional transformer such as: very small size, light, without magnetic field. Piezoelectric transformers achieve greater power densities than their magnetic counterparts. However, one of the main factors limiting the power density is the maximum admissible deformation by the material constituting the transformer. The heating of piezoelectric transformers is mainly of mechanical origin. This heating leads to a degradation of the characteristics. In this work, we explore a way to improve these behaviors which consists in adding a shape memory alloy with the piezoelectric element to increase the voltage generated by the secondary so as to increase the power of mechanical-electrical conversion.

**Keywords : piezoelectric transformer, output, output voltage, shape memory alloy (AMF).**

## Table des matières

Dédicace .....	XI ,
	XIXI
Remerciements.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures .....	V, VI, VII
Liste des abréviations .....	VIII, IX
Résumés .....	X

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### Chapitre 01 : Généralités sur les matériaux piézoélectriques

1.1. Introduction .....	4
1.2. Définition des matériaux intelligents .....	4
1.3 Les Alliages à Mémoire de Forme.....	5
▪ 1.3.1. Définition.....	5
▪ 1.3.2. Famille d'alliage.....	5
▪ 1.3.3. Notions de base.....	5
▪ 1.3.4. Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme.....	7
▪ 1.3.5. Effet mémoire de forme.....	8
▪ 1.3.5.1. Effet mémoire double sens.....	8
▪ 1.3.5.2. Effet super élastique.....	8
▪ 1.3.5.3. Effet amortissant.....	9
▪ 1.3.6. Les applications des AMF.....	9
▪ 1.3.6.1. Secteur aérospatial.....	10
▪ 1.3.6.2. Secteur industriel.....	11
▪ 1.3.6.3. Secteur industriel.....	12

1.4. Les matériaux magnétostrictifs.....	13
▪ 1.4.1. Définition.....	13
▪ 1.4.2. Historique .....	13
▪ 1.4.3. Principaux Phénomènes de Magnétostriction .....	14
▪ 1.4.4. Application .....	14
a) Capteur magnétostrictif.....	14
b) Les actionneurs.....	14
c) Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques.....	14
1.5. Les matériaux piézoélectriques.....	15
• 1.5.1. Définition de la piézoélectricité.....	15
• 1.5.2. D'effet piézoélectrique.....	15
• 1.5.3. Types des matériaux piézoélectriques .....	16
• 1.5.3.1. Polymères piézoélectriques.....	16
• 1.5.3.2. Céramiques massives.....	17
• 1.5.3.3. Les cristaux : Quartz et Niobates de Lithium.....	17
• 1.5.4. Symétrie et piézoélectricité .....	18
• 1.5.5. Domaines d'application des matériaux piézoélectriques.....	21
• 1.5.6. Choix du matériau piézoélectrique.....	21
• 1.5.7. Equations constitutives de la piézoélectricité.....	22
• 1.5.8. Mode de vibration.....	24
• 1.5.9 Coefficients de couplage .....	25
• 1.5.10. Facteur de qualité .....	25
1.6. Conclusion .....	26

## **Chapitre 02 : Etat de l'art de transformateur piézoélectrique**

2.1. Introduction .....	28
2.2. Historique .....	28
2.3. Principe du transformateur piézoélectrique.....	28
2.4. Avantages et inconvénients des transformateurs piézoélectriques.....	30

2.5. Principales structures de transformateurs piézoélectriques.....	30
▪ 2.5.1 Transformateur Rosen (effets couplés).....	30
▪ 2.5.2 Transformateur en mode transverse .....	31
▪ 2.5.3 Transformateur épaisseur (multicouches) .....	31
▪ 2.5.4 Transformateur en mode radial .....	32
▪ 2.5.5 Transformateurs multicouches en mode radial .....	33
2.6. Modélisation du transformateur piézoélectrique en mode radial.....	34
▪ 2.6.1. Modélisation des éléments piézoélectriques.....	34
▪ 2.6.2. Les équations différentielles .....	35
▪ 2.6.3. Les équations dans le domaine fréquentiel .....	36
2.7. Conclusion .....	37

### **Chapitre 03 : Amélioration des performances de transformateur à base d'AMF.**

3.1 Introduction .....	39
3.2 Modèle constitué d'un fil AMF en série avec un ressort .....	39
3.3 Modélisation analytique de l'effet bilame .....	40
3.4 Linéarisation de modèle mathématique de système .....	43
3.5 Transformateur piézoélectrique à base de mémoire de forme de l'alliage .....	43
3.6 Simulation .....	44
▪ 3.6.1 La force d'alliage à mémoire de forme en fonction de température.....	44
▪ 3.6.2 Performances de transformateur piézoélectrique sans l'alliage de forme .....	45
▪ 3.6.2.1. Pulsation de résonance en fonction de la charge .....	46
▪ 3.6.2.2. L'influence de la charge sur le gain .....	47
▪ 3.6.2.3. Puissance transmise .....	48
▪ 3.6.2.4. Rendement .....	49
▪ 3.6.3 Amélioration des performances de transformateur à base d'AMF .....	50
▪ 3.6.3.1. Tension de sortie en fonction de la charge.....	51
▪ 3.6.3.2. Gain de tension on fonction de la charge .....	52

3.7 Conclusion .....	52
----------------------	----

# **Introduction générale**

# Introduction Générale

Les premiers travaux sur les transformateurs piézoélectriques ont été menés dans les années 1950 par Charles Rosen, qui a mis au point les transformateurs qui portent son nom, mais ils ne se sont multipliés que dans les années 1990. A ces avantages s'ajoutent leur facteur de qualité mécanique élevé et leur rayonnement électromagnétique nul. En conséquence, de nombreuses nouvelles structures ont été développées et brevetées au cours de cette décennie.

La miniaturisation des circuits logiques par intégration à très grande échelle est un des exemples les plus connus. Avec donc le développement de la microélectronique, la demande de transformateurs de tension miniaturisés est plus grande avec la multiplication des équipements portables. 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. Cet échauffement engendre une dégradation des caractéristiques.

Cette mémoire se composera de trois chapitres : le premier chapitre introductif vise à généralités sur les matériaux intelligents, ce chapitre présentera les nouveaux matériaux intelligents et leur domaine d'application, avec une présentation générale sur le phénomène de la piézoélectricité, effet piézoélectrique, les classes, les matériaux piézoélectriques, caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme et leur effet.

Dans le deuxième chapitre nous avons donné un rappelle sur les transformateurs piézoélectriques, état de l'art de ce transformateur, leur principe de fonctionnement est les structures classiques.

Pour le troisième chapitre on définit la technique utilisée pour modéliser le transformateur étudié qui repose sur la définition d'un schéma de Mason en commence ce chapitre par une modalisation d'un piézoélectrique vibrant en mode radial après ça, nous avons présente l'amélioration des performances du système avec une base d'alliage à mémoire de forme, en exploitant les techniques développées et les adapter pour ce type de structures. Nous donnerons à la fin de cette mémoire quelques pistes de développement et d'optimisation et nous terminerons par une conclusion et les perspectives.

# **Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux intelligents**

## **1.1 Introduction**

Les Matériaux intelligents ou également connus sous le nom de matériaux adaptatifs, qui comprennent : matériaux piézoélectriques, matériaux électrostrictifs, matériaux magnétostrictifs, alliages à mémoire de forme, qui modifient leurs propriétés physiques telles que la rigidité ou viscosité en fonction des excitations externes (par exemple contrainte mécanique, champ) changements électriques et magnétiques ou de température. Chaque matériau a selon le domaine d'utilisation requis, différentes qualités sont mises à profit.

## **1.2 Définition des matériaux intelligents**

Les matériaux intelligents ou "smart matériels" sont de plus en plus sujets de recherche dans de nombreux domaines scientifiques. Elles sont innovantes et permettent le développement de technologies dans des domaines très divers tels que l'informatique, la robotique et le médical. Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Il s'oppose au matériau classique, inerte par définition, car ses caractéristiques restent toujours les mêmes quelques soient les sollicitations auxquelles ce matériau est soumis. Il possède des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations). Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques, notamment sa forme, sa connectivité, sa viscosité ou sa couleur, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées. Celles-ci peuvent venir de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau : variations de température, de contraintes mécaniques, de champs électriques ou magnétiques. Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction. Il devient ainsi possible de détecter des faiblesses de structure dans le revêtement d'un avion, des fissures apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton. Les différents matériaux intelligents sont divisés en trois catégories qui connaissent de nombreuses applications dans des secteurs divers : les Alliages à Mémoire de Forme (AMF), les matériaux piézoélectriques, et magnétostrictifs.

[1]

### **1.3 Alliages à Mémoire de Forme (AMF)**

#### **1.3.1 Définition**

Les alliages à mémoire de forme sont souvent appelés AMF (SMA en anglais signifie Shape Memory Alloy). Aujourd'hui, ils sont de plus en plus connus et utilisés. Au cours des dernières décennies, diverses applications ont vu le jour dans divers domaines tels que la biomédecine, l'aérospatiale, la robotique, etc. Dans tous ces domaines d'application, les SMA sont utilisés pour leurs propriétés de mémoire de forme, leurs propriétés super-élastiques ou leurs effets d'amortissement. Bien qu'ils soient de plus en plus connus et utilisés, ils restent chers par rapport à d'autres matériaux plus courants. D'autre part, dans certains cas, ils peuvent être économiquement rentables car des appareils très complexes peuvent être remplacés par de simples appareils SMA [2].

#### **1.3.2 Famille d'alliage**

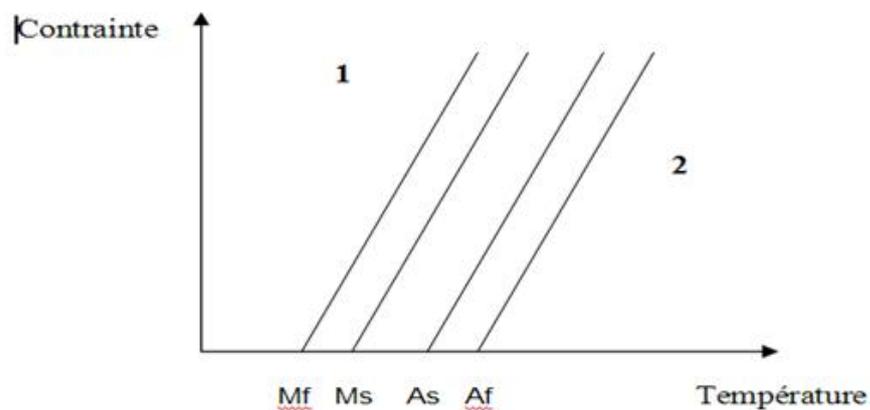
Il existe plusieurs familles de SMA. Les plus connus sont les alliages titane-nickel (Ti-Ni) et les alliages cuivreux (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be) en raison de leurs bonnes propriétés thermomécaniques tout en étant peu coûteux. Compétitif. En revanche, les alliages d'or (Au-Cd, Cu-Au-Zn) et d'argent (Ag-Cd) sont chers et n'ont donc qu'une valeur scientifique car ils n'ont aucune valeur marchande. Enfin, les ferroalliages (Fe-Mn-Cr-Ni-Si, Fe-Cr-Ni-Co-Mn-Si) sont peu coûteux mais ont des propriétés thermomécaniques assez limitées. De plus, même avec l'ajout de chrome, ces alliages ne résistent pas bien aux milieux corrosifs [2].

#### **1.3.3 Notions de base**

Le SMA se caractérise par la présence de deux phases à l'état solide. Pour l'acier, la phase à basse température est appelée martensite et la phase à haute température est appelée phase mère, appelée austénite. Les transformations de phase de l'acier et des alliages à mémoire de forme sont similaires. Transformation martensitique :

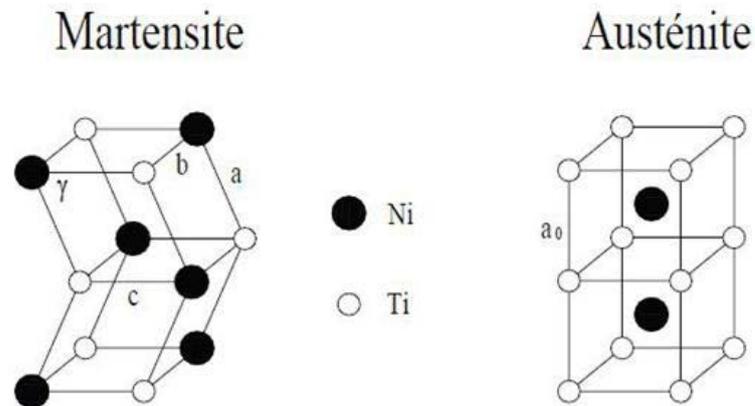
- Pas de diffusion, c'est-à-dire que les atomes ne parcourent pas de longues distances.
- Implique des déformations uniformes du réseau qui entraînent des changements de forme macroscopiques.
- Il se caractérise par une déformation partielle, c'est-à-dire que le volume reste inchangé.

- Cependant, une analyse détaillée de la transformation de l'alliage à mémoire de forme a révélé un léger changement de volume. En revanche, ce dernier est très faible par rapport au changement de forme. Par conséquent, cette transformation est toujours considérée comme de la martensite.
- Contrairement à l'acier, cependant, la température de transition est beaucoup plus basse, allant de moins 100 à plus 200 degrés Celsius, selon l'alliage utilisé. Ces températures de transition dépendent également de l'histoire de l'alliage, c'est-à-dire du traitement thermomécanique ou du procédé de fabrication, voire d'une combinaison des deux. De plus, il y a quatre températures qui caractérisent l'AMF : les températures auxquelles la transformation inverse commence et se termine, l'austénite start AS et AF indiquent l'achèvement de l'austénite, et les températures auxquelles la transformation directe commence et se termine, Ms indique la martensite start et MF est utilisé pour la finition martensitique. Au final, ces quatre températures dépendent de la contrainte appliquée, mais heureusement elles varient linéairement. Puis, dans la Figure 1.1, est un diagramme d'état simplifié représentant l'AMF [3].



**Figure 1.1** : Diagramme de phase simplifiée [5]

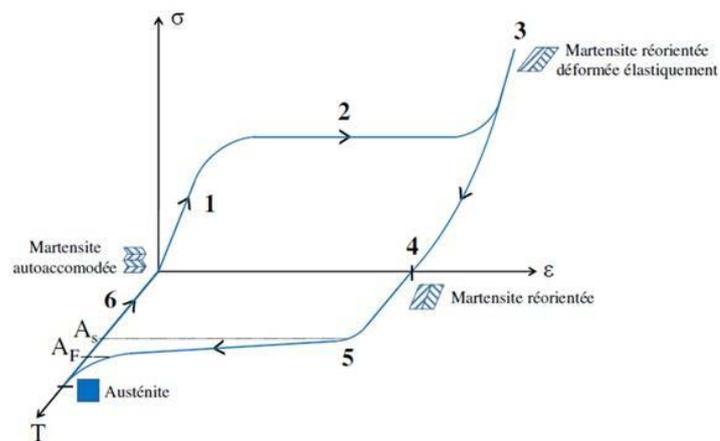
Enfin, le dernier concept important à comprendre sur les propriétés du SMA est que l'austénite a un réseau cubique et la martensite a un réseau monoclinique, comme le montre la figure 1.2 [3]



**Figure 1.2 :** Structure atomique de l'austénite et de la martensite [1]

### 1.3.4 Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme

Cette caractéristique AMF (alliage à mémoire de forme) est définie comme la capacité d'un échantillon à subir une déformation importante à l'état martensitique, et donc un changement de forme important, en retrouvant sa forme d'origine à l'état austénitique, il conserve la "mémoire" par chauffage à une température supérieure à la température "Finition Austénitique" (AF).



**Figure 1.3 :** Cycle thermomécanique typique d'un alliage a mémoire de forme [2]

Le diagramme schématique de l'effet de mémoire de forme est illustré dans la figure ci-dessus, et son mécanisme peut être résumé comme suit. L'application d'une contrainte sur la microstructure martensitique adaptative (1) provoque le déplacement des interfaces mobiles des

différentes variantes, de sorte que la variante martensitique s'adapte le mieux au processus de déformation au détriment des autres variantes (2). Ce changement d'orientation de la déformation permet d'obtenir la meilleure adaptation possible à la déformation, jusqu'à la déformation maximale (3). Lorsque la contrainte s'arrête, Une petite partie de la déformation est restituée : elle correspond à un retour partiel de l'interface entre variables. La martensite étant stable à cette température, la déformation permanente existe toujours (4). Pour restaurer le matériau à son état initial, un chauffage à une température supérieure à AF à contrainte nulle est nécessaire pour obtenir une transformation inverse complète (5). La reprise de déformation s'explique par le retour du matériau à la phase austénitique. Enfin, le retour à température ambiante se traduit par une transition de phase à contrainte nulle. Un phénomène de conditionnement se produit alors et reformule le mélange des variant martensitiques initiaux (6) : c'est un effet de mémoire de forme à sens unique [2].

### **1.3.5 Effet mémoire de forme**

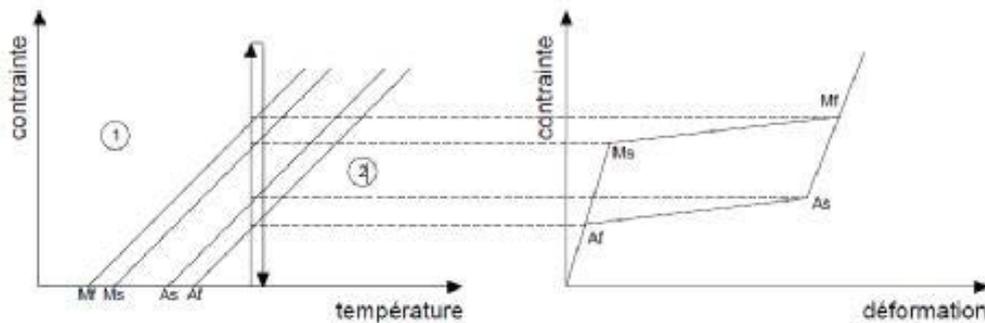
#### **1.3.5.1 Effet mémoire double sens**

L'effet mémoire double sens permet deux configurations différentes, une à haute température et une à basse température. Pour obtenir cet effet, l'AMF doit absolument être éduqué. Il existe plusieurs façons de le faire qui ont toutes le même objectif, c'est-à-dire d'introduire un réseau de dislocations dans le matériau. Ce réseau permet de favoriser de façon préférentielle la formation de certaines variantes de martensite lors du refroidissement sans contrainte. Il n'y a par conséquent plus de variante auto accommodante et une déformation résiduelle apparaît alors. Pour la configuration à haute température, elle reprend toujours sa configuration initiale, comme à l'habitude. Par contre, il n'est pas possible d'obtenir la configuration à basse température sous contrainte. En effet, l'application de la contrainte domine l'effet du réseau de dislocation et, par conséquent, la martensite se transforme donc dans le sens de la contrainte. La martensite ainsi générée est de la martensite orientée. Il n'est donc pas possible de générer un travail au refroidissement [1].

#### **1.3.5.2 Effet super élastique**

Pour obtenir un effet super élastique avec un AMF, il suffit de maintenir ce dernier à une température supérieure à AF. L'échantillon est donc au départ 100 % austénitique. Lorsque la contrainte augmente, les températures de transformation augmentent et il y a transformation

d'austénite en martensite. Lors de l'abaissement de la contrainte, l'effet contraire se produit et l'échantillon retourne aux mêmes conditions initiales. Puisque les températures de début de transformation directe et inverse sont différentes, il y a nécessairement apparition d'une hystérésis comme le démontre bien la figure (1.4).



**Figure 1.4:** Effet super élastique d'un alliage à mémoire de forme [7]

Il est donc possible de séparer la courbe de contrainte-déformation en deux. La première partie est composée du chargement. Elle contient d'abord une déformation élastique de zéro à  $s_{Ms}$  qui répond à la loi de Hooke avec le module de Young de l'austénite. Par la suite, il y a transformation d'austénite en martensite orientée de  $s_{Ms}$  à  $s_{Mf}$ . Lorsque la transformation est complète à 100 %, il y a alors une troisième section qui est, encore une fois, une déformation élastique. Par contre, le module de Young est maintenant celui de la martensite. Pour le déchargement, les étapes sont les mêmes. L'ordre est simplement inversé et les contraintes critiques utilisées sont celles de l'austénite, c'est-à-dire  $s_{As}$  à  $s_{Af}$  [1].

### 1.3.5.3 Effet amortissant

La capacité d'amortissement des AMF est très bonne. En effet, pour un matériau soumis à une température inférieure à  $M_s$ , la réorientation des variantes de martensite permet de dissiper l'énergie. Ce phénomène est également appelé Ferro élasticité. En effet, lorsque la contrainte passe successivement de la tension à la compression, on obtient une courbe qui est semblable à celle d'un matériau ferromagnétique plongé dans un champ magnétique [13].

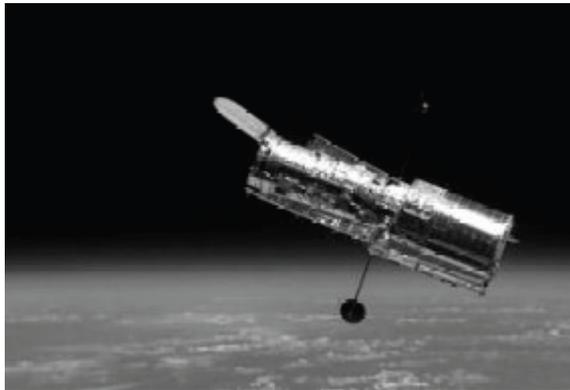
### 1.3.6 Applications des AMF

Cette section contient quelques domaines d'applications ainsi que quelques exemples bien connus dans le milieu des alliages à mémoire de forme. Il est à noter qu'elle ne constitue pas une revue exhaustive de toutes les applications.

### 1.3.6.1 Secteur aérospatial

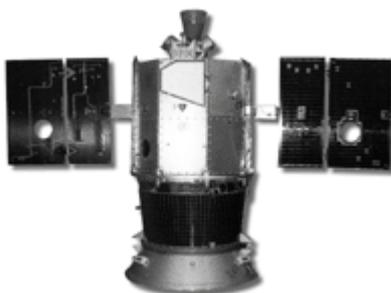
L'industrie aérospatiale doit minimiser le volume et le poids de toutes leurs composantes afin de minimiser les coûts de lancement. Puisque les AMF offrent un rapport force / densité et énergie / poids excellent, ils sont des outils par excellence.

Le premier exemple est le télescope Hubble. Ce télescope, lancé en avril 1990 (Figure 1.5), possédait des actionneurs en AMF (reprise de forme) pour le déploiement des panneaux solaires nécessaires à l'alimentation électrique des composantes électroniques.



**Figure 1.5** : Télescope Hubble lancé en avril 1990 [4]

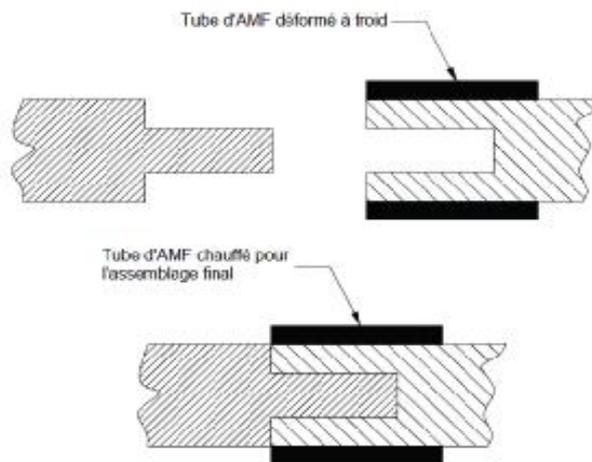
Le deuxième exemple est le satellite Clémentine. Lancé le 25 janvier 1994, ce satellite a déployé ses panneaux solaires en utilisant des boulons frangibolt développés par la compagnie TiNi Alloy Aerospace Inc. De San Leandro, Californie (figure 1.6). Ces boulons permettent d'éliminer les charges explosives utilisées auparavant qui nécessitaient des précautions spéciales pour le transport et l'entreposage. De plus, ces charges libéraient un gaz lors de l'explosion, ce qui peut faire dévier le satellite de sa trajectoire initiale.



**Figure 1.6** : Satellite Clémentine lancé le 25 janvier 1994 [5]

Finalement, le dernier exemple est la célèbre station spatiale MIR. Après la chute de l'URSS, cette dernière est devenue la première station internationale. Dans un environnement hostile

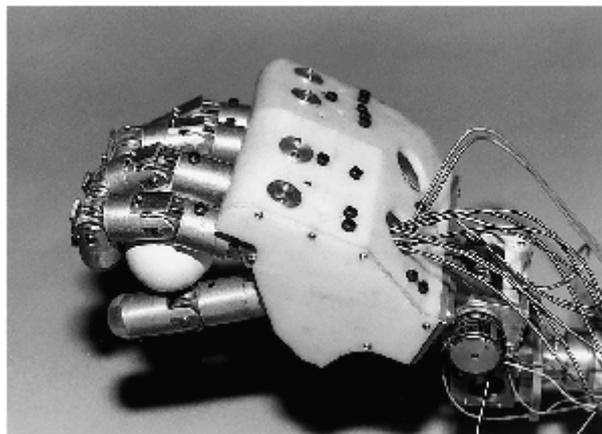
comme l'espace et avec l'absence de gravité, il est difficile d'assembler les modules de façon traditionnelle, comme par exemple le boulonnage, le rivetage, la soudure. En effet, le simple fait d'appliquer une force sur une clé afin de serrer un boulon repousse l'astronaute en direction opposée. L'idée développée pour contrer ce problème utilise les AMF.



**Figure 1.7** : Couplage thermomécanique [6].

### 1.3.6.2 Secteur industriel

Ce secteur, tout comme l'industrie aérospatiale, utilise également la reprise de forme des AMF afin de créer des actionneurs les plus compacts possible. Par contre, on utilise aussi les AMF pour leur effet amortissant et leur effet super élastique. En robotique, l'utilisation de micro actionneurs est courante. Par exemple, la figure 1.8 montre une main artificielle utilisant les AMF.



**Figure 1.8** : Micro actionneur pour la robotique [7].

L'optométrie, avec ses lunettes Figure 1.9 à monture super élastique, est probablement l'exemple le plus connu. En effet, la super élasticité permet de grandes déformations et les lunettes deviennent alors pratiquement incassables.

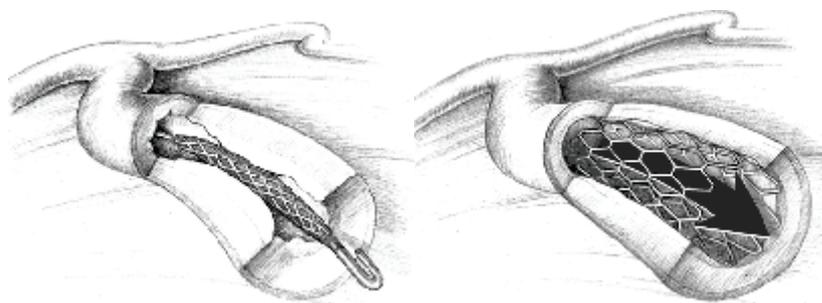


**Figure 1.9** : Lunette avec monture super élastique [8].

### 1.3.6.3 Secteur biomédical

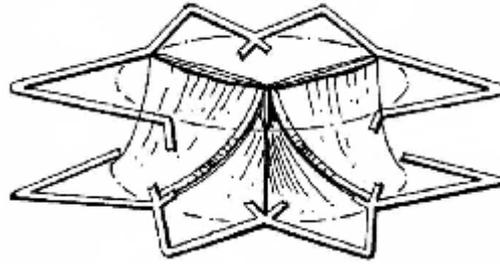
Ce secteur d'activité a des exigences très élevées par rapport aux matériaux utilisés. D'ailleurs, ce secteur est probablement le plus actif de nos jours et il utilise particulièrement l'effet super élastique avec les alliages de nickel qui sont évidemment biocompatibles. Par exemple, les stents sont des dispositifs qui permettent une chirurgie minimalement invasive afin de contrer les problèmes cardiaques liés à l'obstruction partielle des artères [9].

En effet, ce dispositif, une fois contracté, s'insère dans l'artère. Par la suite, lors du relâchement, l'effet super élastique contraint l'artère à retrouver le diamètre original et permet ainsi le passage du sang (figure 1.10).



**Figure 1. 10** : Stent cardiovasculaire comprimé après relâché [10].

Tout comme le stent, la valve cardiaque de la figure 1.11 permet une chirurgie minimalement invasive, ce qui réduit les répercussions négatives sur le patient [14].



**Figure 1.11** : Valve cardiaque [11].

Enfin, le dernier exemple du secteur biomédical est les broches d'orthodontie Figure 1.12. En effet, puisque les AMF ont un plateau sur l'hystérésis, la charge appliquée sur les dents reste constante pour une certaine plage de déformation. Cela permet au patient d'aller moins régulièrement chez son dentiste pour l'ajustement de son appareil dentaire.



**Figure 1.12** : Broche d'orthodontie [12].

## 1.4 Matériaux magnétostrictifs

### 1.4.1 Définition

L'effet de l'alliage magnétostrictif sur le champ magnétique est équivalent à celui du matériau piézoélectrique est dans un champ électrique. Sous l'action d'un champ magnétique, une tige de fer allongé alors qu'il subit un rétrécissement latéral. Au contraire, l'effet Villari correspond à l'aimantation de la bande sous allongement. Selon compte tenu de la géométrie, il est également possible de tirer parti de la déformation en flexion ou en torsion. [14]

### 1.4.2 Historique

Le physicien britannique Joule a découvert une barre de fer en 1842. Le champ magnétique longitudinal s'étend selon ce champ, alors qu'il se rétracte latéralement, comme sous l'action d'une traction mécanique. Il a donné ce phénomène est appelé magnétostriction. Depuis,

d'autres effets mécaniques Les champs magnétiques ont fait leurs preuves. Affectée par le champ magnétique, Les échantillons de certaines substances non seulement gonflent ou retrait, ainsi que la flexion, la torsion, les changements de densité, Même le changement du module de Young. Après les joules, nous continuons Tous ces phénomènes magnéto élastiques sont classés comme magnétostriction. La magnétostriction au sens le plus général du terme se présente comme une collection Relation qui lie les propriétés mécaniques d'un objet à ses propriétés magnétiques [14].

### **1.4.3 Principaux phénomènes de magnétostriction**

Il est d'usage de classer les phénomènes magnétostrictifs selon leurs aspects. À l'extérieur, quelle que soit leur cause première. Il y a une distinction entre les effets directs, où L'application de champs magnétiques (ou les changements de champs magnétiques) produit des modifications des paramètres mécaniques, et l'effet inverse, modifications d'un ou d'un paramètre La constante mécanique d'un matériau fait varier son aimantation, qu'il soit matériau, qu'il soit ou non initialement immergé dans un champ magnétique [17].

### **1.4.4 Application**

#### **a) Capteur magnétostrictif**

Le matériau ferromagnétique présente un effet magnétostrictif inverse traduire en modifiant la susceptibilité magnétique en présence de stress Mécanique des matériaux. Nous allons aussi détecteur de mouvement [14].

#### **b) Les actionneurs**

L'actionneur est la partie mécanique mobile de la chaîne contrôle de la quantité contrôlée par le mouvement de la pièce. Les actionneurs de mouvement longitudinal ou latéral sont le plus souvent basés sur Pile piézoélectrique PZT [15].

#### **c) Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques**

Les résonateurs magnétostrictifs peuvent être utilisés comme transducteurs émetteurs ou Récepteur d'ondes élastiques. C'est dans le domaine des projecteurs à ultrasons graves. La fréquence (par exemple 500 Hz) pour les applications sous-marines est plus rapide que le Terfenol. Des Avantages significatifs par rapport aux céramiques piézoélectriques PZT. La

puissance ultrasonique maximale que le transducteur peut émettre sans endommager la sonde. D'une part, les performances sont limitées par la densité d'énergie élastique à la rupture ou le seuil élastique non linéaire du matériau, d'autre part l'énergie volumique Magnétisme maximal supporté par le matériau sans dépolarisation ni non linéarité Trop de magnétisme [16].

## **I.5 Matériaux piézoélectriques**

Ces matériaux présentent la faculté de se déformer sous l'application d'un champ électrique d'origine extérieure. Réciproquement, ils développent une polarisation électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.

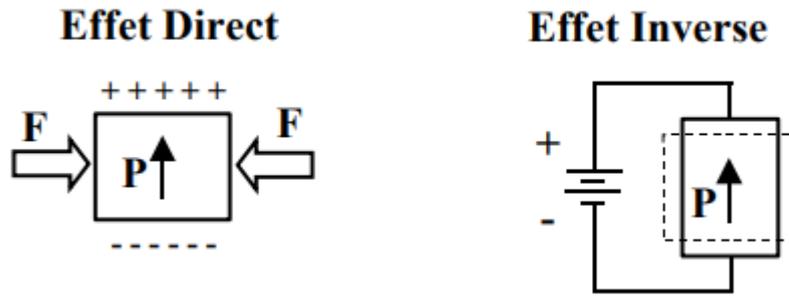
### **I.5.1 Définition de la piézoélectricité**

Repose sur la propriété particulière de certains matériaux qui peuvent se polariser sous l'application d'une contrainte, et qui inversement se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Dans certains matériaux, comme le quartz, cet effet est naturellement observable. L'application d'une force provoque l'apparition d'un champ électrique (effet piézoélectrique direct), tandis que l'application d'un champ électrique provoque la déformation du matériau (piézoélectrique inverse) [18, 19, 20].

Les caractéristiques piézoélectriques de ces céramiques résultent de la polarisation initiale dans un champ électrique à température contrôlée. Les céramiques massives ainsi produites peuvent générer des contraintes de l'ordre de 40 MPA avec des déformées relatives de 1000 à 2000 ppm.

### **I.5.2 D'effet piézoélectrique**

Ce phénomène fut découvert en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie, qui travaillaient sur la relation entre pyroélectricité et structure cristalline. La pyroélectricité traduit le couplage entre effets thermiques et effets électriques ; la piézoélectricité, quant à elle, caractérise le couplage entre les grandeurs mécaniques et les grandeurs électriques. La piézoélectricité permet la conversion électromécanique. L'effet piézoélectrique direct (figure 1.13) est le phénomène de polarisation électrique induite par application d'une contrainte à certains matériaux. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte et change de signe avec elle. Le coefficient de proportionnalité est appelé  $d$  : coefficient piézoélectrique. Ce phénomène est réversible : une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînera une déformation du même matériau. On parle alors d'effet piézoélectrique inverse [21].



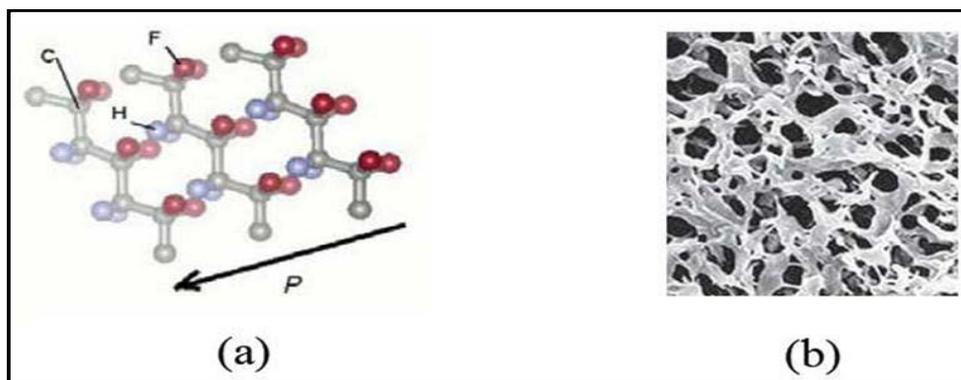
**Figure 1.13:** L'effet piézoélectrique.

### 1.5.3 Types des matériaux piézoélectriques

Pendant la deuxième guerre mondiale, des recherches sont menées sur le phénomène piézoélectrique. Elles montrent que certains matériaux piézoélectriques ont des constants diélectriques importants. Parmi ces différents matériaux, trois types sont distingués : les polymères piézoélectriques, les céramiques massives et les cristaux.

#### 1.5.3.1 Polymères piézoélectriques

Les polymères ou les copolymères comme respectivement le Poly-Vinyl-DiFluoridene ou PVDF et le P (VDF-TRFE) v partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliants, mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sous-marine en réception. Le PVDF en est le représentant le plus connu, les chaînes de polymère peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique. [23]



**Figure 1.14:** Structure du PVDF. [22]

### 1.5.3.2 Céramiques massives

Les céramiques piézoélectriques se sont vite imposées par leurs forts coefficients piézoélectriques. La famille des céramiques comporte de nombreux éléments, citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, les titanates de plomb ou les métaniobates de plomb utilisé pour l'imagerie haute résolution. La famille des PZT (plomb, zirconite, titanate) compte à elle seule cinq à six compositions différentes sans compter les structures dopées de type PLZT.

### 1.5.3.3 Les cristaux : Quartz et Niobates de Lithium

Nous citerons seulement le quartz et certains cristaux à base de Bismuth et de Lithium (comme le Niobat «  $\text{LiNbO}_3$  » de Lithium et le Tantale de Lithium «  $\text{LiTaO}_3$  ») découverts respectivement par Matthias et Aurivillius en 1949 (figure 1.15). Ces matériaux sont très stables mais ont de faibles coefficients piézoélectriques. Il est actuellement possible de fabriquer de nombreux monocristaux de même composition que les céramiques citées précédemment mais les techniques mises en jeu sont délicates et coûteuses.

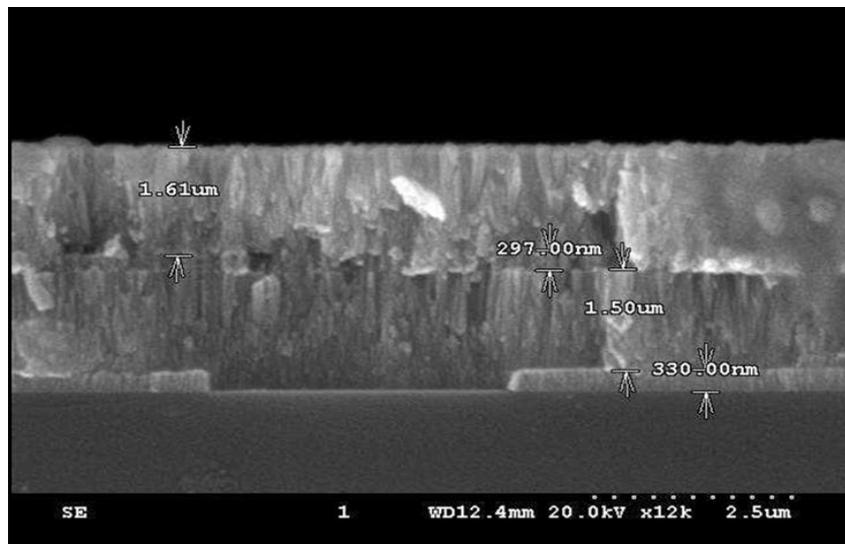


Figure 1.15 (a) : Céramique [22].

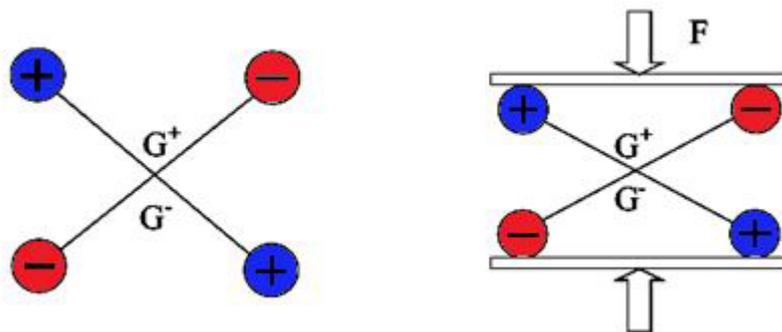


**Figure 1.15 (b) :** Quartz [22]

### 1.5.4 Symétrie et piézoélectricité

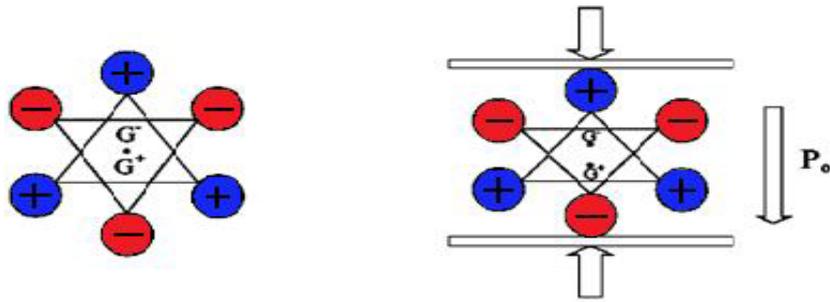
L'effet piézoélectrique direct traduit l'aptitude de quelques matériaux à se polariser sous l'application d'un effort mécanique, la charge électrique apparaissant à leur surface est alors proportionnelle à la contrainte exercée. Ce phénomène est réversible, c'est-à-dire qu'il est possible d'obtenir pour ces mêmes matériaux des déformations lorsqu'on les soumet à un champ électrique : c'est l'effet inverse.

Pour qu'un corps soit piézoélectrique, il faut qu'il soit non Centro-symétrique, c'est-à-dire que les barycentres des charges positives et négatives doivent être différents dans la maille. Ainsi, seuls les cristaux ne présentant pas de centre de symétrie possèdent des caractéristiques piézoélectriques. Ceci est illustré dans les figures (1.17 et 1.18).



**Figure 1.16:** Cristal possédant un centre de symétrie [24].

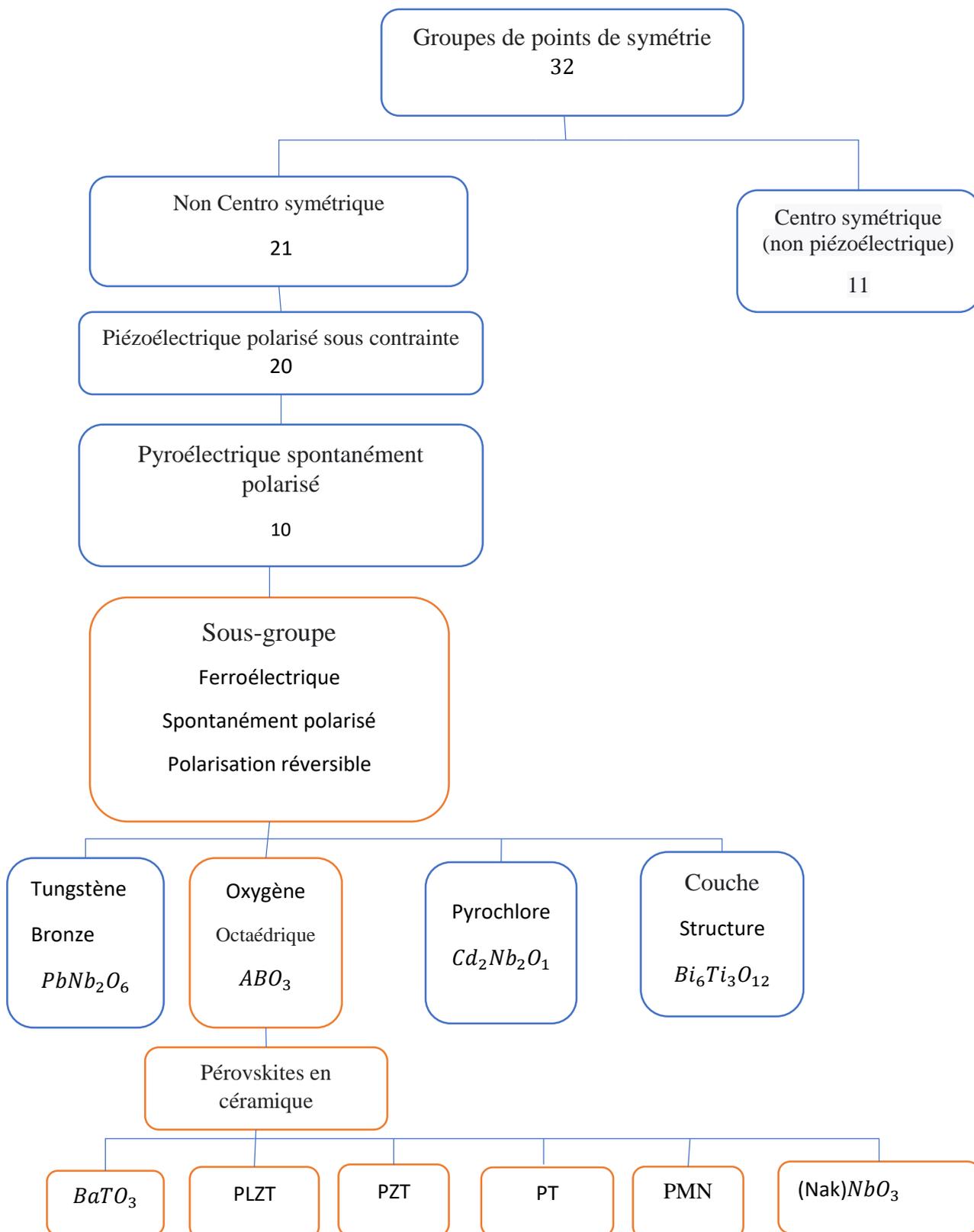
Dans ce cas (figure 1.16), l'application d'une contrainte mécanique, si elle engendre une déformation du matériau, n'induit pas de déplacement des barycentres positif et négatif ( $G^+$  et  $G^-$ ), si bien qu'aucune polarisation n'apparaît.



**Figure 1.17:** Cristal ne possédant pas de centre de symétrie, le barycentre des charges Déplace, créant une polarisation  $P_0$  [24].

Pour ce cristal (figure 1.17) la déformation entraîne un déplacement des barycentres, et une polarisation électrique  $P_0$  apparaît [24].

Sur les 32 classes cristallines, 21 présentent ces caractéristiques (non Centro symétrique) et 20 classes cristallines sont piézoélectriques, parmi ces 20 classes, 10 présentent une polarisation spontanée en l'absence d'un champ extérieur, elles sont dites pyroélectriques et polaires en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température [25].



**Figure 1.18:** Organigramme des classes cristallines [25].

### 1.5.5 Domaines d'application des matériaux piézoélectriques

Il est possible de distinguer trois grandes classes d'application des matériaux piézoélectriques selon qu'il s'agisse de l'effet piézoélectrique direct et/ou inverse qui est mis en jeu [26] et [27].

**Tableau 1.1:** Applications des matériaux Piézoélectriques en fonction de l'effet [31].

Application basée sur l'effet Direct	Application basée sur l'effet Inverse	Applications basées sur les deux effets
Microphone	Haut-parleur	Transducteur d'ultrasons pour diagnostic (échographie)
Hydrophone	Buzzer	CND par ultrasons
Capteur de choc	Transducteur sonar	Détecteur de proximité ou de présence
Accéléromètres	Nébuliseur	Mesure de distances de débits
Bouton poussoir	Nettoyage par ultrasons	Gyroscope
Allumage	Relais	Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW)
Capteur de pression ou de contraintes	Micro positionnement	Lignes à retard
	Ajustement laser	Transformateur piézoélectrique
	Imprimante à jet d'encre	
	Dispositifs acousto-optiques	
	Pompe piézoélectrique	

### 1.5.6 Choix du matériau piézoélectrique

Comme nous l'avons vu, il est nécessaire d'intégrer le lecteur piézoélectrique dans structure mécanique si un bon rendement d'entraînement est requis. À ceci contexte, Nous pouvons voir dans le tableau 1.2. Il faut comparer les valeurs propres Les matériaux piézoélectriques nous permettent de choisir le matériau le mieux adapté au mouvement Celui-ci sera utilisé. Certains matériaux piézoélectriques. Le PZT est apprécié pour ses performances supérieures Piézoélectrique par rapport aux autres composés. Il constitue la majeure partie du matériel pour la production de céramiques en vrac, également pour les couches épaisses piézoélectriques [28].

**Tableau 1.2:** Constantes physiques de matériaux piézoélectriques [32].

	<b>Quartz SiO2</b>	<b>LiNbO3</b>	<b>BaTiO3</b>	<b>PVDF</b>	<b>PZT</b>
Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	2.65	4.64	5.7	1.76	7.5
Constante diélectrique $\epsilon_{11}$	4.5	40	1700	12	200-400
Constante de charge $d_{33}$ [10-2C/N]	2	6	180	20	40-750
Constante de tension $g_{33}$ [V m/N]	50	20	17	190	15-40
Température de Curie [°C]	573	1210	130	180	<350

### 1.5.7 Equations constitutives de la piézoélectricité

Par définition, les milieux piézoélectriques sont anisotropes. Pour étudier leurs propriétés, il est nécessaire de définir précisément leur orientation cristallographique. L'axe (Oz) est généralement choisi en fonction de la direction du champ polarisant. Les axes (Ox), (Oy) et (Oz) forment un trièdre droit, permettant six mouvements communs (trois translations et trois rotations). Dans le cadre thermodynamique, l'évolution d'un système piézoélectrique est décrite par l'évolution de quatre variables combinées [29].

L'équation de composition pour la piézoélectricité [30] convertit linéaire et réversible en reliant les variables mécaniques (six composantes du tenseur de déformation  $S$  et six composantes du tenseur de contrainte  $T$ ) aux variables électriques (le vecteur des composantes de déplacement électrique  $D$ ) Le vecteur  $E$  du phénomène ou de la composante de champ électrique. Les équations statiques de la piézoélectricité sont présentées dans le Tableau 1.4. On retient : ( $t$ ) : le suffixe  $t$  indique la transposée de la matrice considérée, ( $R$ ) : le suffixe  $R$  indique que la quantité considérée est une constante ou nulle. L'inductance  $D$  est fonction du champ  $E$  et de la polarisation  $P$ , soit :  $D = \epsilon_0 E + P$ , où  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m est la permittivité du vide.

Le Tableau 1.4 définit les différentes grandeurs présentes dans les équations présentées dans le Tableau 1.3, et leurs unités respectives.

**Tableau 1.3:** Equation de la piézoélectricité [30]

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

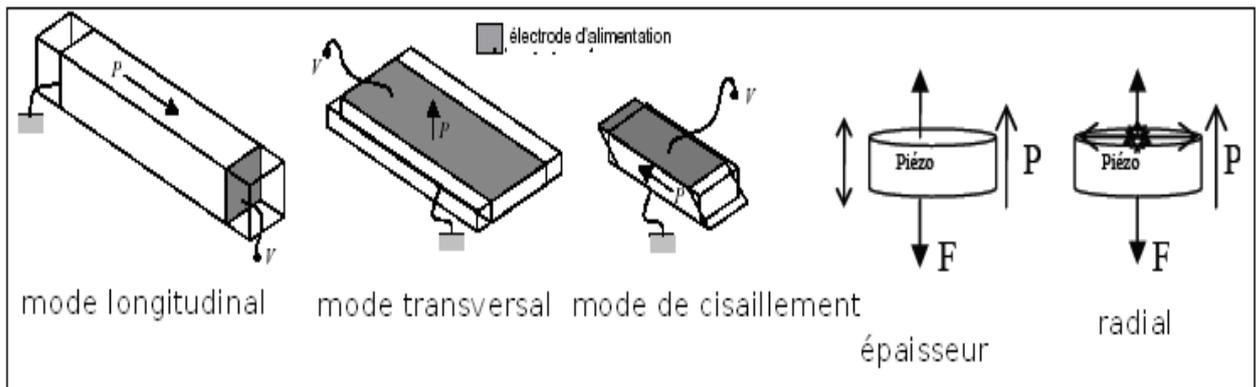
**Tableau 1.4:** Grandeurs des équations d'état de la piézoélectricité [32].

<b>Termes mécaniques (notation de Voigt)</b>		
$T$	N/m <sup>2</sup>	Contrainte mécanique (dimensions : 6 × 1)
$S$	m/m	Déformation relative (dimensions : 6 × 1)
$s$	m <sup>2</sup> /N	Compliance élastique (dimensions : 6 × 6)
$c$	N/m <sup>2</sup>	Raideur élastique (dimensions : 6 × 6)
<b>Termes piézoélectriques</b>		
$d$	C/N ou m/V	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ nul ou constant (dimensions : 3×6)
$e$	C/m <sup>2</sup> ou N/V. m	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation à champ nul ou constant (dimensions : 3×6)
$g$	C/N ou m/V	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ à induction constante ou nulle (dimensions : 3×6)
$h$	V/m ou N/C	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ résultant à induction constante ou nulle (dimensions : 3×6)
<b>Termes électriques</b>		

$E$	V/m	Champ électrique (dimensions : 3×1)
$D$	C/m <sup>2</sup>	Déplacement ou induction électrique (dimensions : 3×1)
$\epsilon$	F/m	Permittivité diélectrique absolue (dimensions : 3×3)
$\beta$	m/F	Constante d'imperméabilité diélectrique (dimensions : 3×3)

### 1.5.8 Mode de vibration

La tige piézoélectrique (PZT) a trois modes de déformation : le mode longitudinal (33), le mode transversal (31) et le mode de cisaillement (15) (Figure 1.20).



**Figure 1.19** : Principaux modes de déformation selon les dimensions des échantillons et la direction de la polarisation [32].

Ces modèles correspondent à des échantillons d'une taille spécifique. Dans le cas de disques minces, on parle de mode d'épaisseur (même champ  $E$  que la direction d'épaisseur) et non de mode longitudinal. De même, les modes radiaux doivent être distingués des modes transversaux.

### 1.5.9 Coefficients de couplage

L'isotropie nécessaire à l'existence de la piézoélectricité favorise la déformation dans le sens proche sous l'action d'un champ électrique extérieur. Ce fonctionnement caractéristique des céramiques piézoélectriques est souvent appelé mode. Ces modes particuliers sont caractérisés par un coefficient de couplage, généralement noté  $k$ , et défini par les éléments de la matrice Constantes mécaniques, piézoélectriques et diélectriques des matériaux. C'est une manifestation de la capacité d'un échantillon à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique [34].

**Tableau 1.5:** Coefficient de couplage électromécanique associé à chaque mode [33].

Mode	Coefficient de couplage $K_{i\lambda}$
Transversal	$K_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}}$
Longitudinal	$K_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^E \epsilon_{33}^T}}$
Cisaillement	$K_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{s_{55}^E \epsilon_{15}^T}}$
Radial	$K_p = k_{31} \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma^E}}$

### 1.5.10 Facteur de qualité

Le facteur de qualité d'un résonateur, ou coefficient de surtension mécanique, traduit les pertes mécaniques d'un résonateur au cours d'une période de vibration.

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{Énergie stockée dans le résonateur}}{\text{Énergie dissipée pendant une période de vibration}} \quad 1.1$$

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les bases pour comprendre les transformations martensitiques et austénitiques, ainsi que les aspects cinématiques thermomécaniques et les différents types de comportement que peuvent présenter les matériaux à mémoire de forme. Nous introduisons également le concept de magnétostriction et présentons certaines de ses applications dans la technologie et l'industrie, ainsi que les matériaux à mémoire de forme, Nous décrivons également les trois matériaux piézoélectriques qui peuvent exister et leurs domaines d'application. Enfin, nous examinerons plus en détail les matériaux piézoélectriques.

**Chapitre 2 :**  
**Etat de l'art de**  
**transformateur**  
**piézoélectrique**

## 2.1 Introduction

La première structure de transformateurs piézoélectriques est apparue en 1956 suite aux travaux menés notamment par C. A. Rosen [35]. Cette structure avait la forme d'un barreau. Elle était particulièrement bien adaptée pour les applications haute tension faible puissance. Elle permettait d'obtenir un gain en tension maximum de 56 pour de très faibles charges et un rendement maximum de 89% pour une charge adaptée. Malheureusement, les performances de ce type de transformateur sont fortement dépendantes de la charge et de la fréquence, ce qui ne lui a pas permis de s'imposer devant le transformateur électromagnétique.

Dans ce chapitre, on présente les généralités concernant le transformateur piézoélectrique en commençant par son principe de fonctionnement et son historique. Ensuite, les différents types de transformateurs et leurs applications sont présentés. Pour finir, des outils de simulation appliqués à la modélisation du transformateur piézoélectrique disponibles dans la littérature sont décrits dans la dernière section de ce chapitre.

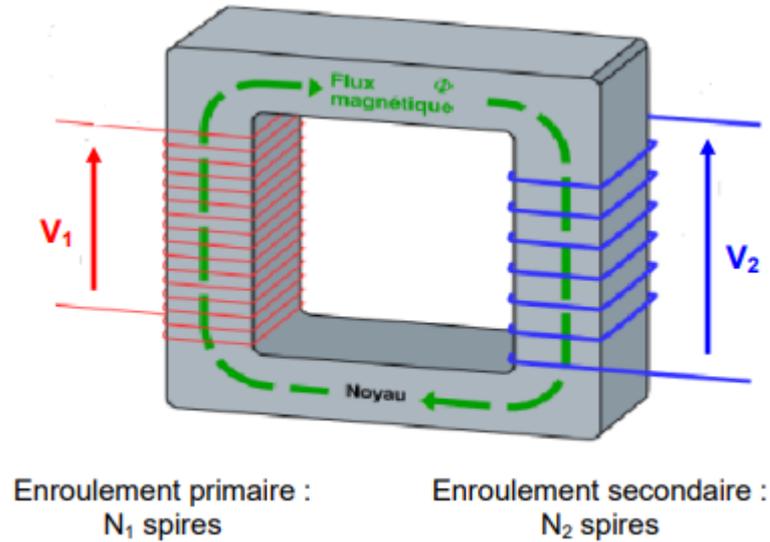
## 2.2 Historique

L'émergence des transformateurs piézoélectriques coïncide avec le développement dans les années 1950 des céramiques ferroélectriques appartenant à la famille cristalline des Pérovskites. La première architecture fut proposée en 1956 et brevetée en 1958 par Charles A. Rosen qui conçut une structure élévatrice de tension façonnée dans un barreau de titanate de baryum qui trouve ses premières applications en tant que filtre passe-bande et alimentation haute tension [35]. Malgré le caractère novateur de cette technologie, le transformateur piézoélectrique a été délaissé et n'a suscité que peu d'intérêt lors des années qui ont suivi son invention. Dans les années 70, des entreprises américaines et japonaises (Motorola, Denki Onkyo, Matsushita, etc.) ont voulu utiliser les transformateurs piézoélectriques pour générer la tension nécessaire dans le tube cathodique de la télévision. Dans les années 80, Siemens et General Electric ont travaillé sur une éventuelle application des transformateurs piézoélectriques pour déclencher la commande des commutateurs de puissance tels que le thyristor.

## 2.3 Principe du transformateur piézoélectrique

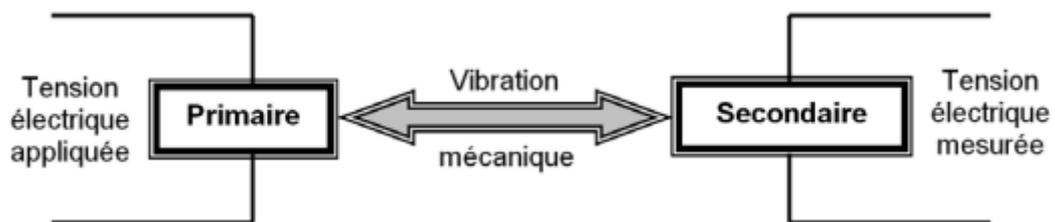
Le transformateur électromagnétique se compose de deux bobines qui sont couplées par le champ magnétique généré par l'application de tension alternative  $V_1$  aux bornes de la première bobine. Dans ce domaine, dans le noyau de fer, produit, traverse la deuxième bobine, par

induction électromagnétique, tension  $V_2$ . Le rapport de transformation  $V_2/V_1$  est proportionnel au rapport des nombres de spires des deux bobines  $N_2/N_1$ .



**Figure 2.1:** Transformateur électromagnétique conventionnel [36].

De même que pour le transformateur électromagnétique, le transformateur piézoélectrique est basé sur l'utilisation simultanée d'un principe physique et de son inverse : la piézoélectricité, transformant une grandeur électrique en grandeur mécanique et inversement (figure 2.2).



**Figure 2.2:** Principe du transformateur piézoélectrique [36].

Les transformateurs piézoélectriques sont constitués de matériaux piézoélectriques, deux ensembles d'électrodes primaires et secondaires sont déposés. Par effet piézoélectrique inverse, la tension d'excitation appliquée à l'électrode primaire peut créer une contrainte mécanique des matériaux. Une fois la contrainte transférée au secondaire, elle est placée dans Vibration à la fréquence de résonance. Par effet piézoélectrique direct, une tension est générée sur l'électrode secondaire. Cette tension, il peut bénéficier d'une amplification. Le mouvement dû à la résonance peut alors être des centaines de fois supérieure au mouvement d'origine élémentaire [36].

## **2.4 Avantages et inconvénients des transformateurs piézoélectriques**

Les transformateurs piézoélectriques ont de nombreux avantages par rapport à leurs homologues magnétiques :

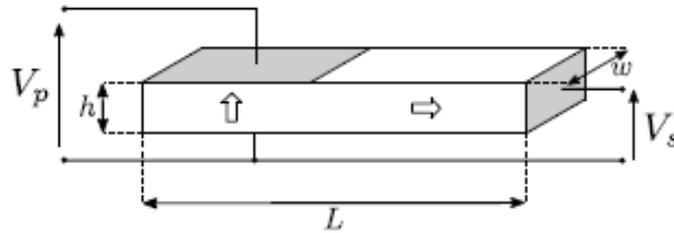
- Des densités de puissance plus importantes.
- Des rendements supérieurs pour des densités de puissance équivalentes.
- L'absence d'enroulement facilite la construction et limite les risques de court-circuit.
- Certaines structures jouissent d'une isolation galvanique naturelle, sinon cette propriété est relativement facile à obtenir.
- Peu d'émission électromagnétique.

Les transformateurs piézoélectriques présentent toutefois quelques inconvénients par rapport aux transformateurs électromagnétiques. On peut notamment citer la forte dépendance des comportements électriques et mécaniques vis-à-vis de la résistance de charge connectée au secondaire, celle-ci influe fortement sur la puissance transférée par le transformateur, sur le rendement de ce transfert ainsi que sur le rapport de transformation. Ceci impose la mise en œuvre d'une électronique complexe permettant de régler la tension ou la puissance par exemple. [37]

## **2.5 Principales structures de transformateurs piézoélectriques**

### **2.5.1 Transformateur Rosen (effets couplés)**

Cette structure peut être pleinement exploitée par effet piézoélectrique inverse et effet piézoélectrique direct [35]. Par conséquent, la tension primaire relativement faible et un rapport longueur/épaisseur de plusieurs unités peut produire des vibrations sont importantes. Grâce à des effets longitudinaux, nous avons en secondaire une tension, qui redevient plus importante du fait de grande longueur. Revenus la tension totale est proportionnelle au rapport de la longueur à l'épaisseur. Ce sont ces structures qui ont suscité le plus d'intérêt dans la communauté scientifique, et conduisant à des applications industrielles nécessitant de hautes tensions telles qu'alimente les lampes à cathode froide CCFL ou les écrans LCD rétroéclairés. Les transformateurs Rosen ne sont pas isolés galvaniquement comme le montre la Figure 2.3 (montage à trois électrodes). Cependant, il est possible en compliquant la structure de contourner ce problème.

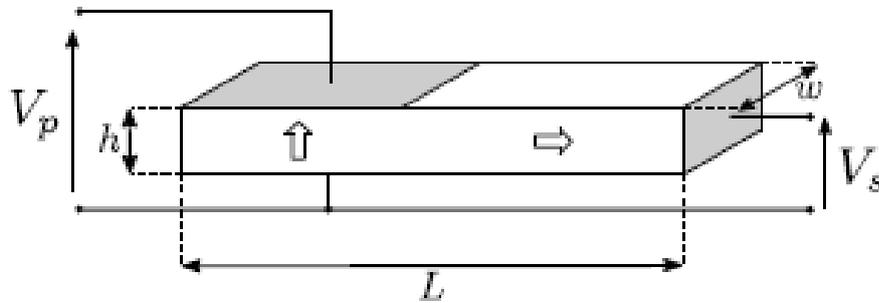


**Figure 2.3 :** Transformateur piézoélectrique de type Rosen [39]

Cette structure à l'avantage d'avoir une très faible capacité inter-électrode au secondaire, ce qui maximise le coefficient effectif de couplage électromécanique et diminue les pertes.

### 2.5.2 Transformateur en mode transverse

Le transformateur de mode transverse est représenté sur la figure 2.4. Cette structure est constituée d'une tige en céramique polarisée en épaisseur et de deux jeux d'électrodes en surface. Du fait de la symétrie du système, le gain en tension est si faible qu'il est impossible d'agir sur la taille et la position des électrodes en fonction des modes résonnants excités. Étant donné que la séparation des électrodes primaire et secondaire fournit une isolation galvanique, elles sont principalement utilisées comme transformateurs d'isolement.

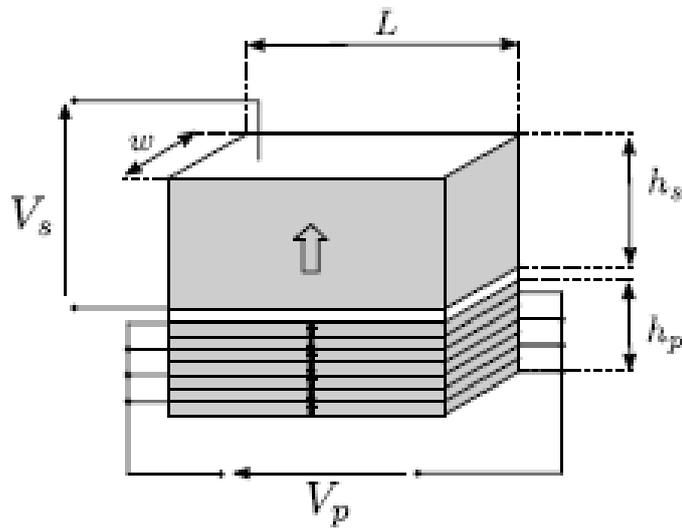


**Figure 2.4:** Transformateur en mode transverse [39]

### 2.5.3 Transformateur épaisseur (multicouches)

Le transformateur d'épaisseur (Figure 2.5) est un parallélépipède divisé en deux parties. Cette structure a été brevetée par NEC [38] en 1992. Le primaire est divisé en plusieurs couches pour augmenter le champ électrique. Nous avons donc parlé de plusieurs couches. Le champ appliqué est dans le même sens que la déformation, réveillant ainsi le mode d'épaisseur. En secondaire, le mode épaisseur est également utilisé. Le gain de tension de ce transformateur

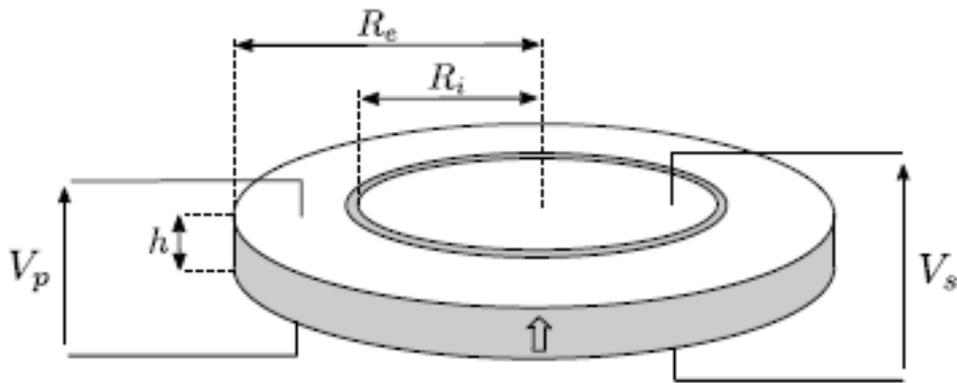
dépend du rapport de l'épaisseur du primaire et du secondaire et du nombre de couches dans le primaire. Diviser d'abord le primaire en plusieurs couches permet de contrôler le gain de tension sans modifier la fréquence de résonance du transformateur. Le primaire et le secondaire sont séparés par un isolant pour assurer l'isolation galvanique. Ces transformateurs fonctionnent à des fréquences autour du MHz. Cependant, le coefficient de couplage effectif latéral est très proche de l'épaisseur du PZT, de sorte que les modes parasites peuvent limiter les performances du transformateur. Cet effet peut être réduit en utilisant des matériaux hautement anisotropes. La structure peut également être utilisée en mode paysage, on parle alors d'un transformateur pour le mode contour. La fréquence de fonctionnement est d'environ 100 kHz.



**Figure 2.5:** Transformateur en mode épaisseur avec primaire en multicouches [39].

#### 2.5.4 Transformateur en mode radial

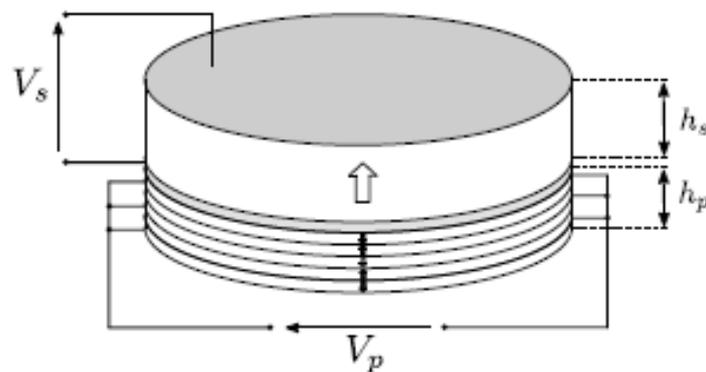
Les convertisseurs en mode radial (figure 2.6) utilisent un disque qui a une petite épaisseur avant le rayon et qui est polarisé dans le sens de l'épaisseur. Ce transformateur est basé sur le même principe de conversion que le transformateur latéral, mais bénéficie d'un meilleur coefficient de couplage électromécanique. La dissymétrie entre les tronçons primaire et secondaire permet également de contrôler le gain en tension de la structure en jouant sur le périmètre de chaque tronçon.



**Figure 2.6:** Transformateur en mode radial [39]

### 2.5.5 Transformateur multicouches en mode radial

La dernière structure présentée ici est le transformateur transenne développée par Face Electronics [39]. Le transformateur est basé sur des modes de vibration radiaux, mais le primaire et le secondaire sont séparés dans le sens de l'épaisseur. L'apprêt et la peinture secondaire peuvent être multicouches selon le type utilisé. Un isolant rigide peut séparer électriquement les deux tois en maintenant un couplage mécanique fort. Ces transformateurs piézoélectriques sont les transformateurs les plus performants en termes de densité de puissance, jusqu'à 30 W.



**Figure 2.7:** Transformateur transenne multicouche en mode radial [39]

## 2.6. Modélisation du transformateur piézoélectrique en mode radial

### 2.6.1 Modélisation des éléments piézoélectriques

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'équations (2.1).

$$\begin{cases} F = K^E \cdot u + \alpha \cdot V \\ I = \alpha \cdot \dot{u} + C_0 \cdot \dot{V} \end{cases} \quad (2.1)$$

Cette équation traduit les trois comportements d'un élément piézoélectrique un comportement purement élastique, traduit par la relation (2.2) et graphiquement par la figure ci-dessous.

$$F_{elast} = K \cdot u \quad (2.2)$$

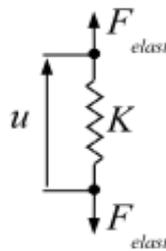


Figure 2.8 : raideur [40]

Un comportement purement diélectrique, traduit par (2.3).  $I_{diel}$  Est le courant associé au déplacement de charge dans le matériau.

$$I_{diel} = C_0 \cdot \dot{V} \quad (2.3)$$

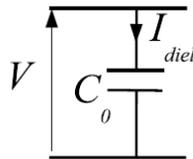


Figure 2.9 : capacité [40]

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

$$\begin{cases} F = \alpha \cdot V \\ I_{meca} = \alpha \cdot \dot{u} \end{cases} \quad (2.4)$$

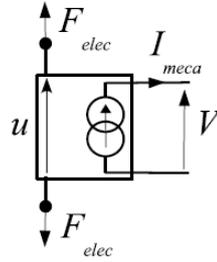


Figure 2.10 : convertisseur électromécanique [40]

## 2.6.2 Equations différentielles

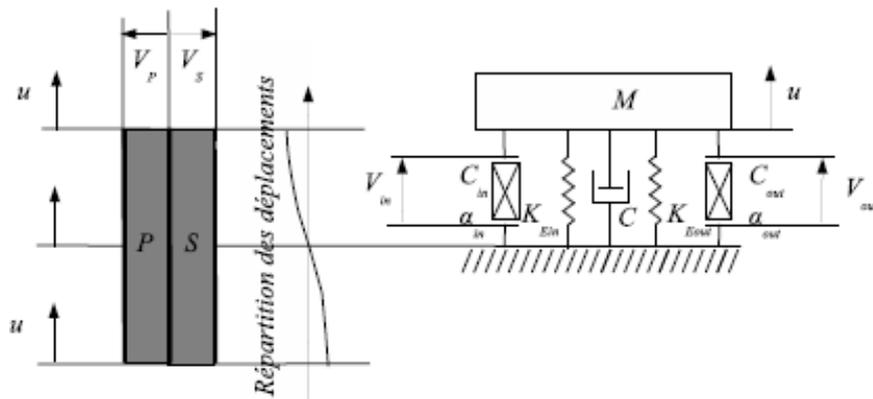


Figure 2.11 : Modèle de transformateur en mode radial [40].

A partir du système d'équations (2.1), on déduit les relations piézoélectriques de base pour le primaire (2.5) et pour le se secondaire (2.6).

$$\begin{cases} F = K_{in}^E \cdot u + \alpha_{in} \cdot V_{in} \\ I = \alpha_{in} \cdot \dot{u} + C_0 \cdot V_{in} \end{cases} \quad (2.5)$$

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

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.

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

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  $R_L$  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).

### 2.6.3 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 :

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

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

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

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 :

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

Le rendement :

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

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous explorons le modèle général des transformateurs piézoélectriques, construit selon la méthode de Mason. D'une part, le comportement mécanique est modélisé en fonction de l'impédance électrique, et d'autre part, le comportement électrique du transformateur piézoélectrique vibrant en mode radial est montré pour comprendre l'effet de la charge sur le gain de tension et le rendement.

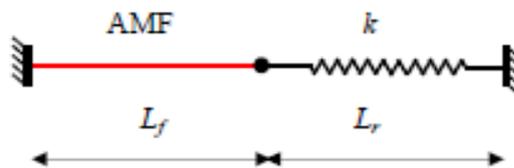
**Chapitre 3 :**  
**Amélioration des**  
**performances de**  
**transformateur à base**  
**d'AMF**

### 3.1 Introduction

Ce chapitre représente un nouveau transformateur piézoélectrique à base de l'alliage à mémoire de forme. L'objectif principal de ce travail basé sur 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.

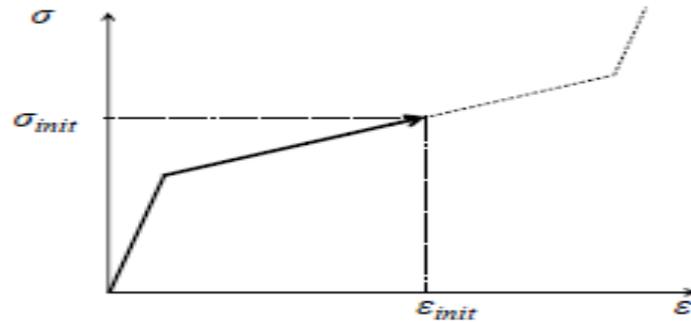
### 3.2 Modèle constitué d'un fil AMF en série avec un ressort

Dans ce premier cas de figure, on se propose d'étudier un modèle analogique constitué d'un fil AMF mis en série avec un ressort linéaire de raideur (figure 3.1). Rappelons qu'en réalité, le ressort représente une structure quelconque qui se déforme élastiquement.



**Figure 3.1:** Modèle analogique constitué d'un fil AMF en série avec un ressort linéaire [41].

Comme indiqué précédemment, le fil AMF est mis initialement à l'état d'austénite pure à température ambiante, puis soumis à un pré-étirement pour être partiellement transformé en martensite orientée. La figure 3.2 montre l'évolution de l'état de l'AMF dans le plan contrainte-déformation. On considère que le fil AMF est dans cet état avant de procéder à son chauffage.



**Figure 3.2:** Mise en traction du fil AMF (initialement austénitique) pour le transformer partiellement en martensite [41]

Le chauffage de l'AMF cause son raccourcissement par effet mémoire, ce qui entraîne une augmentation de la force dans le fil et le ressort, ainsi que le déplacement du point milieu. Au refroidissement, l'AMF revient dans un état de martensite orientée, et le point milieu va se déplacer dans l'autre sens sous l'effet de la force de rappel exercée par le ressort.

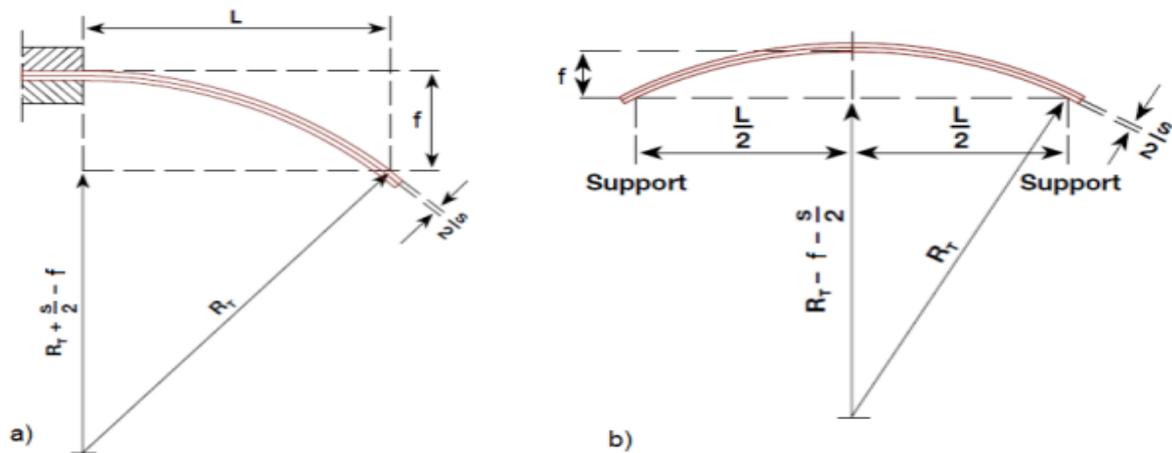
### 3.3 Modélisation analytique de l'effet bilame

L'effet bilame consiste dans la courbure au chauffage d'un empilement composé d'un matériau à haut coefficient de dilatation thermique et d'un matériau à bas coefficient de dilatation thermique. L'étude de référence sur cet effet a été faite par S. Timoshenko, qui a analysé le comportement des bilames pour les thermostats. Un bilame sous forme de poutre, encastré d'un côté et plat à l'état initial prend une forme d'arc de cercle lorsque la température change. Le rayon de courbure est donné par l'expression suivante [42] :

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

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,  $\alpha_1, \alpha_2$ : coefficients de dilatation thermique (CDT). L'index 2 correspond à la couche à haute dilatation thermique, située en haut sur la Figure 3.1 a.



**Figure 3.3:** Déformation d'un bilame sous forme de poutres ou mis à une variation de température : a) bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre [42].

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

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

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. Ce ci veut dire qu'une grande différence de CDT ou de température implique une forte déformation. Un bilame de faible épaisseur se déformer a plus qu'un bilame épais. On définit la courbure spécifique du bilame :

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

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

$$f = \frac{k}{2} \times \frac{(T - T_0) \times L^2}{S} \quad 3.4$$

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 un force  $F$  calculée

Selon :

$$F - F_0 = \frac{k}{2} \times \frac{Y(T-T_0) \times ls^2}{4L} \quad 3.5$$

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 (Figure 3.3 b). Dans ce cas, la flèche se calcule selon :

$$f = \frac{k}{2} \times \frac{(T-T_0) \times L^2}{4S} \quad 3.6$$

La flèche résultante est inférieure à celle d'une poutre en castrée 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 :

$$f = \frac{k}{2} \times \frac{(T-T_0) \times L^2}{4S} - \frac{(F-F_0)L^3}{4ls^3Y} \quad 3.7$$

Avec :

$F_0$ : force à la température de référence  $T_0$ . Pour annuler la flèche, il faut appliquer une force égale à :

$$F - F_0 = \frac{k}{2} \times \frac{Y(T-T_0) \times ls^2}{4L} \quad 3.8$$

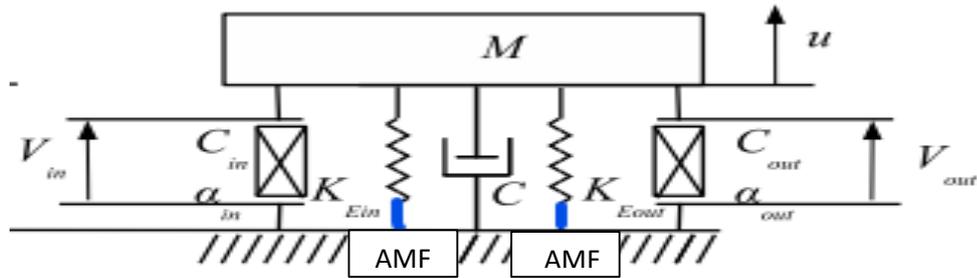
C'est également la force maximale que le bilame peut développer lors du chauffage. Elle est quatre fois supérieure pour le bilame libre par rapport à un bilame encasté d'un côté. Ceci est dû à la raideur supérieure que la structure libre manifeste.

### 3.4 Linéarisation de modèle mathématique de système

En exploitant la dernière équation (3.5) de la force ( $F$ ) on fonction de la température ( $T$ ) est définie par une équation linéaire représentés par la forme  $f(x) = A \times x$ . Le système étudie et un

system linéaire, ces derniers doivent développée sou système non linéaire on utilise plusieurs changements qui profondeur sur la longueur de matériaux avec la délation et la déformation on fonction de température.

### 3.5 Transformateur piézoélectrique à base de mémoire de forme de l'alliage



**Figure 3.4:** Transformateur piézoélectrique à base de mémoire de forme de l'alliage

Dans ce modèle, on va ajouter un fil de l'alliage à mémoire de forme (AMF) on série avec les ressorts de transformateur qui nous présentant dans le chapitre deux. Dans cette section, le modèle d'un transformateur du type parallèle ainsi que les équations en dévouant sont présentés. Le domaine de validité de ce modèle a été présenté plus haut. Le synoptique graphique est donné par la figure (3.4) : on y montre la correspondance entre le modèle {masse, ressort, amortisseur} et une structure physique. Conformément aux principes que nous avons exposés plus haute 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 primaire et secondaire. Ce modèle ne compte qu'une seule variable de déplacement.

Le chauffage du fil AMF provoque son raccourcissement dû à l'activation thermique de l'effet mémoire. Il en résulte une variation de déformation du fil AMF accompagnée d'une augmentation de la force due à l'allongement qui en résulte pour le ressort. La variation de contrainte qui en résulte dans le fil AMF. La masse M est soumise à l'action de deux cellules piézoélectriques caractérisées par leur facteur de force  $\alpha$ , leur capacité bloquée  $C_0$  ainsi que leur raideur propre  $K$ . Les paramètres sont les suivants :  $\alpha_{in}$ ,  $C_{0in}$  et  $K_{Ein}$  Pour le primaire et  $\alpha_{out}$ ,  $C_{0out}$  Et  $K_{Eout}$  Pour le secondaire. L'exposant des raideurs signifie que leurs valeurs

sont déniées à champs constant (ou en court-circuit). Les pertes mécaniques sont caractérisées globalement par la constante  $C$ .

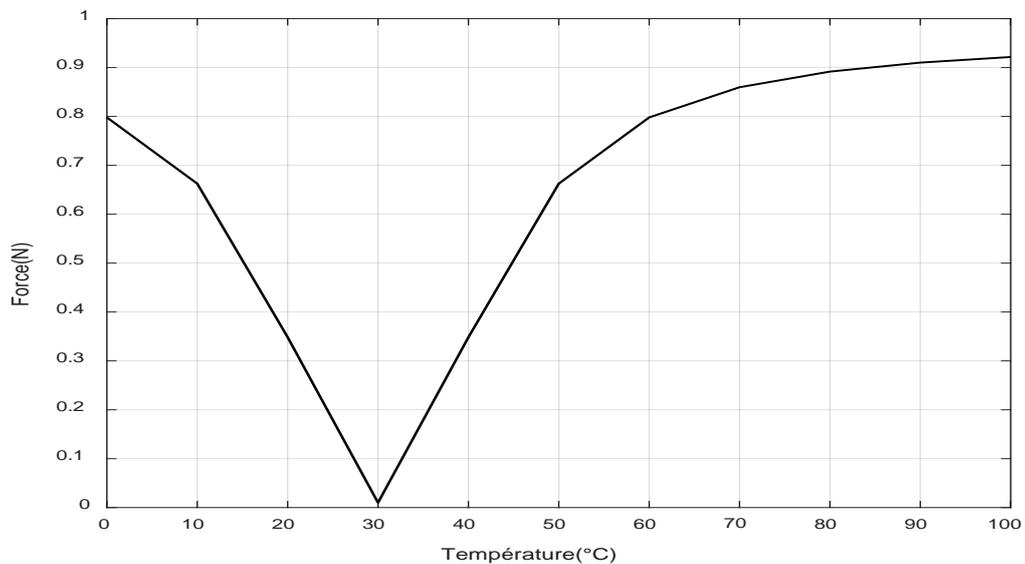
### 3.6 Simulation

#### 3.6.1 La force d'alliage à mémoire de forme en fonction de température

Le tableau (3.1) représente les caractéristiques d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF)

**Tableau 3.1:** Paramètres de simulation d'alliage de mémoire de forme (AMF) [42].

Symboles	Paramètres	Valeurs
$L_0$	Longueur initial	$20 \times 10^{-2}$
$Y$	Modules de Young	$0.03 \times 10^9$
$S$	L'épaisseur du bilame	$1 \times 10^{-3}$
$\alpha_1$ : <i>alpha 1</i>	Coefficients de dilatation thermique(CDT).	Alpha 1 = $2 \times 10^{-4}$
$\alpha_2$ : <i>alpha 2</i>	Coefficients de dilatation thermique(CDT)	Alpha 2 = $170 \times 10^{-4}$
$F_0$	Force à la température de référence $T_0$	0.01
$L$	Largeur	$1 \times 10^{-2}$
$K$	Constante	
$T$	Températures	$T = [0, 300]$



**Figure 3.5:** Force d'alliage en fonction de la température ( $T_0=30\text{ }^\circ\text{C}$ ).

La figure (3.5) illustre la variation de la force en alliage à mémoire de forme en fonction de température dans un intervalle de  $[0\text{ à }100\text{ }^\circ\text{C}]$ , la force prendre valeur maximale de  $0.92\text{ N}$  à  $T=100\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tableau 3.2:** Valeurs de la force  $F$  en fonction de la température.

$T_0\text{ (}^\circ\text{C)}$	30	30
$T\text{ (}^\circ\text{C)}$	50	100
$F\text{ (N)}$	0.66	0.92

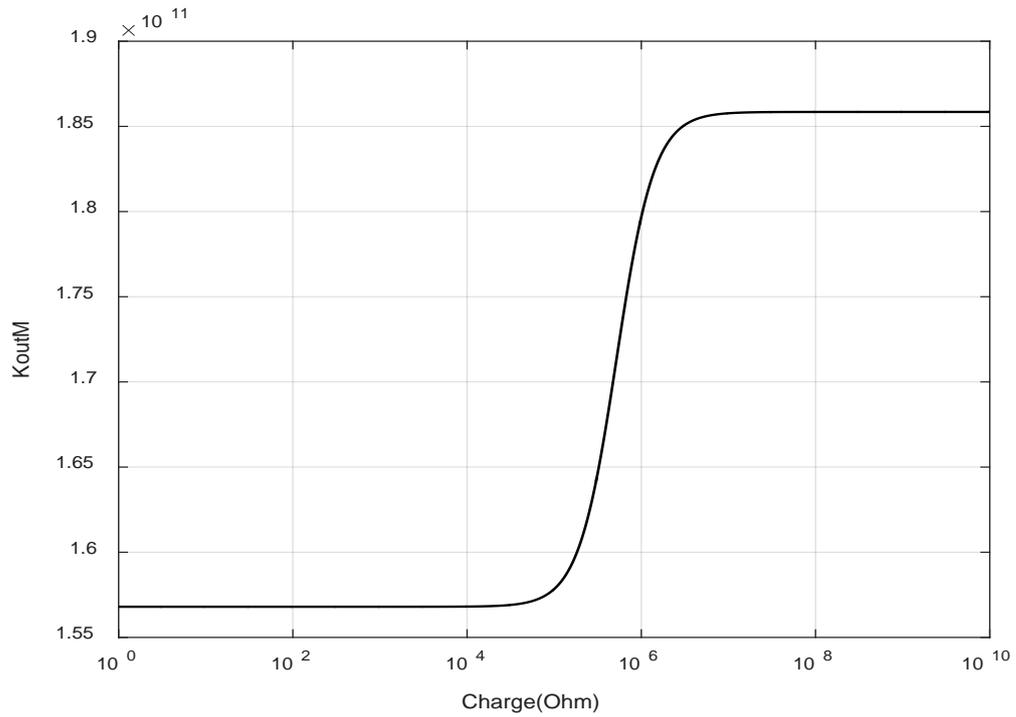
### 3.6.2 Performances de transformateur piézoélectrique sans l'alliage de forme

**Tableau 3.3:** Dimensions du transformateur piézoélectrique

$F$	$67.4 \times 10^3\text{ Hz}$
$K_{out}$	$0.1568 \times 10^{12}\text{ N.m}^{-1}$
$K_{in}$	$0.1568 \times 10^{12}\text{ N.m}^{-1}$
$M$	1 g
$\alpha_{in}$	28.0341
$\alpha_{out}$	0.3636
$C_{in}$	$4.551 \times 10^{-12}\text{ F}$
$C_{out}$	$4.551 \times 10^{-12}\text{ F}$
$Q_m$	360
$k_{eff}$	0.3875
$V_{in}$	1.8 v

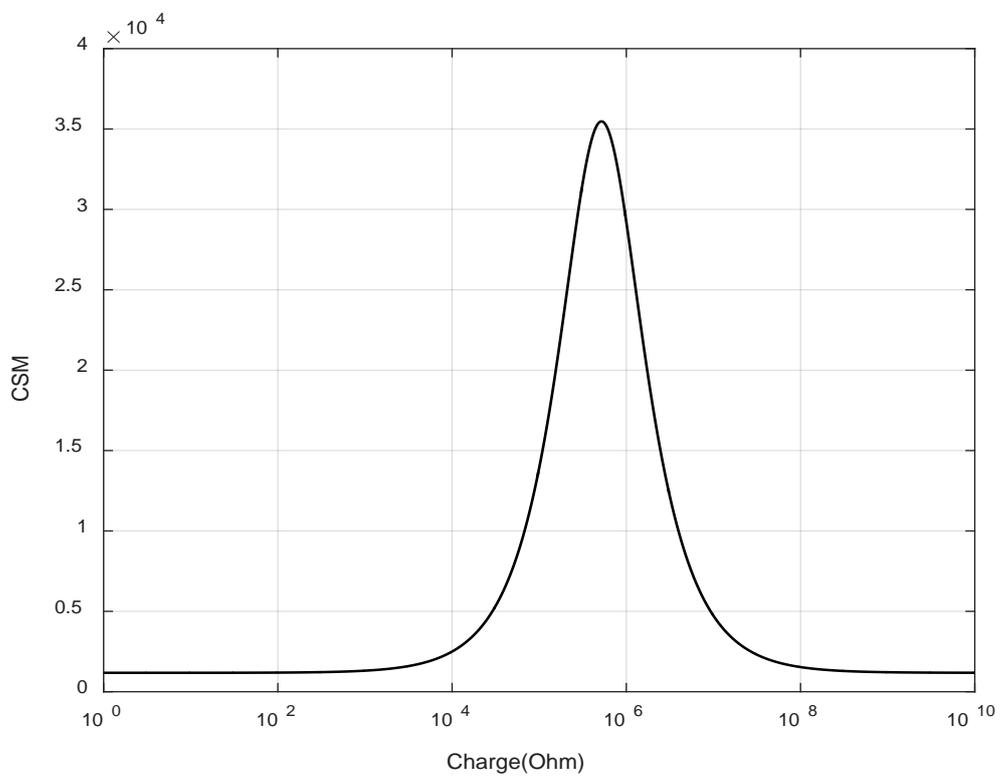
#### 3.6.2.1. Pulsation de résonance en fonction de la charge

On fait normalement la distinction entre deux types de pulsation de résonance :



**Figure 3.6:** Tracé de  $K_{outM}$  en fonction de la charge.

Figure 3.6 représente l'équation (2.12), la variation de la raideur.

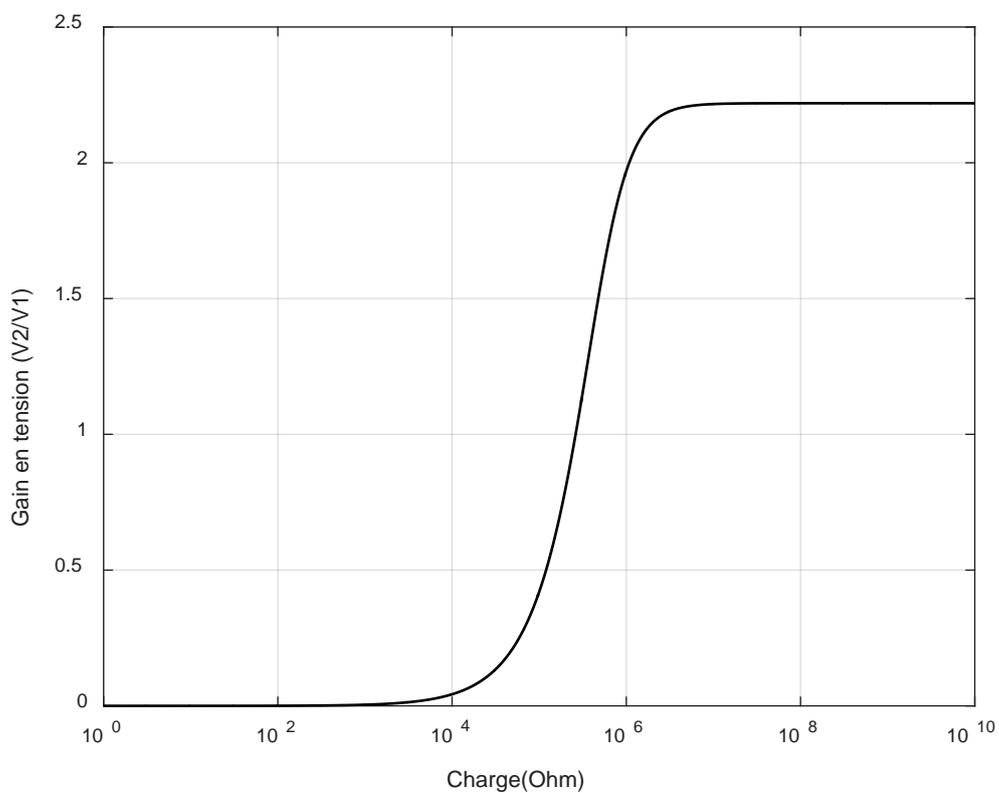


**Figure 3.7:** Tracé  $C_M$  en fonction de la charge.

La figure (3.7) représente 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 optimal. En fonction de la charge.

### 3.6.2.2. L'influence de la charge sur le gain

La représentation graphique du gain de tension en fonction de la charge est donnée par figure 3.8.



**Figure 3.8:** Gain de tension en fonction de la charge.

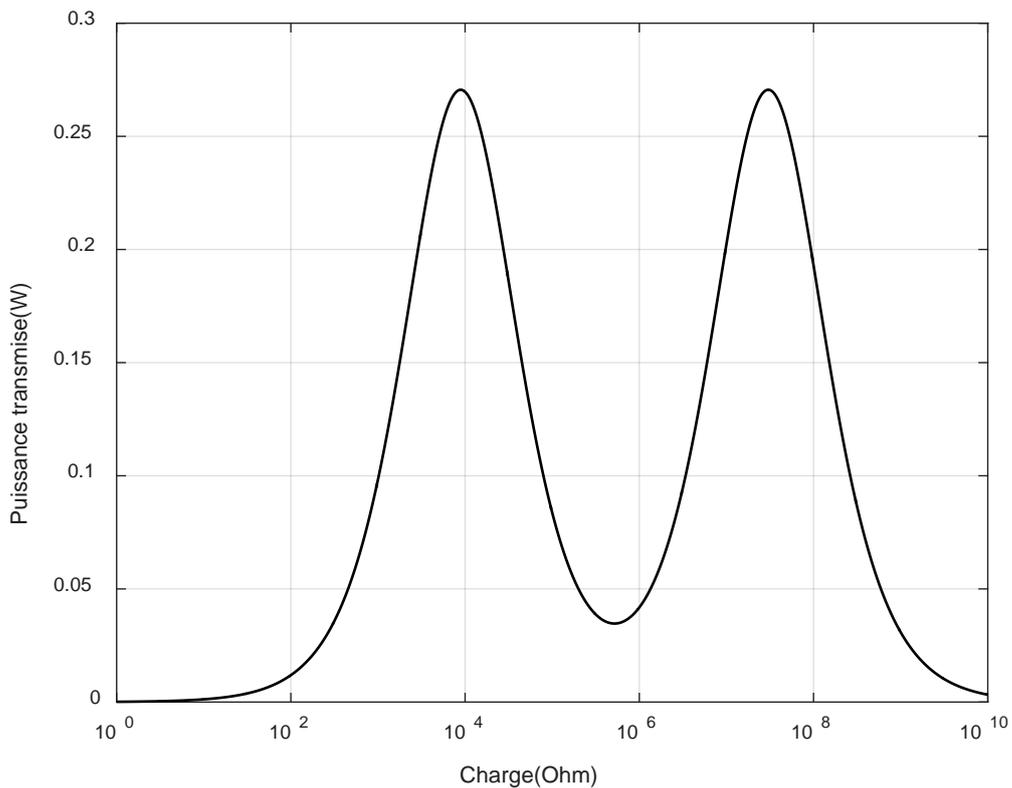
On remarque sur la figure 3.8. On peut diviser le graphe en trois parties :

1.  $[10^0 - 10^3]$  L'augmentation du gain est nul = 0 .
2.  $[10^3 - 10^6]$  L'augmentation du gain est rapide  $[0.1 - 2.3]$ .
3. Plus de  $10^6$  Le gain atteint la valeur maximale

$$2.3 = Cst$$

### 3.6.2.3. Puissance transmise

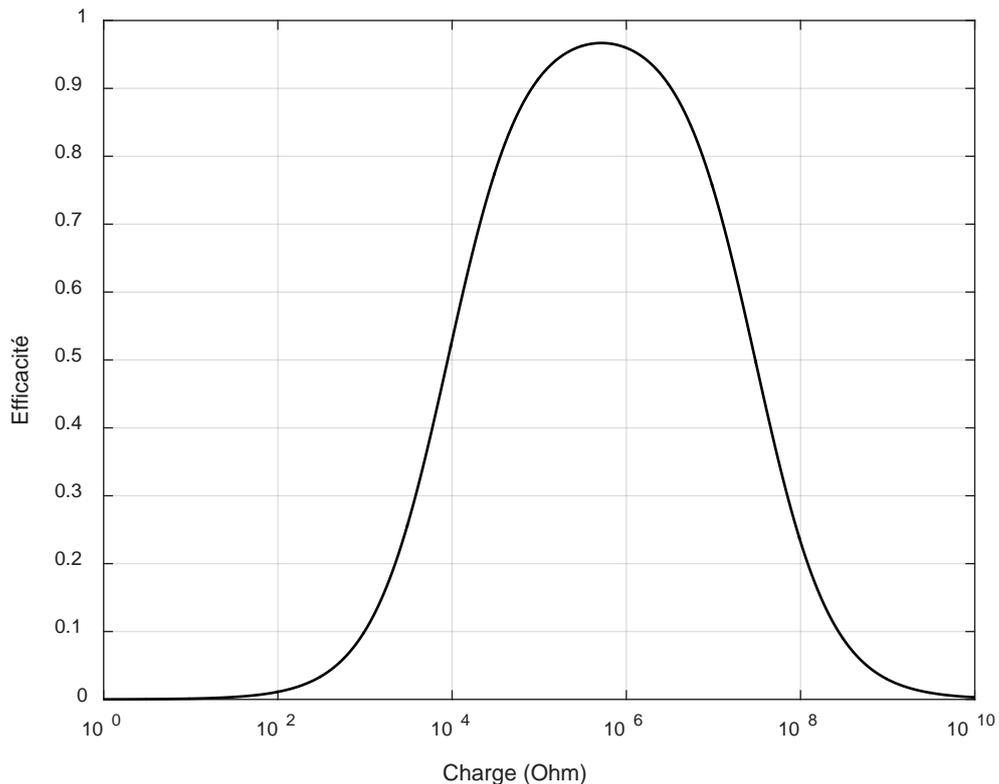
La puissance transmise à la charge est représentée sur la figure (3.9) toujours en fonction de la charge. La courbe de puissance est principalement caractérisée par trois extrema locaux : 2 maximal et 1 minimum. Ce comportement s'explique toujours par la variation de  $C_M$  : la puissance est maximale lorsque la valeur de  $C_M$  induit une conversion d'énergie du secondaire telle que le transformateur ne soit pas trop amorti. Lorsque la conversion d'énergie du secondaire est maximale, correspondant au minimum de la vitesse de vibration, l'amortissement induit ne permet pas de transférer une quantité importante d'énergie, d'où la présence d'un minimum pour cette valeur particulière de résistance. Les valeurs des trois résistances particulières sont explicitées par la suite.



**Figure 3.9:** Puissance transmise à la charge en fonction de la charge.

### 3.6.2.4. Rendement

La figure 3.10 représente l'équation (2.19) en fonction de la charge contrairement à la puissance transmise à la charge, le rendement n'admet qu'un seul maximum correspondant à la charge pour laquelle la vitesse de vibration de la structure est minimale.



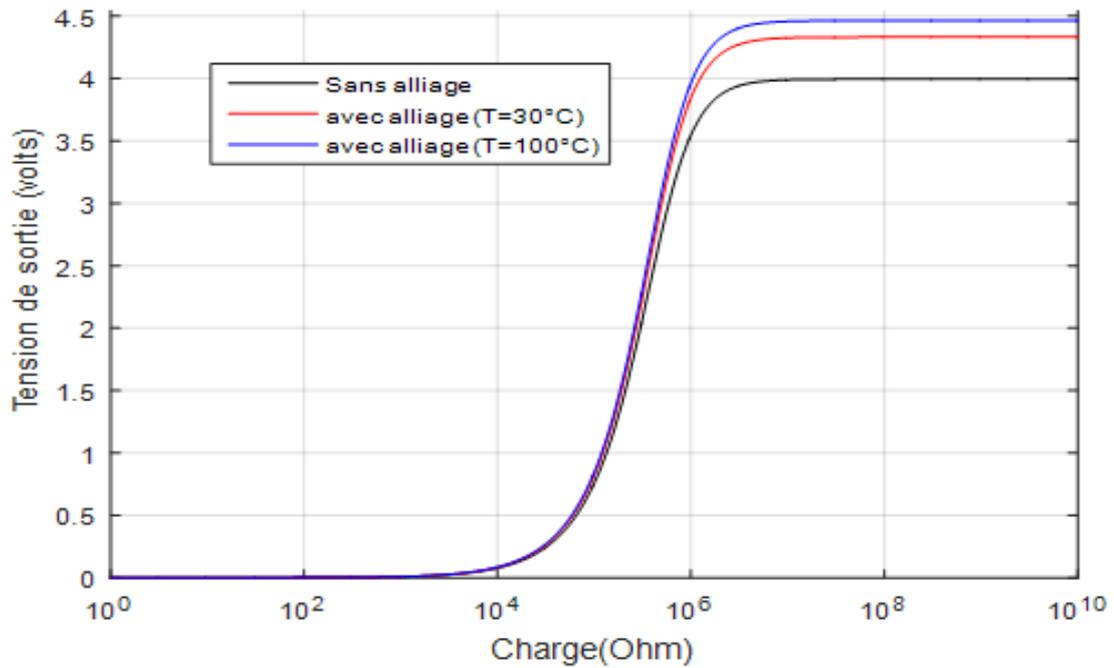
**Figure 3.10:** Rendement du transformateur en fonction de la charge.

### 3.6.3 Amélioration des performances de transformateur à base d'AMF

Les matériaux en alliage à mémoire de forme (AMF) sont une classe de matériaux modifiables en phase qui présentent une transformation en phase Martensite que sous un changement de température uniforme. L'effet de mémoire de forme peut être décrit en termes simples de la manière suivante : Un AMF peut être facilement déformé dans les conditions martensitiques à basse température et Revenir à sa configuration initiale en chauffant dans la plage de température de transformation inverse. Ce type de l'effet de mémoire de forme est appelé récupération gratuite.

Dans cette étude, on examine l'application d'un composite hybride composé de matériau piézoélectrique et de matériau AMF pour la production d'énergie. Le composite PZT-AMF est utilisé pour combiner le couplage électro élastique du PZT avec la réponse thermique de l'AMF dans le but de récupérer l'énergie thermique.

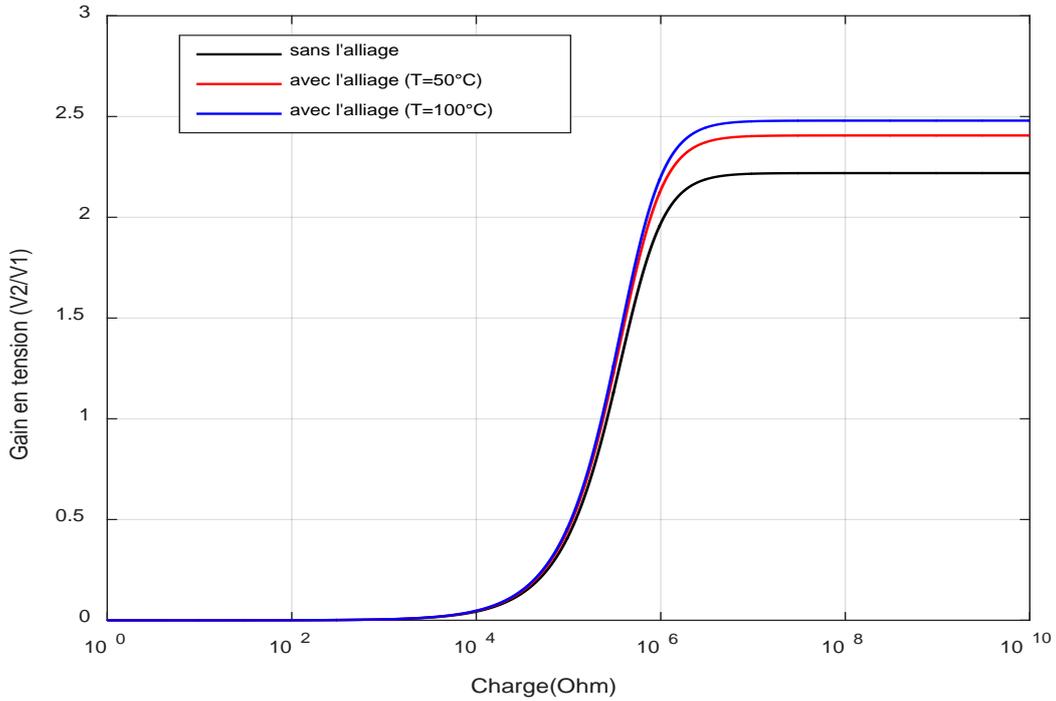
### 3.6.3.1. Tension de sortie en fonction de la charge



**Figure 3.11:** Tension de sortie en fonction de la charge ( $T_0=30^{\circ}\text{C}$ )

La figure (3.11) illustre la variation de la tension de sortie en fonction de la charge, on remarque dans cette figure que la tension de sortie sans alliage prend une valeur maximale  $4 = Cst$  et la tension de sortie avec alliage à température  $T = 30^{\circ}\text{C}$  prend une valeur maximale  $4.3 = Cst$ . À température  $T = 100^{\circ}\text{C}$  la tension avec alliage trouve une valeur maximale  $4.5 = Cst$ .

### 3.6.3.2. Gain de tension on fonction de la charge



**Figure 3.12:** Variation de gain de tension en fonction de la charge ( $T_0=30^\circ\text{C}$ )

La figure (3.12) illustre la variation de gain de tension en fonction de la charge, on remarque dans cette figure le gain de tension sans alliage prendre une valeur maximale  $2.3 = Cst$  .et le gain de tension avec alliage a température  $T = 50^\circ\text{C}$  Prendre une valeur maximale  $2.4 = Cst$  . À température  $T = 100^\circ\text{C}$  le gain de tension avec alliage trouve une valeur maximale  $2.5 = Cst$  .

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un comparaisent entre les résultats de simulation et expérimentaux, d'après les résultats obtenus, ont constaté que les résultats expérimentaux valide les résultats de simulations. Le modèle mathématique de matériaux intelligente propose (alliages à mémoire de forme) et valide par le programme de simulation et le banc expérimental,

par conséquence le matériau (alliages à mémoire de forme) donne une performance élève pour toute les applications et l'utilisation.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail présente dans ce mémoire pour l'objet d'amélioration des performances de micro-transformateur à base d'un alliage à mémoire de forme.

Le premier chapitre nous avons visé à généralités sur les matériaux intelligent, ce chapitre présentera les nouveaux matériaux intelligents et leur domaine de applications, avec une présentation générale sur le phénomène de la piézoélectricité effet piézoélectrique les classes, les matériaux piézoélectriques, Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme et leur effet.

Dans le deuxième chapitre nous avons donné un rappelle sur les transformateurs piézoélectriques, état de l'art de ce transformateur, leur principe de fonctionnement est les et structures classiques.

Le troisième chapitre on définit la technique utilisée pour modéliser le transformateur étudié qui repose sur la définition d'un schéma de Mason en commence ce chapitre par une modalisation d'un piézoélectrique vibrant en mode radial après ça, nous avons présente l'amélioration des performances du système avec un base d'alliage à mémoire de forme, en exploitant les techniques développées et les adapter pour ce type de structures. Nous donnerons à la fin de cette mémoire quelques pistes de développement et d'optimisation et nous terminerons par une conclusion et les perspectives.

L'ensemble de résultat de la variation constate que transformateur à base d'un alliage à mémoire de forme a donné une bonne performance de gain avec grande de valeur de tension.

## Bibliographie

- [1] : CHETOUH Samir. CARACTERISATION MECANIQUE DES MATERIAUX INTELLIGENTS DE TYPE MAGNETOSTRICTIFS ET LEUR APPLICATION. MENTOURI-CONSTANTINE. 2010.
- [2] : Abdelkader BENABOU, thèse Doctorat : « contribution à la caractérisation et à la modélisation des matériaux magnétiques en vue d'une implantation un code de calcul de champ », Université de LILLE I, Décembre 2002.
- [3] : Patoor E. et Berveiller M., Technologie des alliages à mémoire de forme, comportement mécanique et mise en œuvre, Paris: Hermès, 1994.
- [4] : <http://www.science-explorer.de/astronomie/astro.htm>. (25 avril 2008)
- [5] : [http://www.pxi.com/praxis\\_publicpages/CLEM.html](http://www.pxi.com/praxis_publicpages/CLEM.html). (25 avril 2008).
- [6] : [www.tiniaerospace.com](http://www.tiniaerospace.com). (21 mars 2008).
- [7] : O. Boissonneault, F. Wong, Rapport technique DRDC Valcartier, TR 2006-036, 2006.
- [8] : F. Claeys, R. L. Letty, N. Lhermet, F. Barillot, H. Fabbro et T. Maillard, « Actionneurs piézoélectriques pour du positionnement précis et rapide, dans 2 e colloque sur les matériaux électro actif et leurs applications en génie électrique (MAGELEC) », pp. 157-162, Toulouse, 2001.
- [9] : Ryhänen J., «Biocompatibility evaluation of Nickel-Ti titanium shape memory metal alloy, Ph. D. », University of Oulu, Oulu, Finland, 1999.
- [10] : [http://www.mhvi.org/owners\\_manual/proced\\_angio\\_b.asp](http://www.mhvi.org/owners_manual/proced_angio_b.asp). (25 avril 2009).
- [11] : Bailey S. R. et Boyle C. T., «Endoluminal cardiac and venous valve prostheses and methods of manufacture and delivery thereof, United States Patent and Trademark Office, USA», 2002.
- [12] : <http://perso.wanadoo.net.ma/orthobest/ortho.htm>. (25 avril 2009).
- [13] : Trochu F., Brailovski V., Vachon N. et Terriault P., Les alliages à mémoire de forme et leurs applications industrielles, Montréal, Canada : École polytechnique de Montréal, 1997.
- [14] : G. Fournet, Electromagnétisme à partir des équations locales, Masson, 1985

- [15] : F. Claeysen, R. L. Letty, N. Lhermet, F. Barillot, H. Fabbro et T. Maillard, Actionneurs piézoélectriques pour du positionnement précis et rapide, dans 2e colloque sur les matériaux électroactif et leurs applications en génie électrique (MAGELEC), pp. 157-162, Toulouse, 2001.
- [16] : V. Monturet, Conception optimale des actionneurs piézoélectriques à l'aide d'une méthodologie de type « problème inverse » - Application au cas des actionneurs répartis, Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2002.
- [17] : DU TREMOLET DE LACHEISSERIE (E.) -Magnetostriction. Theory and applications of magnetoelasticity (Magnétostriction. Théorie et applications de la magnétoélasticité). - Édit. CRC Presss Inc., 1993.
- [18] :B. Nogarède, Machines tournantes, principe et constitution, Techniques de l'ingénieur, vol. D3411, 2001
- [19] :B. Clephas, Adaptronics and smart structures, Hartmut Janocha editor, Springer-Verlag, chap. 6.2 : piezoelectric actuator, 1999.
- [20] : J. Salenson, Motorisations piézoélectriques à fonctionnement quasi-résonant ou quasi-statique : analyse des contraintes d'alimentation et expérimentation de structures innovantes, Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2000.
- [21] :C. Magnait, « traitement non-linéaire de la tension de sortie d'éléments piézoélectriques. Application aux transformateurs piézoélectriques et au contrôle de vibration de cartes électroniques », thèse de doctorat, laboratoire de génie électrique et de ferroélectricité, INSA de Lyon, 2006.
- [22] :M. L.SAHLI, modelisation et controle de sante des materiaux composites hybrides à propriété adaptables. 2009.
- [23] :L. Petit, "Conception d'un micro-generateur pour l'alimentation électrique des microsystemes," Rapport de DEA Instrumentation et Microelectronique, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, , 2003..
- [24] : 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).
- [25] : G. H. Haertling, « Ferroelectric Ceramics: History and Technology», Journal American Ceramic Society, Vol.82 , N°4(1999).
- [26] : E.BOUCHER, Elaboration et caractérisation des céramiques PZT Bi-Substituées et modélisation non-linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique. Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002. 178p.
- [27] : T.ELHADROUZ, T.BENZINEB, E.PATOOR, Micromechanical model for ferroelectric and ferroelastic single crystals. Smart Structures and Materials 2004: Active Materials: Behavior and Mechanics. Edited by Lagoudas, Dimitris C. Proceedings of the SPIE, Volume 5387, pp. 346-353 (2004).
- [28] :T. Ikeda, "Fundamentals of piézoélectricité," Oxford Université Pressa, 1990..
- [29] : P., Gonnard," Mise en œuvre et performances des matériaux piézoélectriques," MAGELEC, pp. 15-28, 1998.

- [30] : V. Piéfort., A.Preumont, "Finité élément Mödling of piezoelectric structures ," Proceedings of the Samtech User's Conference., Paris, 2001.
- [31]: Zouhair SADOUNE.THÈSE DE DOCTORAT. Modélisation et simulation des matériaux composites Piézoélectriques Cas du SiO<sub>2</sub>. 30 Novembre 2013. Rabat.
- [32]: Mohamed Lakhdar SAHLI.THESE. MODELISATION ET CONTROLE DE SANTE DES MATERIAUX COMPOSITES HYBRIDES A PROPRIETES ADAPTABLES : MATERIAUX INTELLIGENTS, SOUS L'EFFET DES EFFORTS EXTERIEURS. UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE .10/2009
- [33] : Ikeda, Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford University Press, NewYork, 1996.
- [34] : Clément Nadal. Contribution à la conception et la modélisation transformateurs piézoélectriques dédiés à la génération de plasma. 05 juillet 2011
- [35] : C. A. Rosen. Ceramic Transformers and Filters. Proceedings of the Electronic Comp. Symp. (1956). P 205-211.
- [36] : 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.
- [37] : FALIMIARAMANANA Derandraibe Jeannot, MODELISATION BIDIMENSIONNELLE DES TRANSFORMATEURS PIEZOELECTRIQUES PAR L'APPROCHE POLYNOMIALE
- [38] : T. Inoue, O. Ohnishi, and N. Ohde, Thickness mode vibration piezoelectric transformer,
- [39] : Thèse Thomas Martinez (Etude d'un transformateur piézoélectrique à onde progressive et de son application aux convertisseurs de puissance). L&#39;Université Paris-Saclay .12 Dec 2019.
- [40]: Christophe MAGNET. Thèse Traitement non-linéaire de la tension de sortie d'éléments piézoélectriques. Application aux transformateurs piézoélectriques et au contrôle de vibration de cartes électroniques. 16 Novembre 2006. INSA de Lyon
- [41] Adoum Waibaye. Création de structures actives à l'aide d'alliages à mémoire de forme. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français
- [42] Medjane Elaid. Saoud Ibrahim. L'optimisation des structures intelligente pour la récupération d'énergie vibratoire. septembre2019

