

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE 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 : Electromécanique*

# **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Électrotechnique

**Spécialité : commande électrique**

Par

- **Deboucha Silya**
- **Remmache Mouna**

*Intitulé*

***Contrôle de vibration par l'intégration des alliages à mémoire de forme  
(AMF)***

*Soutenu le : 25 juin 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. Tahi Wassila</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*

# DÉDICACES

*Je voudrais dédier ce mémoire :*

*A mon cher père et à ma chère mère, en l'honneur de leurs encouragements et de leur sacrifice.*

*A mon mari, ma sœur, ma famille et tous qui sont dignes de moi.*

*Silya*

# DÉDICACES

*Je voudrais dédier ce mémoire :*

*En signe de respect et de gratitude*

*A mon père et ma mère*

*Et à ma sœur et mes frères*

*A toute la famille et tous mes amis*

*Mouna*



# REMERCIEMENTS

Louanges et remerciements à Dieu qui nous a bénis et nous a permis d'écrire ce mémoire.

Nous avons l'honneur et le plaisir d'exprimer notre profonde gratitude à, notre promiseuse professeur Chérif Aida d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

Nous remercions aussi le président du jury et les membres du jury de ce travail.

## Liste des tableaux :

### Chapitre 1

<b>Tableau 1.1:</b> Grandeurs mécaniques et électriques	11
---	----

### Chapitre 3

<b>Tableau 3.1:</b> Caractéristique de la plaque	28
--	----

<b>Tableau 3.2:</b> Caractéristique des inserts piézoélectriques P188	28
---	----

<b>Tableau 3.3:</b> Fréquences des quatre modes de simulation de la plaque embarquée	28
--	----

<b>Tableau 3.4 :</b> Caractéristique d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF)	36
---	----

<b>Tableau 3.5:</b> Valeurs de la force maximale $F$ en fonction de la température.	37
---	----

<b>Tableau 3.6:</b> Valeurs de la force $F$ à $T=50^{\circ}\text{C}$ .	38
--	----

<b>Tableau 3.7:</b> Comparaison entre les valeurs des tensions SSDI et SSDI+alliage.	40
--	----

<b>Tableau 3.8 :</b> Comparaison entre les valeurs de déplacement SSDI et SSDI+alliage	43
--	----

## Liste des figures

### Chapitre 1

<b>Figure 1.1 :</b> Matériau intelligent	3
<b>Figure 1.2 :</b> Alliage à mémoire de forme	5
<b>Figure 1.3 :</b> Superélasticité des AMF (les valeurs numériques sont caractéristiques d'un AMF de type NiTi)	7
<b>Figure 1.4 :</b> Transformation martensitique pilotée par température sous contrainte nulle	8
<b>Figure 1.5 :</b> Effets piézoélectriques	9
<b>Figure 1.6 :</b> Classes cristallines et piézoélectriques	12

### Chapitre 2

<b>Figure 2.1 :</b> Principe des circuits de dissipation à commande passive :(a) structure séries et (b) parallèle structure	16
<b>Figure 2.2 :</b> Configuration de différent shunt circuits	16
<b>Figure 2.3 :</b> Schéma de circuit avec sources électriques	17
<b>Figure 2.4 :</b> Système de contrôle actif typique	17
<b>Figure 2.5 :</b> Type de contrôle active :(a) rebouclé ;(b) : par anticipation	18
<b>Figure 2.6 :</b> Schéma de contrôle de la fréquence de résonance par commutation de capacités	19
<b>Figure 2.7 :</b> Circuit SSDS	20
<b>Figure 2.8 :</b> formes d'onde SSDS	20
<b>Figure 2.9 :</b> Circuit SSDI	21
<b>Figure 2.10 :</b> Formes onde SSDI	21
<b>Figure 2.11 :</b> Circuit électrique SSDV	23
<b>Figure 2.12 :</b> Forme d'onde de SSDV	23
<b>Figure 2.13 :</b> Forme d'onde typique de déplacement et de voltage	23

**Figure 2.14 :** Les formes d'onde de tension typique ou  $V_a$  est la tension d'actionneur piézoélectrique et  $q_1$  est le premier déplacement modal correspondant 25

### Chapitre 3

**Figure 3.1 :** La plaque est fixée sur les quatre cotés 27

**Figure 3.2 :** Modèle (masse, ressort, amortisseur) pour un seul mode et un seul élément piézoélectrique 30

**Figure 3.3 :** Modèle (masse, ressort, amortisseur) d'une structure munie de  $n$  inserts piézoélectrique pour un mode  $m$  32

**Figure 3.4 :** Déformation d'un bilame lors du chauffage : a) état initial plat ; b) état courbé quand la température augment 33

**Figure 3.5 :** Déformation d'un bilame sous de poutre soumis à une variation de température : a) bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre 33

**Figure 3.6 :** Bilan encastrer d'un côté 35

**Figure 3.7 :** Force d'alliage en fonction de la température 37

**Figure 3.8 :** Tension d'actionneur à  $T=40^\circ\text{C}$  en fonction de temps. 39

**Figure 3.9 :** Tension d'actionneur à  $T=50^\circ\text{C}$  en fonction de temps. 39

**Figure 3.10 :** Tension d'actionneur à  $T=70^\circ\text{C}$  en fonction de temps. 40

**Figure 3.11 :** Déplacement à  $T=40^\circ\text{C}$  en fonction de temps. 41

**Figure 3.12 :** Déplacement à  $T=50^\circ\text{C}$  en fonction de temps. 42

**Figure 3.13 :** Déplacement à  $T=70^\circ\text{C}$  en fonction de temps. 42

## Abréviations et symboles

AMF	Alliage à mémoire de forme
SSD	Synchronized switch damping
SSDI	Synchronized switch damping on inducor
SSDS	Synchronized switch damping on short circuit
SSDV	Synchronized switch damping on voltage source
Mf	Fin de la martensite
Ms	Début de la martensite
Af	Fin austénitique
As	Début austénitique

## Résumé :

La vibration est un phénomène physique gênant qui peut être négatif pour de nombreuses inventions telles que les voitures, les avions et d'autres appareils électriques, c'est pourquoi l'amortissement des vibrations est devenu un sujet de recherche important pour les scientifiques. Plusieurs méthodes ont été développées pour atténuer les vibrations, y compris l'utilisation des matériaux piézoélectriques qui fonctionnent de manière (active, passive, semi active et semi-passive). les méthodes semi-passives sont plus utilisées car elles fonctionnent de manière SSDI (synchronized switch damping on inductor) mais elles consomment une grande quantité d'énergie, elles ont donc été combinées avec la mémoire de forme AMF alliages pour donner une force mécanique contrairement à la force des matériaux piézoélectriques, ce qui améliore les vibrations.

## ملخص:

الاهتزازات هي ظاهرة فيزيائية يمكن ان تكون سلبية للعديد من الاختراعات كالسيارات والطائرات وغيرها من الاجهزة الكهربائية لهذا أصبح التخميد في الاهتزازات موضوع بحث مهم لدى العلماء. تم تطوير عدة طرق لتخميد الاهتزاز كاستعمال مواد كهروضغطية التي تعمل بطرق (نشطة. سلبية. شبه نشطة وشبه سلبية). الطرق شبه السلبية هي الأكثر استعمالاً لأنها تعمل بطرق التخميد المتزامن التبدل المغو. لكنها تستهلك قدراً كبيراً من الطاقة لهذا تم دمجها مع سبائك ذاكرة الشكل التي تعطي قوة ميكانيكية عكس قوة المواد الكهروضغطية مما يحسن الاهتزاز.

## Abstract:

Vibration is an annoying physical phenomenon that can be negative for many inventions such as cars, airplanes and other electrical devices, for this reason vibration damping has become an important topic of research for scientists. several methods have been developed to dampen vibration, including the use of piezoelectric materials that work in ways (active, passive, semi active and semi passive), semi passive methods are more used because they energy, so they have been combined with shape memory alloys that give mechanical strength in contrast to the strength of piezoelectric materials, which improves vibration.

## **Table de matières**

Dédicaces

Remerciement

Liste des tableaux

Liste des figures

Abréviations et symboles

Résumés

Table de matières

Introduction general 1

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

1.1 Introduction	3
1.2 Définition des matériaux intelligents	3
1.3 Type des matériaux intelligents	3
1.3.1 Matériaux magnétostrictifs	4
1.3.2 Matériaux électrostrictifs	4
1.3.3 Alliages à mémoire de forme	5
1.3.3.1 Historique d'alliages	5
1.3.3.2 Familles d'alliage	5
1.3.3.3 Effets des alliages à mémoire de forme	6
1.3.3.4 Superélasticité	6
1.3.3.5 Transformation martensitique	7
1.3.3.6 Applications des AMF	8
1.3.4 Matériaux piézoélectriques	8
1.3.4.1 Historiques	8
1.3.4.2 Définition de la piézoélectricité	9
1.3.4.3 Effets piézoélectriques	9
1.3.4.4 Equations piézoélectriques	10

1.3.4.5 Coefficients de couplage électromécaniques	11
1.3.4.6 Classes cristallines	12
1.3.4.7 Applications des matériaux piézoélectriques [1]	12
1.4 Conclusion	13

## **Chapitre 2 : Contrôle de vibration par les matériaux piézoélectriques**

2.1 Introduction	15
2.2 Méthodes de contrôle	15
2.2.1 Contrôle passif	15
2.2.1.1 Définition	15
2.2.1.2 Inconvénients du contrôle passif	17
2.2.2 Contrôle actif	17
2.2.2.1 Définition	17
2.2.3 Contrôle semi-actif	18
2.2.4 Contrôle semi-passif	19
2.2.4.1 Technique SSDS (synchronized switch on short circuit)	19
2.2.4.2 Technique SSDI (synchronized switch damping on inductor)	20
2.2.4.3 Technique SSDV : (synchronized switch damping on voltage source)	22
2.2.5 SSDI modal	24
2.3 Conclusion	25

## **Chapitre 3 : Contrôle de vibration par l'intégration des alliages à mémoire de forme**

3.1 Introduction	27
3.2 Structure intelligente	27
3.2.1 Définition de la structure intelligente	27
3.2.2 Modélisation de la structure intelligente	28
3.2.2.1 Équation d'état mécanique	29
3.2.2.2 Équation d'état électrique	29
3.2.2.3 Équation d'état de la structure intelligent	29
3.3 Modèle modal	30
3.4 Conversion thermomécanique par bilame thermique	32

3.4.1 Modélisation du l'effet bilame	33
3.4.2 Linéarisation de modèle mathématique de système	35
3.5 Simulation	36
3.5.1 Etude des changements de la force de l'alliage à mémoire de forme en fonction de la température.	36
3.5.2 Méthode de (SSDI+alliage)	38
3.6 Conclusion	43
Conclusion générale	45

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Tous les systèmes mécaniques sont soumis à différentes conditions pouvant conduire à l'apparition de mouvements vibratoires, où les vibrations constituent un grand défi scientifique et technologique dans de nombreuses applications industrielles et divers domaines tels que l'instrumentation, l'automobile, l'aviation et l'espace, où les vibrations peuvent être une source gênante et pouvant perturber le fonctionnement du système. Le développement de systèmes de réduction de ces vibrations est un axe majeur de recherche. Ces systèmes sont représentés dans des matériaux intelligents de contrôle des vibrations, les applications deviennent adaptables et évolutives. Ces systèmes consistent à coupler des matériaux piézoélectriques avec des alliages à mémoire de forme.

Les matériaux piézoélectriques consistent à agir sur l'état mécanique des structures en modulant le champ électrique appliqué au matériau pour contrôler les vibrations en introduisant de fortes valeurs non linéaires à la tension générée par les éléments piézoélectriques pour le manipuler. Il existe également des matériaux à mémoire de forme. Ils sont connus pour leur comportement non linéaire dû à leurs propriétés magnétiques et à leur caractère dynamique. Ainsi, cela fait de l'AMF un bon domaine pour étudier les systèmes non linéaires dans une approche mécanique et adaptative. L'AMF est connu pour son caractère multifonctionnel après déformation à la chauffe. Lors du développement du cycle hystérique, cela se traduit par la capacité du matériau à dissiper l'énergie sous l'influence de la température pour avoir un amortissement élevé.

Le travail de cette thèse est lié à l'étude d'une technique particulière de manipulation de cette tension où cette technique augmente l'effet de conversion électromécanique des matériaux piézoélectriques, appelée technologie SSDI. Il se caractérise par son auto-actionnement utilisant de l'énergie électrique convertie. Il consiste à inverser la tension lorsqu'elle atteint son maximum, qui est commandé par un interrupteur électronique mais ne peut contrôler les modes de vibration en raison du nombre de signaux de tension de faibles amplitudes qu'il faut inverser dans un temps court et insuffisant pour maximiser la tension du transducteur, nous suggérons donc la technologie modale SSDI. Le principe de la façon de générer et d'améliorer la tension d'un élément piézoélectrique proche de l'étage de vitesse standard cible en utilisant une partie de l'énergie potentielle non cible.

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur les matériaux intelligents**

## 1.1 Introduction

Les matériaux intelligents sont des matériaux modifiés qui ont la capacité de changer leurs propriétés sous une certaine influence à laquelle ils sont soumis, comme la chaleur ou les aimants. La découverte des matériaux intelligents au 19<sup>ème</sup> siècle a été faite par les frères Curie qui ont découvert que le quartz produit de l'énergie électrique lorsqu'ils sont exposés à une pression mécanique. Puis les études et les recherches se sont développées, ce qui a conduit à développer ces matériaux et à développer leurs domaines d'utilisation. Dans ce chapitre, nous allons découvrir ces matériaux intelligents, leurs types et leurs utilisations.

## 1.2 Définition des matériaux intelligents

Les matériaux intelligents ou « smart materials » sont des matériaux apparus dans les années 80 aux États-Unis d'Amérique. Ce sont des matériaux capables de modifier automatiquement leurs propriétés physiques notamment sa forme, sa connectivité, sa viscosité ou sa couleur en raison de facteurs naturels tels que la chaleur et les champs magnétiques et de contraintes mécaniques. Les matériaux intelligents sont sensibles, adaptatifs et évolutifs [1]. Ils sont des matériaux multifonctionnels qui peuvent être :

- Un capteur qui détecte des signaux.
- Un actionneur qui effectue une action sur son environnement.
- Processeur traité, comparer, stocker des informations.

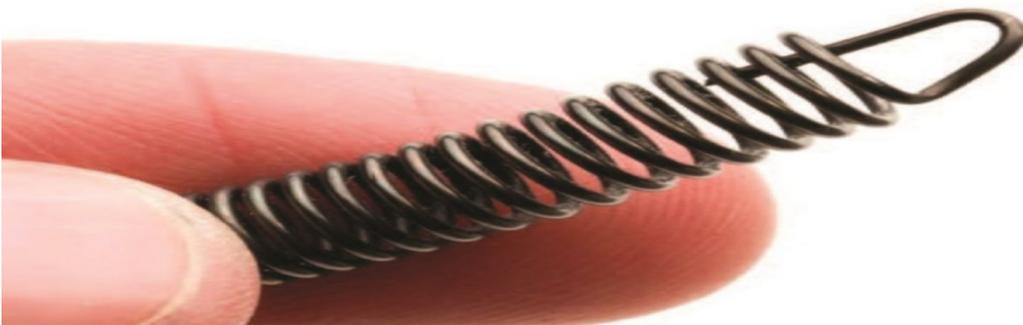


Figure 1.1 : Matériau intelligent [4]

## 1.3 Type des matériaux intelligents

Les matériaux intelligents sont composés d'entre autres de matériaux piézoélectriques, de matériaux électrostrictifs, de matériaux magnétostrictifs, des alliages à mémoire de forme.

Chaque type de matériaux à des qualités différentes qui sont mise à profit, au mieux, selon les domaines d'utilisation demandée les matériaux sur lesquels [2].

### **1.3.1 Matériaux magnétostrictifs**

La magnétostriction est une propriété des matériaux magnétiques qui les fait changer de forme ou de dimensions au cours du processus de magnétisation. La variation de l'aimantation des matériaux due au champ magnétique appliqué modifie la déformation magnétostrictive jusqu'à atteindre sa valeur de saturation,  $\lambda$ . Le phénomène fut découvert pour la première fois par James Prescott Joule 1874 qui démontra son existence en mesurant l'allongement d'un échantillon de fer soumis à un champ magnétique, matériau magnétostrictif est constitué de minuscules ferromagnétiques. Ces ferromagnétiques, généralement du fer, du nickel ou du cobalt, les ferromagnétiques agissent comme de minuscules aimants permanents. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué au matériau, les aimants situés au hasard réalignent avec l'axe du champ. Cette nouvelle structure ordonnée provoque l'étirement ou le rétrécissement du solide. Lorsqu'une force mécanique est appliquée à ces matériaux, l'effet inverse se produit : le matériau induit un champ magnétique (effet Villari). Ce champ peut être utilisé pour créer un courant électrique et ainsi traduire l'énergie mécanique en énergie électrique [5].

Les principaux usages de la magnétostriction concernent :

- L'émission de sons à basse fréquence en milieu sous-marin (sonar).
- La génération d'ultrasons (applications médicales ou industrielles).
- La réalisation de moteurs linéaires (utilisée par exemple sur machine-outil).
- La mesure de force ou de couple.

### **1.3.2 Matériaux électrostrictifs**

Est une propriété de tout matériau non conducteur, ou diélectrique, qui consiste en une modification de sa forme sous l'effet d'un champ électrique appliqué. Elle est l'équivalent électrique de la magnétostriction. Ces matériaux sont des polymères, des monocristaux ou des céramiques (couches minces ou massives).

L'électrostriction est une propriété de tous les diélectriques due à la présence de domaines électriques répartis aléatoirement à l'intérieur du matériau. Lorsqu'un champ électrique est appliqué chaque domaine se polarise suivant l'axe du champ. Les côtés opposés des domaines se chargent de façon opposée et s'attirent mutuellement, provoquant une réduction de leur dimension dans la direction du champ électrique (et conjointement un allongement de leurs

dimensions perpendiculaires au champ, dans les proportions du coefficient de Poisson). La déformation résultante est proportionnelle au carré du module du champ électrique : on dit qu'il s'agit d'un effet du deuxième ordre [5].

Comme application des matériaux électrostrictifs: afficheurs sonar pour sous-marins et actionneurs de navires de surface à petit déplacement [18].

### 1.3.3 Alliages à mémoire de forme

C'est un alliage qui possède de nombreuses propriétés physiques comme la capacité de se souvenir de sa forme première ou de revenir après déformation lorsque la température change.

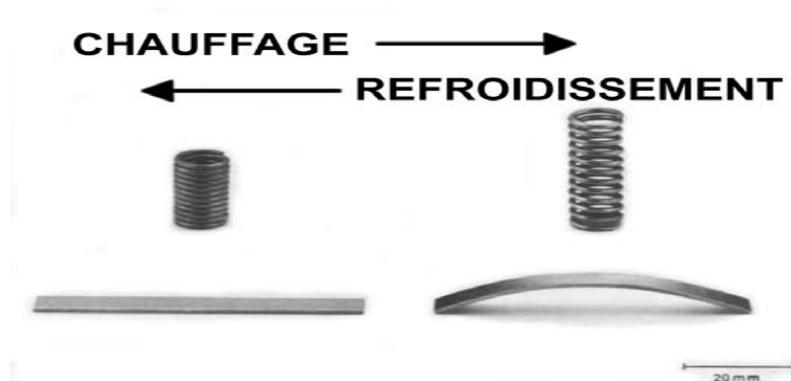


Figure 1.2 : Alliage à mémoire de forme [3].

#### 1.3.3.1 Historique d'alliages

L'effet de la mémoire a été observé pour la première fois en 1939 sur des alliages cuivre-aluminium par des chercheurs russes, puis des chercheurs américains ont montré qu'un alliage d'or et de cadmium change de forme et est capable de retrouver sa forme première sous l'influence de la chaleur. Cette propriété a été découverte sur les alliages de nickel et de titane, puis les recherches se sont largement multipliées dans les années 80 pour bien comprendre ce phénomène et ont été utilisées pour la première fois dans le traitement des tubes d'avions [4].

#### 1.3.3.2 Familles d'alliage

Il existe de nombreuses familles d'alliages à mémoire de forme dont les plus célèbres sont le titane, nickel (Ti-Ni) et alliages de cuivre (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be). Il a de bonnes propriétés thermomécaniques et son prix est bas [2] :

- Alliages d'or (Cu-Au-Zn, Au-Cd).
- Alliages d'argent (Ag-Cd).
- Alliages de fer (Fe-Cr-Ni-Ca, Fe-Mn-Cr-Ni-Si)

### 1.3.3.3 Effets des alliages à mémoire de forme

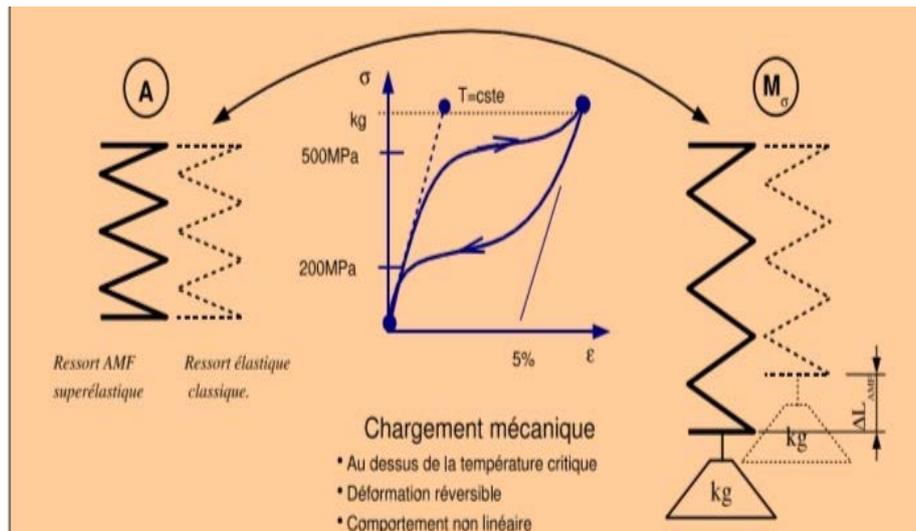
Les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) regroupent un ensemble d'alliages métalliques présentant diverses propriétés [5] :

- La super élasticité : l'alliage est capable de se déformer énormément (jusqu'à 10 %) de manière réversible sous l'effet d'une contrainte.
- L'effet mémoire simple sens : l'alliage est capable de retrouver par chauffage sa forme initiale après une déformation mécanique.
- L'effet mémoire double sens : l'alliage est capable après « apprentissage » d'avoir deux positions stables, l'une au-dessus d'une température dite critique et l'autre en dessous.
- L'effet caoutchoutique : l'alliage (sous forme martensitique auto-accommodée) subissant une déformation conserve au relâchement une déformation résiduelle ; si le matériau est à nouveau contraint puis déchargé, cette déformation résiduelle augmente.
- L'effet amortissant : l'alliage est capable d'amortir des chocs ou d'atténuer des vibrations mécaniques. En effet la super-élasticité ou même simplement l'élasticité de la phase martensitique présentent un phénomène d'hystérésis qui entraîne une dissipation de l'énergie.

### 1.3.3.4 Superélasticité

C'est une substance que l'on chauffe à température ambiante et que l'on refroidit afin d'obtenir un effet de mémoire de forme. Lors d'un chargement mécanique et à température constante on observe une déformation supplémentaire des ions (inélastique). après décharge mécanique lorsque le matériau se rétracte et reprend sa forme première, c'est ce qu'on appelle l'effet super-élastique.

Lors de l'application d'une contrainte (plus la contrainte est élevée, plus la température est élevée) un changement de comportement se produit, c'est-à-dire que lorsqu'une contrainte élevée est appliquée, la température est égale puis supérieure à la température ambiante, ce qui entraîne un changement de comportement du matériau résultant de ce comportement non linéaire avec une première phase de déformation caractérisée par la dureté élasticité classique puis une phase dans laquelle la pression reste quasi constante, le matériau se déforme, cette déformation est limitée à une valeur maximale de la déformation, où le comportement est élastique comportement et est également réversible après retour à une pression nulle, où le matériau retrouve sa forme initiale (Figure 1.3) [14].



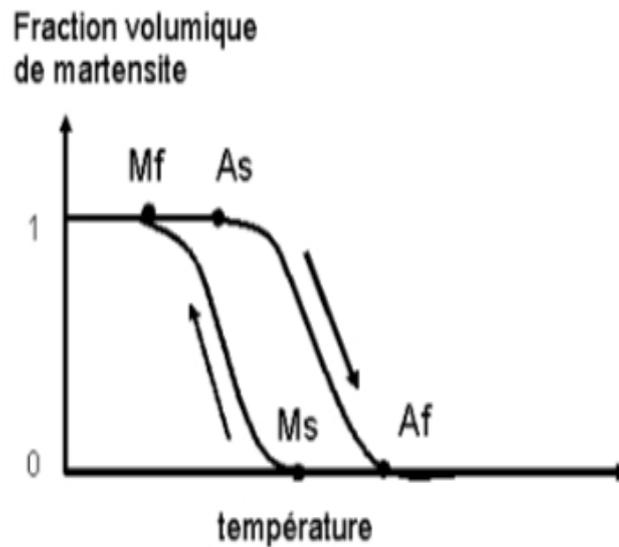
**Figure 1.3 :** Superélasticité des AMF (les valeurs numériques sont caractéristiques d'un AMF de type NiTi) [14]

### 1.3.3.5 Transformation martensitique

Est une transformation qui se produit dans l'espace lors du processus de refroidissement après la fin de la phase d'investissement à haute température. Il y a deux phases dans le métamorphisme martensitique : une phase stable à haute température austénite et l'autre phase stable à basse température martensite.

La transformation martensitique est une transformation de phase à l'état solide avec déformation homogène du réseau cristallin [15].

Le terme déplacement signifie que les atomes se déplacent à de petites distances de l'ordre de 1/10 de la distance entre les atomes dans un mouvement coopératif, donc la diffusion des atomes est inexistante et la transformation se fait très rapidement (de l'ordre de la vitesse du son au milieu) sans changer la composition chimique. La déformation homogène du réseau dans le cas général est pour une combinaison de mesure de composante oblique (maclage) et de dilatation. Dans le cas des AMF, la transformation martensitique a lieu avec une variation de volume très faible ce qui est la différence majeure par rapport aux autres alliages métalliques notamment les aciers et confère aux AMF leurs propriétés particulières. Dans le cas du refroidissement, le processus de transformation de l'austénite en martensite commence à une température de Ms (le début de la martensite) et se termine à une température de MF (la fin de la martensite). Lorsque la température est augmentée, la transformation inverse commence à une température As (début austénitique) et de AF (fin austénitique). Il existe en effet une hystérésis en température entre le refroidissement et le chauffage (Figure 1.4) [15].



**Figure 1.4 :** Transformation martensitique pilotée par température sous contrainte nulle [15].

### 1.3.3.6 Applications des AMF

Les alliages à mémoire ont été utilisés dans de nombreux domaines, comme la médecine : broches pour fractures osseuses, fils orthodontiques, montures de lunettes.

Appareils électriques tels que moteurs et robots, aspirateurs. Il a également été utilisé dans la construction, lors de la pose de béton sur des fissures.

En 2017 des chercheurs ont mis au point le premier robot capable de se déplacer à l'aide d'alliages à mémoire de forme [5].

## 1.3.4 Matériaux piézoélectriques

### 1.3.4.1 Historiques

L'effet piézoélectrique a été vu pour la première fois en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie, qui ont montré le premier effet piézoélectrique en utilisant des cristaux de normaline et de quartz, à travers lesquels ils ont observé l'effet piézoélectrique dit direct.

Puis, en 1881, l'effet piézoélectrique inverse a été découvert, selon lequel les cristaux se déforment lorsqu'ils sont polarisés à une vitesse proportionnelle au champ piézoélectrique [6].

Puis, les recherches dans ce domaine et ont été appliquées lors de la première guerre mondiale en 1917. Elles ont été utilisées pour créer des sonars, un appareil qui détecte la position des sous-marins.

En raison de l'intérêt récurrent pour les matériaux piézoélectriques, une plus grande attention a été accordée à ces matériaux ainsi qu'à l'intérêt de développer davantage de dispositifs utilisant des matériaux piézoélectriques synthétiques et a été appliqué pendant la seconde guerre mondiale, comme la télévision et la radio.

### 1.3.4.2 Définition de la piézoélectricité

Le terme piézoélectricité vient du mot grec piezein, qui signifie pression. La piézoélectricité est constituée de cristaux et de certains matériaux céramiques qui ont la capacité de générer une tension à la suite d'une pression mécanique est appliquée. Lorsqu'une pression mécanique est appliquée à un matériau piézoélectrique des charges électriques apparaissent de sorte que la tension est proportionnelle à la contrainte [7].

### 1.3.4.3 Effets piézoélectriques

Le terme piézoélectricité désigne la propriété que connaissent certains objets parce qu'ils sont électriquement polarisés, c'est-à-dire de générer un champ ou une tension électrique sous l'influence d'une contrainte mécanique, et c'est appelé un effet piézoélectrique direct (Figure 1.5 (a)). On a également observé un effet piézoélectrique inverse qui conduit à un potentiel électrique appliqué à un matériau aux propriétés piézoélectriques pour modifier les dimensions de ce matériau (Figure 1.5 (b)) [1].

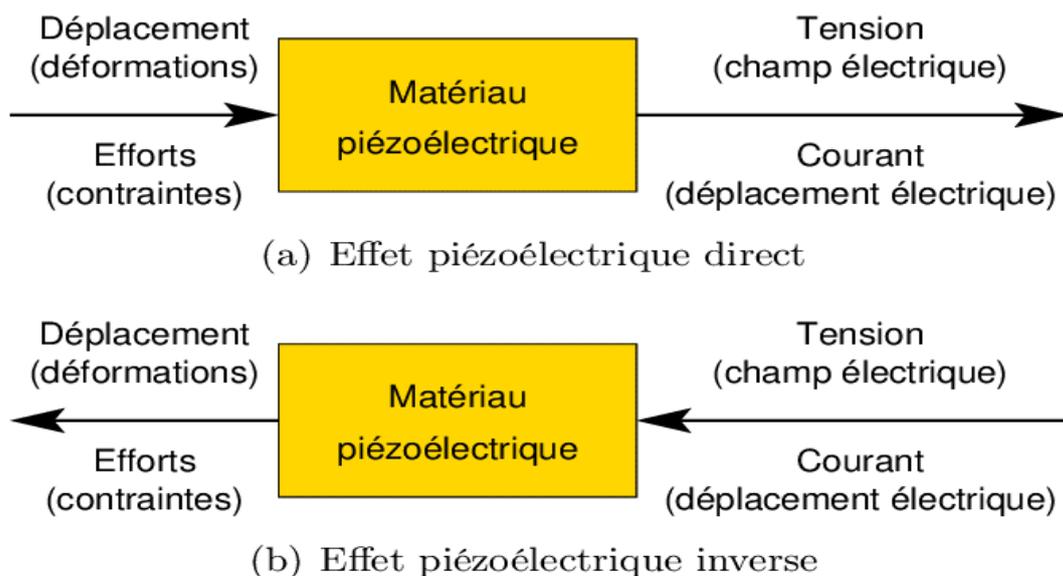


Figure 1.5 : Effets piézoélectriques [9].

#### 1.3.4.4 Equations piézoélectriques

Le phénomène piézoélectrique est un phénomène qui convertit l'énergie mécanique e énergie électrique et inversement, c'est-à-dire que les équations sont des grandeurs mécaniques et électriques [8].

$$\begin{cases} S = s^E + d^t E \\ D = dT + \varepsilon^T E \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} T = c^E S - e^t E \\ D = eS + \varepsilon^S E \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{cases} S = s^D T + g^t D \\ D = -gT + \beta^T D \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} T = c^D S - h^t D \\ E = -hS + \beta^S D \end{cases} \quad (1.4)$$

$S$  et  $T$  sont des grandeurs mécaniques,  $D$  et  $E$  sont des grandeurs électriques.

**Tableau 1.1:** Grandeurs mécaniques et électriques [8].

Nom	Symbole	Taille	Unité
Déformation	S	6*1	N/m <sup>2</sup>
Contrainte	T	6*1	V/m
Champ électrique	E	3*1	C/m <sup>2</sup>
Induction électrique	D	3*1	C/m <sup>2</sup>
Compliance ou souplesse élastique	S	6*6	m <sup>2</sup> /N
Raideur ou constante élastique	C	6*6	N/m <sup>2</sup>
Permittivité électrique	E	3*3	F/m
Imperméabilité diélectrique	B	3*3	m/F
Constant piézoélectriques associés aux différentes formes des équations constitues	D	3*6	C/N
	E	3*6	C/m <sup>2</sup>
	G	3*6	m <sup>2</sup> /C
	H	3*6	N/C

#### 1.3.4.5 Coefficients de couplage électromécaniques

Des coefficients de couplage électromécanique sont généralement utilisés pour caractériser l'efficacité d'un matériau piézoélectrique ils caractérisent la quantité d'énergie mécanique qu'un matériau est capable de transformer en énergie électrique et inversement [9].

$$k^2 = \frac{\text{Energie électrique stockée}}{\text{Energie mécanique fournie}} = \frac{\text{Energie mécanique stockée}}{\text{Energie électrique fournie}} \quad (1.5)$$

La seconde définition consiste à simplement définir  $k$  à partir d'une des relations piézoélectriques [9]

$$k^2 = \frac{\text{constante piézoélectrique}^2}{\text{constante élastique} * \text{constante diélectrique}} \quad (1.6)$$

La valeur de ce coefficient varie suivant la forme du matériau et la direction de sa déformation.

### 1.3.4.6 Classes cristallines

Il existe 32 classes cristallines réparties en 21 non centrosymétrique et 11 centrosymétrique, ces 21 classes, dont 1 sont non piézoélectriques et 20 piézoélectriques, qui se divisent en 10 pyroélectriques en l'absence de champ extérieur et sont naturellement polarisées dans une direction Ils sont dits thermoélectriques et polaires du fait de la polarisation spontanée avec la température. Sur les 10 il y a 9 ferroélectriques dont le sens est automatique, qui peuvent être redirigés voire inverser sous l'influence d'un champ électrique extérieur.

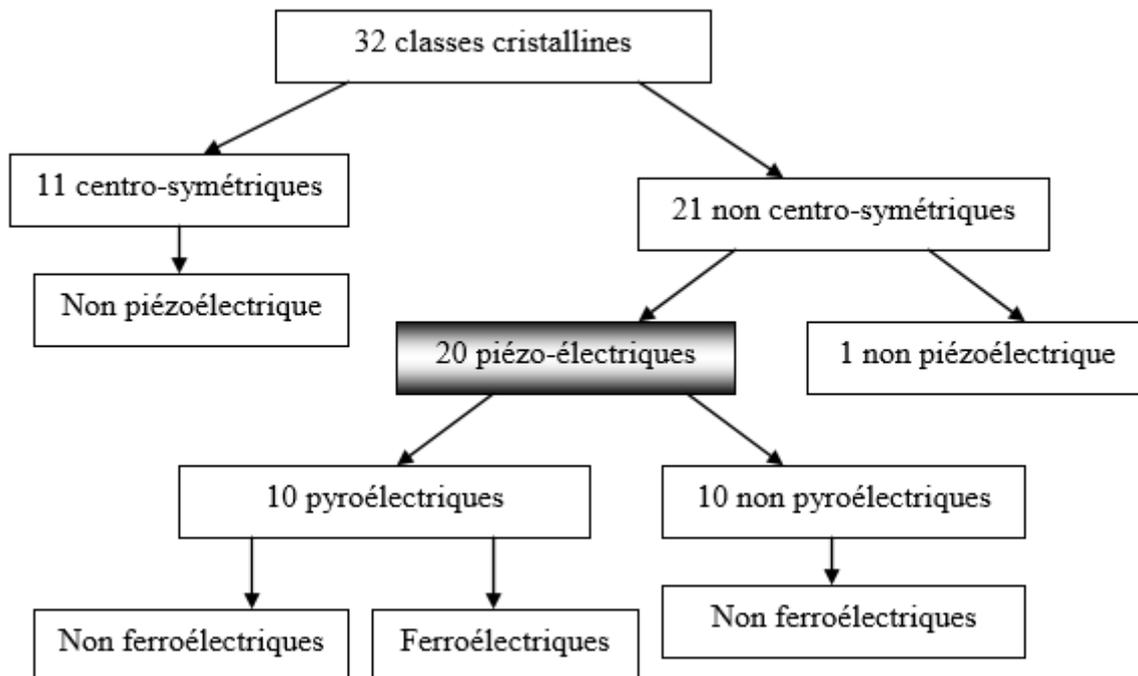


Figure 1.7: Classes cristallines et piézoélectriques [8].

### 1.3.4.7 Applications des matériaux piézoélectriques [1]

- Un hydrogel imprimable en 3D qui change de forme à la lumière.
- Un pansement connecté qui détecte et soigne les infections.
- Un revêtement caméléon qui change de couleur quand on l'étire.
- Un écran qui s'auto répare.
- Une nappe qui reconnaît ce qui est posé sur une table.

## **1.4 Conclusion**

Les matériaux intelligents sont des matériaux largement utilisés dans plusieurs domaines qui se sont développés à travers les âges et ont plusieurs domaines d'utilisation tels que la médecine, les appareils électriques et les voitures. Ils ont évolué à travers les âges et ont plusieurs types. Nous avons étudié deux types de matériaux piézoélectriques qui sont des matériaux qui se déforment sous l'influence d'un champ électrique, ainsi que des alliages à mémoire de forme caractérisés par un couplage thermomécanique car ils sont peu nombreux à déformer à froid la martensite en une phase solide et souple à haute température austénite, fortement développés car ils ont été utilisés comme solutions pour amortir.

**Chapitre 2 :**

**Contrôle de vibration par les**

**matériaux piézoélectriques**

## **2.1 Introduction**

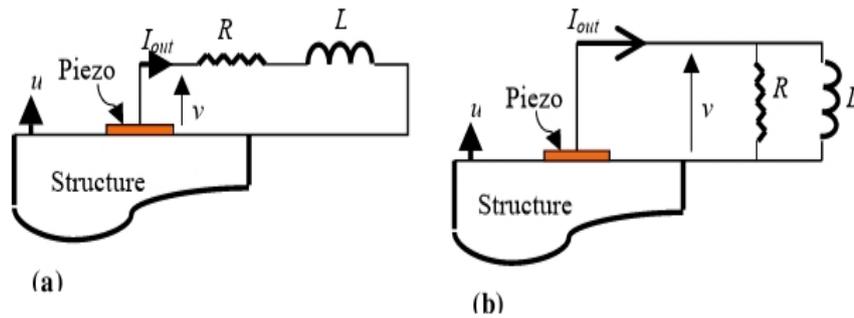
Les vibrations mécaniques sont des phénomènes inquiétants qui causent de nombreux dommages aux équipements électriques et aux systèmes mécaniques ainsi que du bruit. Par conséquent, le phénomène de vibration est devenu un problème pour les chercheurs. Au fur et à mesure que la recherche s'est étendue pour trouver des solutions à ces vibrations, parmi ces solutions l'ajout des matériaux piézoélectriques. Les techniques de contrôle vibration peuvent être divisées en deux parties, selon les circuits électriques utilisés actifs et passifs, les systèmes actifs utilisent des capteurs et des moteurs pour réduire les vibrations, mais c'est une méthode coûteuse et difficile, donc de petites batteries ont été utilisées à la place des moteurs pour être appelée technologie de contrôle semi-actif. Quant aux systèmes passifs, ils dépendent de circuits électriques reliés à des éléments piézoélectriques tels qu'une résistance, afin d'obtenir de meilleurs résultats, ils ont été développés dans un laboratoire LGEF un contrôle semi-passif qui fonctionne par les techniques SSD.

## **2.2 Méthodes de contrôle**

### **2.2.1 Contrôle passif**

#### **2.2.1.1 Définition**

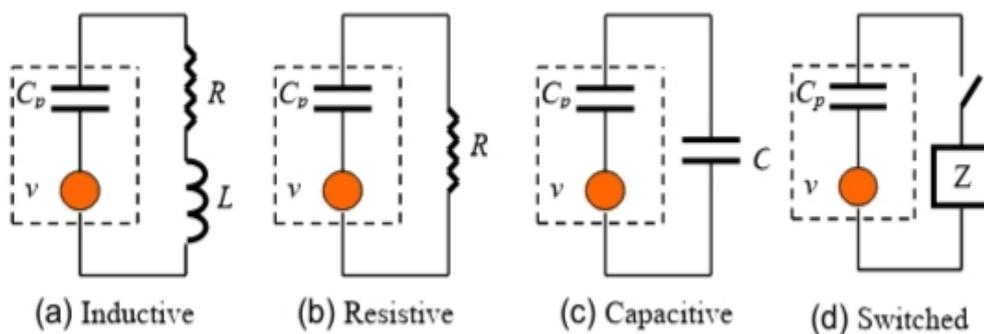
Les techniques passives utilisent l'amortissement structurel des vibrations sans aucune interférence externe, ce qui signifie qu'elles ne nécessitent ni énergie ni information pour fonctionner. C'est un circuit composé de composants passifs auxquels est connecté un élément piézoélectrique, tel qu'une résistance, afin de dissiper l'énergie électrique résultant de l'élément ajouté (résistance) afin d'ajuster judicieusement la résistance du circuit. La plupart des études suggèrent de l'ajuster. Avec l'une des modes de vibration de la structure. Le circuit résistif ainsi réalisé au même effet que l'ajout d'une couche viscoélastique (faible atténuation sur une plage de fréquences relativement large) [11]. Les circuits les plus couramment utilisés sont des circuits constitués d'une inductance et d'une résistance connectées en série ou en parallèle avec un élément piézoélectrique tel qu'une capacité (Figure 2.1) [7].



**Figure 2.1** : Principe des circuits de dissipation à commande passive :(a) structure séries et (b) parallèle structure [7].

Il est également possible de construire un circuit RLC avec des propriétés dynamiques similaires à un système d'amortissement ressort-masse. Lorsque la structure vibre, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique au moyen d'un élément piézoélectrique. Cette énergie électrique entraîne le courant à travers la résistance et l'inductance du circuit de conversion. Lorsque la fréquence de résonance du circuit est réglée jusqu'à une certaine valeur, le circuit tire une grande valeur de courant de la correction piézoélectrique à cette fréquence. Si bien que le système électromécanique perd une partie de son énergie à cause de l'énergie thermique. Résultant de la dissipation de courant dans la résistance.

Il existe également des circuits qui incluent une inductance avec résistance en parallèle avec un condensateur piézoélectrique qui est similaire à un absorbeur de vibrations mécaniques et c'est l'un des circuits fréquemment utilisés ( Figure 2.2) [7]



**Figure 2.2** : Configuration de différent shunt circuits [7].

Plusieurs études ont été menées pour améliorer l'amortissement des vibrations à l'aide de matériaux piézoélectriques, où deux modèles basés sur la conversion d'énergie ont également été présentés, un modèle électrique (résistance capacitive + sources électriques) et un modèle

mécanique (force + ressort + amortisseur), tous deux liés aux matériaux piézoélectriques, où les résultats ont été positifs (figure 2.3) [7].

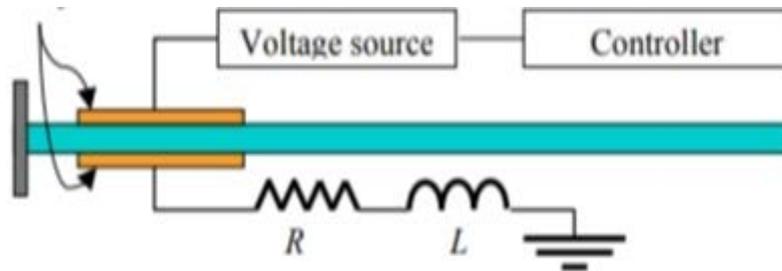


Figure 2.3: Schéma de circuit avec sources électriques [7]

### 2.2.1.2 Inconvénients du contrôle passif

- La valeur de l'inductance peut être importante, ce qui empêche son utilisation dans des applications légères.
- La technique shunt résonnant ne peut être compatible qu'avec un seul mode structurel. Ce qui a conduit au développement du contrôle des vibrations sonores vers un contrôle semi-passif [7].

## 2.2.2 Contrôle actif

### 2.2.2.1 Définition

Ce type de contrôle est généralement plus performant que l'approche passive. Les techniques actifs ont suggéré d'utiliser une chaîne de traitement complète pour surmonter le problème des performances limitées et du contrôle précis à large bande, comprenant des capteurs, un module de calcul, des amplificateurs de puissance, des moteurs, un amplificateur et des actionneurs (Figure 2.4) [12].

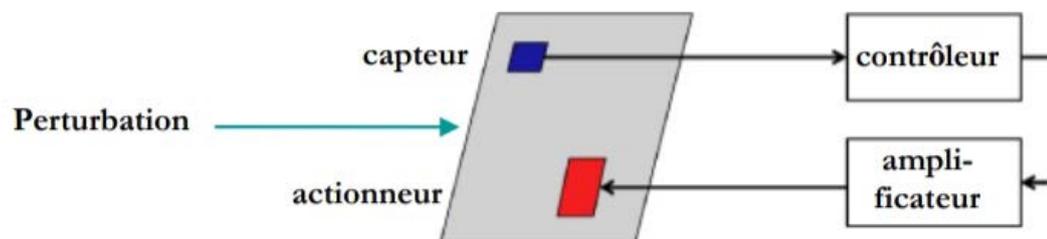


Figure 2.4 : Système de contrôle actif typique [12].

Le principe est utilisé le système de contrôle actif principal est une source externe pour générer des forces qui interfèrent avec la vibration du système pour la réduire. Cette méthode nécessite d'utiliser une chaîne de traitement complète comprenant des capteurs et une unité de contrôle avec un bon modèle de la structure pour obtenir l'état vibratoire ou sonore.

Pour contrôler ses différents éléments un système de gestion avancé doit être utilisé (un microcontrôleur (DSP) calcule le contrôle optimal pour la réduction des ondes. Il est clair que la performance du contrôle actif dépend des méthodes de là des plus simples (comme le contrôle proportionnel, P...) aux plus complexes comme les algorithmes H ou l'utilisation de moniteurs. Mais toute approche peut être envisagée soit une brève séquence soit un feed-forward comme le montre (la Figure 2.5).

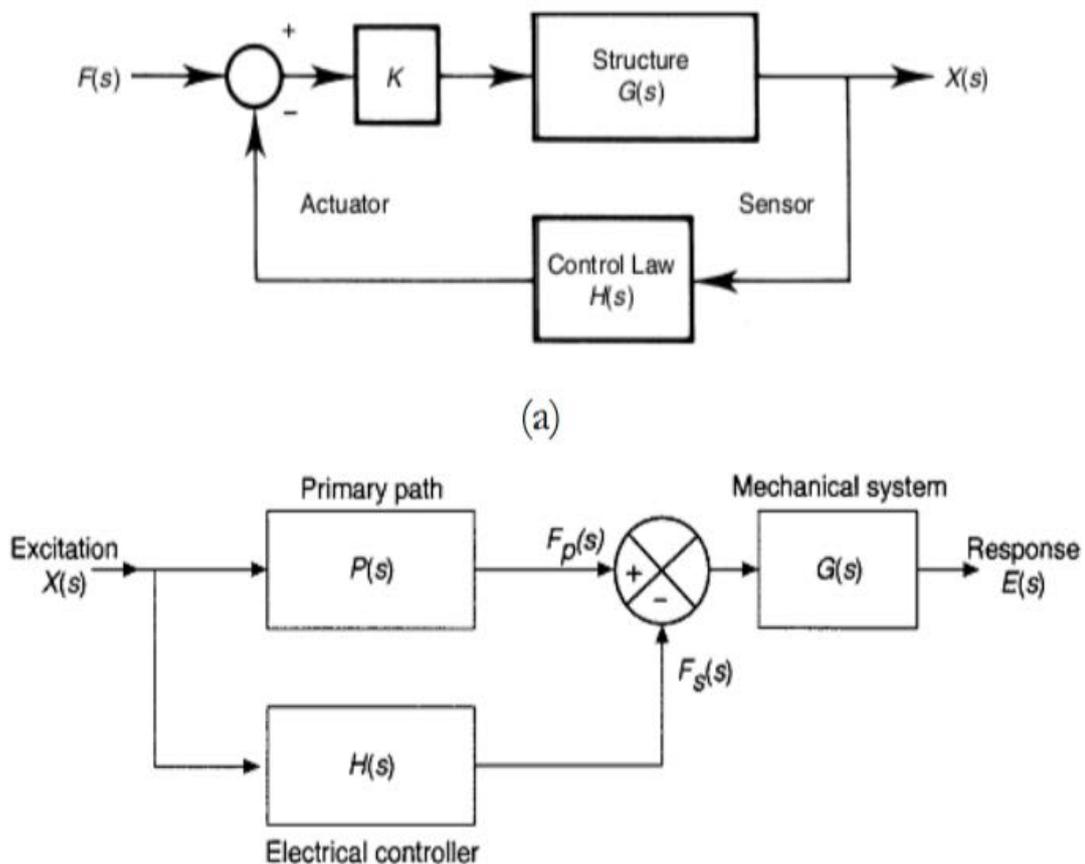
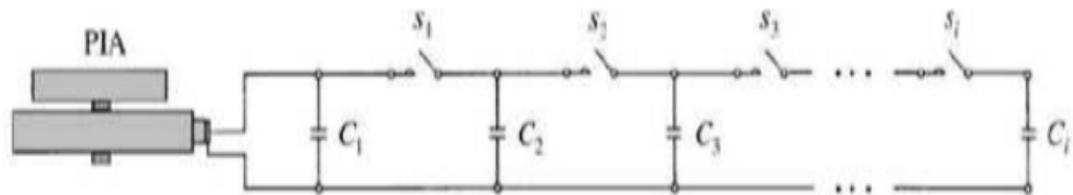


Figure 2.5 : Type de contrôle active : (a) reboulé ;(b) : par anticipation [12]

### 2.2.3 Contrôle semi-actif

Pour dépasser les limites du contrôle passif et actif et combiner leurs avantages (simplicité et efficacité) (performance et durabilité) différents contrôles ont été proposés dont le but est d'améliorer les performances d'amortissement des techniques piézoélectriques à basse pression

et l'utilisation de sources d'énergie externes minimales. La technique semi-active réalise le contrôle des vibrations en modifiant ses paramètres dynamiques tels que la rigidité ou l'amortissement et l'adaptation aux propriétés du système. Le "changement d'état" est lié aux concepts de contrôle de la rigidité ou de l'amortissement dans lesquels les éléments sont transformés. Il consiste à connecter un patch piézoélectrique à un court-circuit dans lequel les éléments piézoélectriques exclus du court-circuit sont convertis en états de circuit ouvert en court-circuitant l'élément piézoélectrique à chaque pression maximale puis en le maintenant en court-circuit jusqu'à ce que l'énergie mécanique de réponse au choc disparaisse due à un relâchement brutal ou à un ajout de tension au système violant le principe de conservation de l'énergie. Ce type de contrôle peut être comparé à un système mécanique à raideur variable. La commutation permet en effet de retirer l'énergie potentielle électrique convertie depuis la déformation mécanique grâce à l'effet piézoélectrique. De ce fait, une partie de l'énergie mécanique initiale est extraite de la structure. Il consiste à ajuster la rigidité de l'élément piézoélectrique, car il est capable de passer instantanément au passage d'un état de rigidité élevée à un état de rigidité faible, où la rigidité d'un élément piézoélectrique diffère lorsqu'il est en court-circuit par rapport à la rigidité lorsqu'il est ouvert, si le changement momentané de rigidité se produit à une contrainte nulle et qu'il n'y aura pas de transitoires mécaniques introduites dans le système.



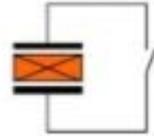
**Figure 2.6 :** Schéma de contrôle de la fréquence de résonance par commutation de capacités [12].

## 2.2.4 Contrôle semi-passif

Le contrôle semi-passif est une technique développée à la place du contrôle passif et actif du laboratoire LGEF appelé SSD (synchronized switch damping) qui utilise un interrupteur électronique qui convertit brièvement un élément capacitif en un circuit shunt qui peut être un simple court-circuit SSDS ou petite inductance SSDI des moments précis du cycle de vibration de la structure [7].

**2.2.4.1 Technique SSDS (synchronized switch on short circuit) :** Le circuit SSDS (synchronized switch damping on short circuit) est un circuit simple constitué d'un dispositif de

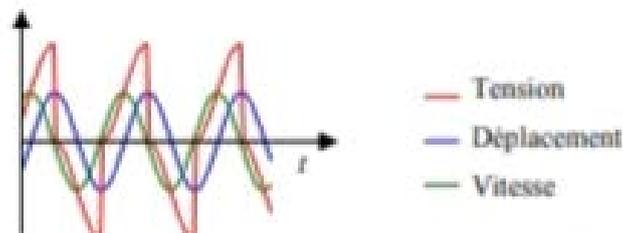
commutation connecté en parallèle avec un élément piézoélectrique, comme illustré à (la figure 2.7)



**Figure 2.7 :** Circuit SSDS [7].

Lorsque la structure arrive à un déplacement maximal, l'interrupteur est fermé pendant un court instant puis rouvert, provoquant l'annulation de la charge électrique stockée dans les spots piézoélectriques.

La (figure 2.8) illustre les formes que l'on sait que la tension piézoélectrique augmente par moments, ce qui indique que l'énergie mécanique est extraite de la structure et stockée dans les éléments piézoélectriques sous forme d'énergie électrique. C'est la cause de la dissipation de l'énergie mécanique de vibration [13].



**Figure 2.8 :** formes d'onde SSDS [13].

L'amortissement en SSDS peut être déduit du cas SSDI en prenant  $\gamma=0$ , il est ainsi donné par :

$$A_{ssds} = 20 \log \left( \frac{1}{1 + \frac{4}{\pi} k^2 Q_m} \right) \quad (2.2)$$

#### 2.2.4.2 Technique SSDI (synchronized switch damping on inductor)

La figure 2.9 représente un circuit SSDI, qui est un circuit SSDS auquel seule une inductance est ajoutée. L'inductance  $L$  et la résistance  $R$  du circuit forment un oscillateur RLC. L'interrupteur est ouvert puis fermé pendant une courte période à des moments

précis de sorte que la période de fermeture  $t$  est la moitié de la période d'oscillation électrique  $T$  et à partir de là, la tension peut être inversée pendant le temps de fermeture. Doit être fermée au pic de la vibration et rouverte au premier.

La figure 2.10 représente la forme d'onde pour la tension et le déplacement dans le cas d'une excitation positive, une inversion se produit au maximum du déplacement de sorte que l'on perd de l'énergie car l'amplitude de la tension après l'inversion est inférieure à l'amplitude de la tension avant l'inversion [13].

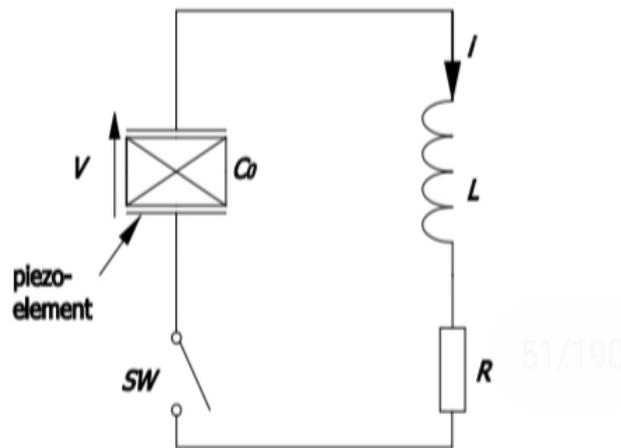


Figure 2.9 : Circuit SSDI [13]

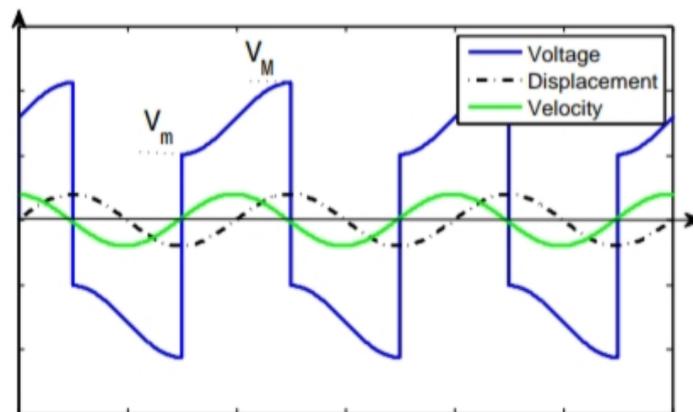


Figure 2.10 : Formes onde SSDI [13].

- ✓ Son énergie peut également être reflétée par le facteur de qualité  $Q$  défini dans l'équation 2.2.
- ✓ L'équation 2.3 représente la relation de tension avant et après l'utilisation du facteur de qualité.

- ✓ La relation de tension peut être avant et après fournir en utilisant ce facteur de qualité donné par équation 2.4.
- ✓ L'équation 2.5 représente le rapport d'inversion de tension. Où le facteur d'inversion est égal à zéro dans SSDS.

$$t_i = \frac{T_{LCR}}{2} \approx \pi \sqrt{LC_0} \quad (2.2)$$

$$Q_i = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.3)$$

$$V_m = V_M e^{\frac{-\pi}{2Q_i}} \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{V_m}{V_M} = e^{\frac{-\pi}{2Q_i}} \quad (2.5)$$

Un facteur d'inversion plus important conduit généralement à un meilleur effet d'amortissement et, par conséquent, SSDI a de meilleures performances de contrôle que SSDS [13].

#### 2.2.4.3 Technique SSDV: (synchronized switch damping on voltage source)

Dans le cas de SSDV, la source de tension est connectée à la branche shunt en série avec l'inductance car l'élément piézoélectrique est actionné sur une source de tension négative ou positive via l'inductance  $L$ . La stratégie de commande de l'interrupteur consiste à couper  $S_{w1}$  lorsqu'un élément piézoélectrique maximal apparaît une contrainte correspondant au maximum. L'interrupteur  $S_{w1}$  est maintenu fermé pendant une pseudo-demi-période. Lorsque l'interrupteur  $S_{w1}$  est ouvert, la tension est négative. L'interrupteur  $S_{w2}$  est commandé symétriquement à  $S_{w1}$ , fermé lorsqu'une contrainte de déplacement minimale de la tension  $V$  se produit puis s'ouvre. L'interrupteur après le temps de fermeture  $t$  est positif. La figure 2.11 montre le circuit électrique correspondant à la technologie SSDV classique ainsi que les formes d'onde positives théoriques associées dans figure 2.12 et figure 2.13.

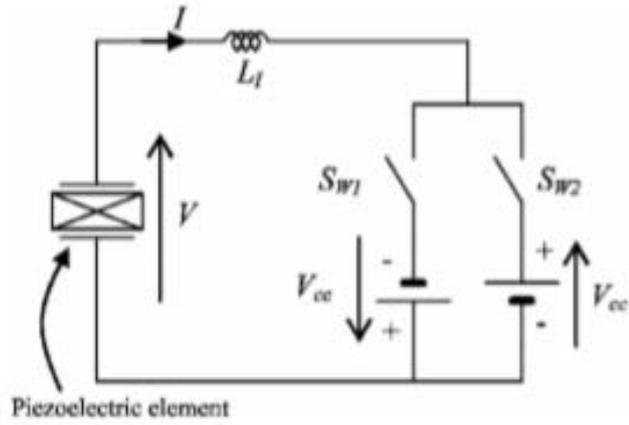


Figure 2.11 : Circuit électrique SSDV [14]

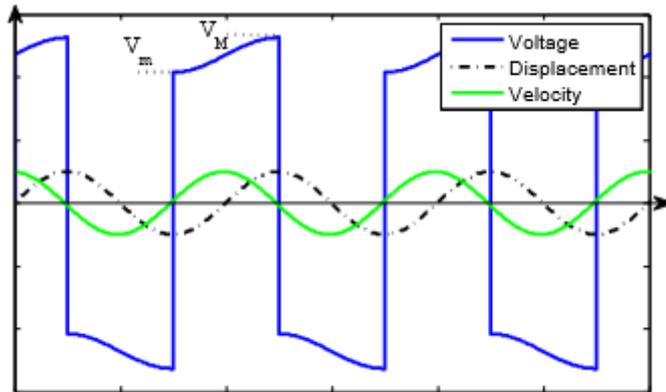


Figure 2.12 : Forme d'onde de SSDV [13]

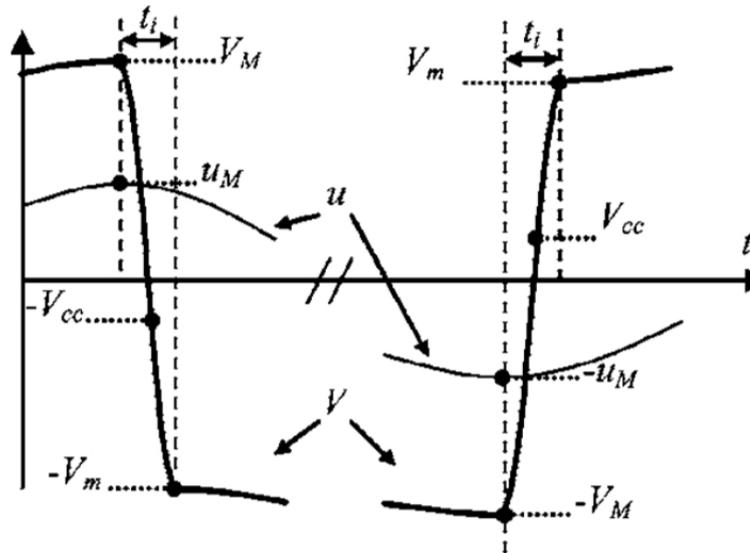


Figure 2.13 : Forme d'onde typique de déplacement et de voltage [14]

L'amortissement peut s'exprimer par l'équation  $A_{ssdv}$  en fonction du coefficient de couplage électromécanique, du facteur de qualité mécanique, de la qualité de l'inversion électrique et de  $\nu$  [8].

$$A_{ssdv} = 20 \log \left( \frac{1 - \nu}{1 + K^2 Q_m \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \right) \quad (2.6)$$

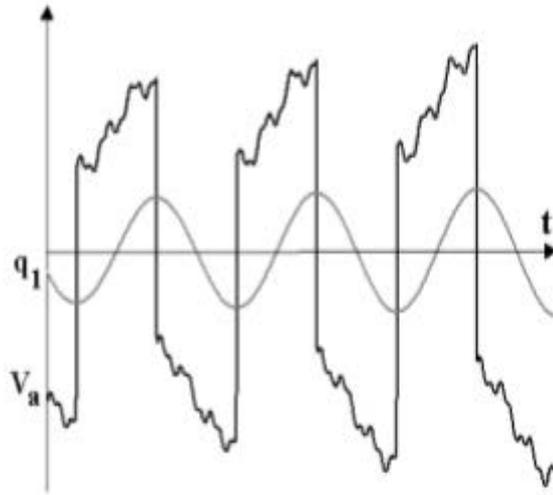
Cette équation montre que pour une force excitatrice donnée une valeur de tension continue  $V_{sw}$  qui annule complètement la vibration peut être trouvée. L'expression de cette valeur particulière est donnée dans l'équation  $V_{swmax}$  [8].

$$V_{swmax} = \frac{\pi}{4\alpha} \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} F_M \quad (2.7)$$

### 2.2.5 SSDI modal

La stratégie de contrôle SSDI est utilisée surtout quand il s'agit de traiter les signaux à fréquence unique. Cette méthode ne peut pas être utilisée en cas d'excitation à large bande. Dans ce cas le résultat est très médiocre en raison de nombreuses inversions de tension ayant des amplitudes trop petites. En effet, dans ce cas de nombreux extrema apparaissent sur le signal de tension actionneur à cause de la superposition d'ondes modales. Donc, si la reconstruction des participations modal est possible, l'inversion de tension peut être contrôlée par les extrema du déplacement modale comme le cas par exemple de  $q$  le déplacement modal du mode 1.

Comme le montre la figure 2.13 comme l'inversion est appliquée sur la tension actionneur contenant tous sur, le contrôle de l'inversion n'est alors possible que si le déplacement modal est disponible. [10]



**Figure 2.14** : Les formes d'onde de tension typique, où  $V_a$  est la tension d'actionneur piézoélectrique et  $q_1$  est le premier déplacement modal correspondant [8]

### 2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié quatre techniques de contrôle des vibrations avec des matériaux piézoélectriques. La commande active donne un meilleur résultat, mais nécessite l'ajout d'une alimentation externe importante et de matériels encombrants et coûteux tels que des amplificateurs, par exemple. Elle a été développée en une commande semi-active qui nécessite l'ajout d'une petite alimentation externe comme une batterie, et il fonctionne aussi de technique SSDV. Le contrôle passif est à l'opposé de ces méthodes car il ne nécessite pas l'ajout d'une alimentation externe et a été développé en un contrôle semi-passif qui fonctionne de deux techniques SSDS et SSDI.

**Chapitre 3 :**

**Contrôle de vibration par  
l'intégration des alliages à  
mémoire de forme**

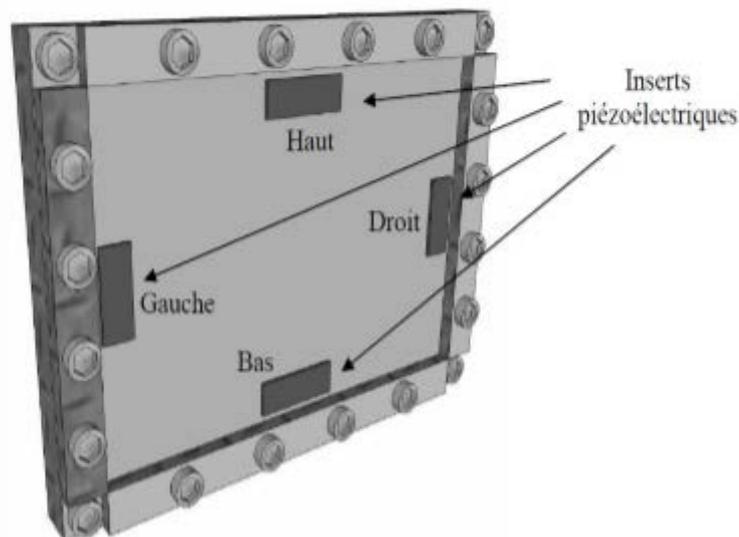
### 3.1 Introduction

Parmi les solutions proposées pour contrôler les vibrations intégration des alliages à mémoire de forme par la méthode (SSDI+Alliage) appliquée d'une structure intelligente. Elle s'appuie sur des simulations faites sous Matlab/Simulink, en utilisant un modèle réaliste d'une structure de la plaque d'acier. Cette nouvelle méthode est efficace pour l'amortissement des vibrations. Dans ce chapitre, nous étudierons comment l'appliquer avec une indication de l'effet de la température sur celle-ci.

### 3.2 Structure intelligente

#### 3.2.1 Définition de la structure intelligente

La structure qui sera utilisée dans les simulations et les analyses suivantes est une plaque d'acier serrée équipée de quatre inserts piézoélectrique P188. Ses dimensions et les propriétés physiques sont données dans les tableaux 3.1 et 3.2. Cette plaque est fixée sur les quatre côtés. Figure 3.1 illustre cette plaque représentant un panneau de protection [8].



**Figure 3.1** : La plaque est fixée sur les quatre cotés [8].

**Tableau 3.1 :** Caractéristique de la plaque [8].

Langueur	0.6 m
Largeur	0.4 m
Epaisseur	1 mm
Module de Young	210 GPa
Facteur de Poisson	0.345
Densité	7500 Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau 3.2:** Caractéristique des inserts piézoélectriques P188 [8].

Propriétés	Symbole	Valeur
Densité	P	7650Kg/m <sup>3</sup>
Compliances court-circuit	$S_{11}^E$	$10.66.10^{-12}Pa^{-1}$
	$S_{12}^E$	$-3.34.10^{-12}Pa^{-1}$
	$S_{13}^E$	$-4.52.10^{-12}Pa^{-1}$
	$S_{33}^E$	$13.25.10^{-12}pa^{-1}$
Permittivité	$\epsilon_{33}^T$	10.17 n F .m <sup>-1</sup>
Coefficient piézoélectrique	$d_{13}$	-108 p C .N <sup>-1</sup>

**Tableau 3.3:** Fréquences des quatre modes de simulation de la plaque embarquée [8]

Modes	Fréquence
Mode 1	96 Hz
Mode 2	175 Hz
Mode 3	204 Hz
Mode 4	228 Hz

### 3.2.2 Modélisation de la structure intelligente

L'objectif dans cette partie est de fournir un modèle d'état modal d'une structure intelligente avec des éléments piézoélectriques [10].

### 3.2.2.1 Équation d'état mécanique

$$m\delta'' + c\dot{\delta} + K^E\delta = -\alpha V + \beta F \quad (3.1)$$

Avec :

$\delta$  : le vecteur de déplacement

$m$ ,  $c$  et  $k$  : sont respectivement les matrices de la masse, de l'amortissement et de la rigidité quand les patches piézoélectriques sont en court-circuit.

$\alpha$  : est la matrice de couplage électromécanique .

$V$  : est un vecteur de tension des patches piézo-électriques.

$F$  : est la force appliquée au système.

Les coefficients électromécaniques sont liés aux facteurs classiques de couplage électromécanique  $k$  qui caractérisent, pour chaque mode, l'échange d'énergie de la structure mécanique et les patches piézoélectriques [10].

### 3.2.2.2 Équation d'état électrique

Cette équation mécanique du système n'est pas suffisante pour modéliser complètement le couplage électromécanique de la structure intelligente. En effet, il faut lui ajouter une équation électrique qui traduit l'effet mécanique sur les grandeurs électriques des éléments piézoélectriques collés sur la structure [10].

$$I = \alpha^t \delta - C_0 \dot{V} \quad (3.2)$$

$\delta$  : le vecteur de déplacement.

$C_0$  : est la matrice diagonale de la capacitance.

$\alpha$  : est la matrice de couplage électromécanique .

$V$  : est un vecteur de tension

$I$  : le vecteur électrique actuel.

### 3.2.2.3 Équation d'état de la structure intelligente

D'après les équations 3.1 et 3.2 les équations électrique et mécanique de la structure intelligente peuvent s'écrire sous la forme [8] :

$$m\delta'' + c\dot{\delta} + K^E\delta = -\alpha V + \beta F \quad (3.3)$$

$$I = \alpha^t \delta - C_0 \dot{V} \quad (3.4)$$

$\delta$  : le vecteur de déplacement modal

$m, c, k$ : sont respectivement les matrices de la masse ; de l'amortissement et de la rigidité quand les patches piézoélectriques sont en court-circuit

$F$  : la force appliquée au système

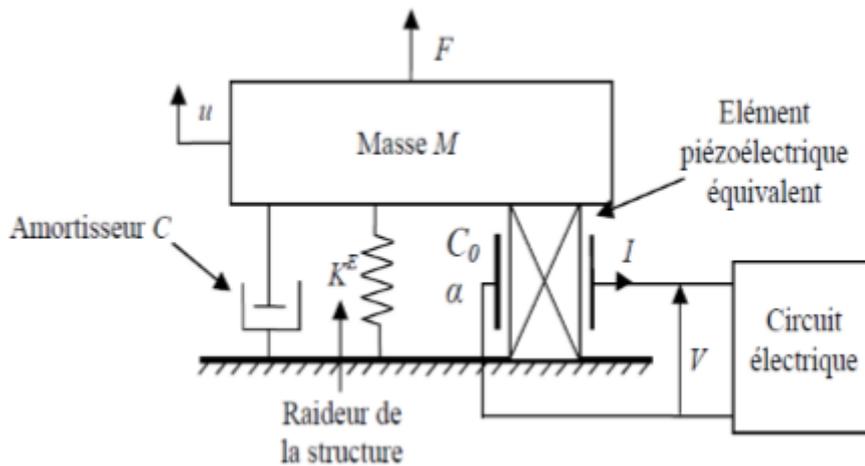


Figure 3.2 : Modèle (masse, ressort, amortisseur) pour un seul mode et un seul élément piézoélectrique [8]

### 3.3 Modèle modal

Le contrôle développé dans ce manuscrit est basé sur un modèle modal de la structure instrumentée d'éléments piézoélectrique. Les équations précédentes doivent donc être formulées sous une forme modale [10].

En utilisant le changement de variable suivante :  $\delta = \Phi q$

Les équations 3.3 et 3.4 peuvent être bien représentées par projection dans la base modale par [10] :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + K^E q = -\theta V + \beta F \quad (3.5)$$

$$I = \theta^t \dot{q} - C_0 \dot{V} \quad (3.6)$$

$\theta$  est la matrice de couplage électromécanique modale avec une taille  $[n,i]$ .  $\theta$  est défini comme suit :

$$\theta = \Phi^t \alpha$$

La structure est supposée être peu amortie, avec un amortissement proportionnel aux modes découplés. L'équation 3.5 est normalisée afin d'avoir la matrice de masse modale égale à l'identité. Les matrices modales peuvent être écrites comme une fonction du vecteur d'amortissement modale  $\zeta$ , de la  $\omega^E$  le vecteur de la fréquence en court-circuit et de  $\omega^D$  le vecteur de fréquence circuit ouvert comme suit [10] :

$$M = I_d; C = 2diag(\xi)diag(\omega^D); K^E = diag((\omega^E)^2) \quad (3.7)$$

En séparant les tensions des actionneurs et des capteurs nommés, respectivement,  $V_a$  et  $V_s$ , l'équation 3.5 devient [10]

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + K^E q = -\theta_a V_a - \theta_s V_s + \beta F \quad (3.8)$$

Dans le cas d'un circuit ouvert ou lorsque la tension capteur est surveillée par un amplificateur de tension. L'intensité du capteur est nulle, donc : [10]

$$\theta_s^t q - C_{0s} V_s = 0 \quad (3.9)$$

Et en réintroduisant 3.8 dans l'équation 3.9 :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + (K^E + \theta_s C_{0s}^{-1} \theta_s^t) q = -\theta_a V_a + \beta F \quad (3.10)$$

Les systèmes linéaires 3.9 et 3.10 peuvent être écrits en état modal sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.11)$$

$$x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$$

Tel que

$x$  : étant le vecteur d'état

$u = [F, V_a]$  : est le vecteur de contrôle

$y = [q, \dot{q}, V_s]$  : est le vecteur de sortie

$A, B, C$  sont les matrices d'état :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_d \\ -M^{-1}(K^E + \theta_s C_{0s}^{-1} \theta_s^t) & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1}\beta & -M^{-1}\theta_a \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} I_d & 0 \\ 0 & I_d \\ C_{0s}^{-1}\theta_s^t & 0 \end{bmatrix}$$

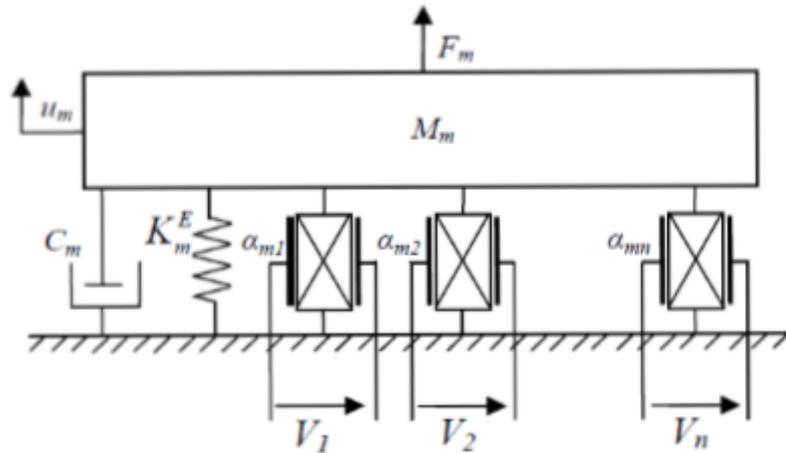
$V_a$  : est calculé par le relation suivante :

$$V_a = C_{0s}^{-1} \theta_s^t q \quad (3.12)$$

Tel que :

$C_{0a}$  : est la matrice de la capacité d'actionneur

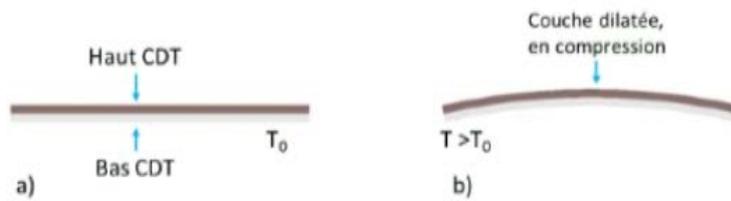
$C_{0s}$  : est la matrice de la capacité des capteurs



**Figure 3.3 :** Modèle (masse, ressort, amortisseur) d'une structure munie de  $n$  inserts piézoélectrique pour un mode  $m$  [10].

### 3.4 Conversion thermomécanique par bilame thermique

Il s'agit d'un ruban thermique bimétallique composé de deux couches métalliques laminées, l'une à fort coefficient de dilatation thermique CDT et l'autre à faible coefficient de dilatation thermique CDT. Lorsque la structure est chauffée, la première couche CDT se déforme plus que la deuxième couche par la première couche. La figure (3.4) représente la déformation de la structure sous pression thermique. [16]



**Figure 3.4** : Déformation d'un bilame lors du chauffage : a) état initial plat ; b) état courbé quand la température augment [16].

### 3.4.1 Modélisation du l'effet bilame

Cette étude a été réalisée en analysant le comportement des bilames du thermostat. Un bilame sous forme de poutre, encasté d'un côté et plat à l'état initial (3.5) prend une forme d'arc de cercle lorsque la température change. Le rayon de courbure est donné par l'expression suivante [16] :

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1 + m)^2}{3(1 + m)^2 + (1 + mn)\left(m^2 + \frac{1}{mn}\right)} \cdot \frac{T - T_0}{S} \quad (3.13)$$

Avec :

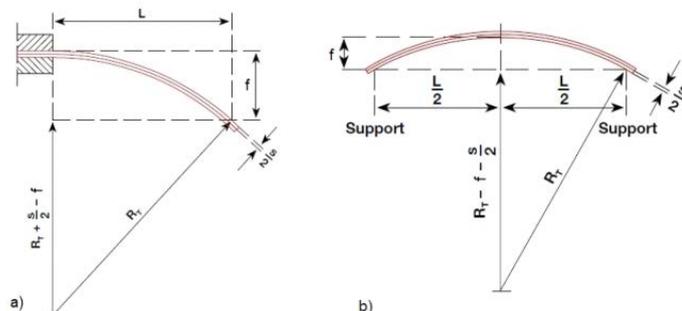
$R_T$  : rayon de courbure à la température cible  $T$ .

$R_0$  : rayon de courbure à la température de référence  $T_0$ .

$m=(S_1/S_2)$  : rapport des épaisseurs des deux couches.

$n=(Y_1/Y_2)$  : rapport des modules de Young des deux couches .

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficient de dilatation thermique (CDT).



**Figure 3.5** : Déformation d'un bilame sous de poutre soumis à une variation de température : a) bilame encastred'un côté ; b) bilame libre [16].

- Dans le cas où le bilame est plat à la température de référence  $T_0$  on peut simplifier l'équation 3.13 vers :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \cdot \frac{T - T_0}{S} \quad (3.14)$$

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

$$K = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \quad (3.15)$$

- Pour trouver la relation de la flèche ou déplacement maximal sur sa longueur on applique le théorème de Pythagore [17] :

$$\left(R_T + \frac{S}{2}\right)^2 = \left(R_T + \frac{S}{2} - D\right)^2 + L^2 \quad (3.16)$$

- On général, la déflexion du bilame est plus petite que 10% de sa longueur  $L$ , on peut donc simplifier l'équation précédent en [17] :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{S} \quad (3.17)$$

- Dans le cas où le déplacement du bilame est bloqué à son bout, il développe une force  $F$  calculer selon [16] :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)lS^2}{4L} \quad (3.18)$$

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 :  $1/L$  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 3.5). Dans ce cas, la flèche se calcule selon [16] :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{4S} \quad (3.19)$$

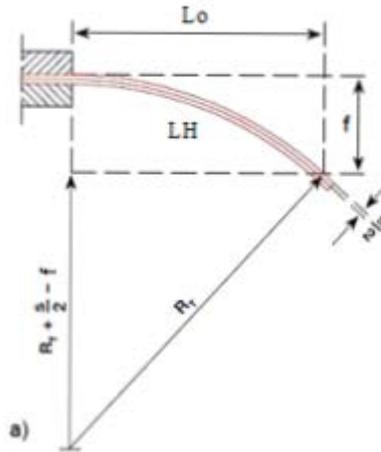
Pour annuler la flèche, il faut appliquer une force égale à :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)ls^2}{L} \quad (3.20)$$

$F$  : c'est la force maximale que le bilame peut développer lors du chauffage.

### 3.4.2 Linéarisation de modèle mathématique de système

L'équation 3.20 de la force  $F$  en fonction de température  $T$  est définie par une équation linéaire représentés par la forme  $f(x) = A \times x$ , afin de rendre ce système non linéaire, nous modifions mathématiquement les valeurs des variables telles que la longueur  $L$  après dilatation en fonction de la longueur initiale  $L_0$ .



**Figure 3.6:** Bilan encastrer d'un côté [ 16].

$$L_0 = \sin(\theta) * R_T \quad (3.21)$$

$$R_T = \frac{2s}{3(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)} \quad (3.22)$$

$$L_{total} = L_H + dl_1 \quad (3.23)$$

$$L_H = \arcsin(\theta) * R_T \quad (3.24)$$

$$L_{total} = \arcsin(\theta) * R_T + dl_1 \quad (3.25)$$

$$dl_1 = \alpha_1 \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (3.26)$$

$$\Delta T = T - T_0 \quad (3.27)$$

$T_0$  : température initial ;  $R_T$  : rayon de courbure à la température cible  $T$ .

### 3.5 Simulation

#### 3.5.1 Etude des changements de la force de l'alliage à mémoire de forme en fonction de la température.

Nous utilisons l'équation (3.20) pour étudier les changements de la force d'un alliage à mémoire de forme en fonction de température, simulé à l'aide de logiciel MATLAB.

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 températures de transformation inverse. Ce type de l'effet de mémoire de forme est appelé récupération gratuite.

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

**Tableau 3.4** : Caractéristique d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF) [16].

Symboles	Paramètre	Valeurs
$L_0$	Langueur initial	$20 \times 10^{-2}$
$Y$	Module de Young	$0.03 \times 10^9$
$S$	L'épaisseur de bilame	$2 \times 10^{-4}$
$\alpha_1$ : alpha 1	Coefficient de dilatation thermique(CDT)	$2 \times 10^{-4}$
$\alpha_2$ : alpha 2	Coefficient de dilatation thermique(CDT)	$170 \times 10^{-4}$
$F_0$	Force à la température de référence $T_0$	0.01
$L$	Largeur	$1 \times 10^{-2}$
$T$	Température	[0 100]

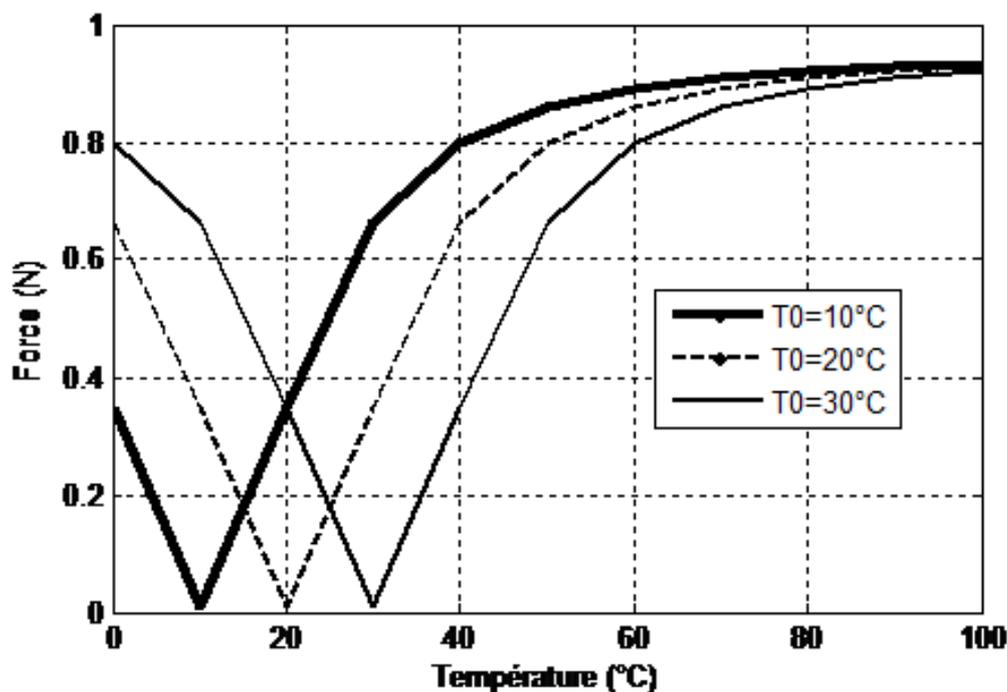


Figure 3.7: Force d'alliage en fonction de la température.

Tableau 3.5: Valeurs de la force maximale  $F$  en fonction de la température.

$T_0$ (°C)	10	20	30
$T$ (°C)	100	100	100
$F$ (N)	0.94	0.93	0.92

En observant à partir la tableau 3.5 :

- A une température de  $T_0=10$  °C : la force de l'alliage commence à augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 0.94 N à une température de  $T=100$ °C, pour s'y stabiliser.
- A une température de  $T_0=20$ °C : la force de l'alliage commence à augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 0.93 N à une température de  $T=100$ °C, pour s'y stabiliser.
- A une température de  $T_0=30$  °C : la force de l'alliage commence à augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 0.92 N à une température de  $T=100$ °C, pour s'y stabiliser.

**Tableau 3.6:** Valeurs de la force  $F$  à  $T=50^{\circ}\text{C}$ .

$T(^{\circ}\text{C})$	50	50	50
$T_0(^{\circ}\text{C})$	10	20	30
$F$ (N)	0.85	0.79	0.66

- En observant à partir le tableau (3.6) qu'à  $T=50^{\circ}\text{C}$  la plus grande valeur de la force d'alliage est de 0.85 N à  $T_0=10^{\circ}\text{C}$ .
- A  $T_0=10^{\circ}\text{C}$ , la valeur de la force d'alliage à  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $F=0.85$  N, et à  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $F=0.91$  N donc nous concluons que la température à une influence sur la force de l'alliage.
- Nous concluons quand plus la valeur de  $T_0$  est petite plus que la force de la dilatation d'alliage est grande.

### 3.5.2 Méthode de (SSDI+alliage)

Dans cette section, nous travaillerons sur la recherche de solutions pour réduire et contrôler les vibrations en appliquant la méthode (SSDI+Alliage). Nous mènerons ces études à l'aide du logiciel Matlab en introduisant les propriétés des alliages à mémoire de forme et l'équation de force et en utilisant le bloc Simulink afin d'appliquer (SSDI+Alliage).

Nous verrons également à travers cette étude l'effet de la température sur le contrôle de vibrations. Nous prenons trois valeurs de température  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$  à une température initiale  $T_0=20^{\circ}\text{C}$ .

Les figures 3.8, 3.9, 3.10 montrent les courbes de tension d'actionneur en fonction de temps aux température  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$ .

Les figures 3.11, 3.12, 3.13 montrent les courbes de tension d'actionneur en fonction de temps aux température  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$ .

### Courbes des tensions

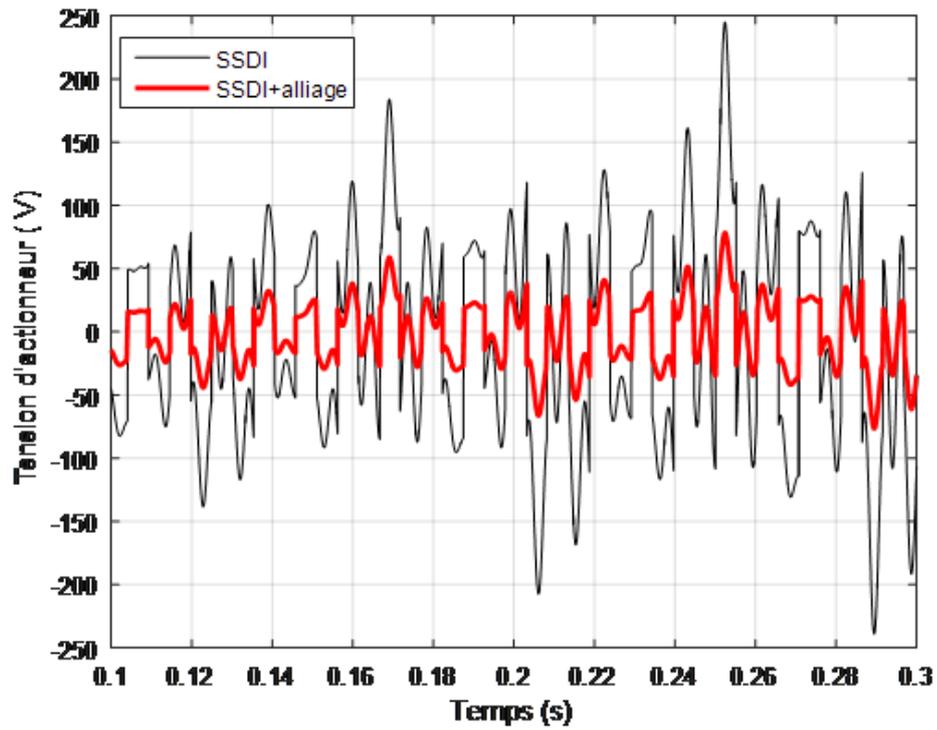


Figure 3.8 : Tension d'actionneur à  $T=40^{\circ}\text{C}$  en fonction de temps.

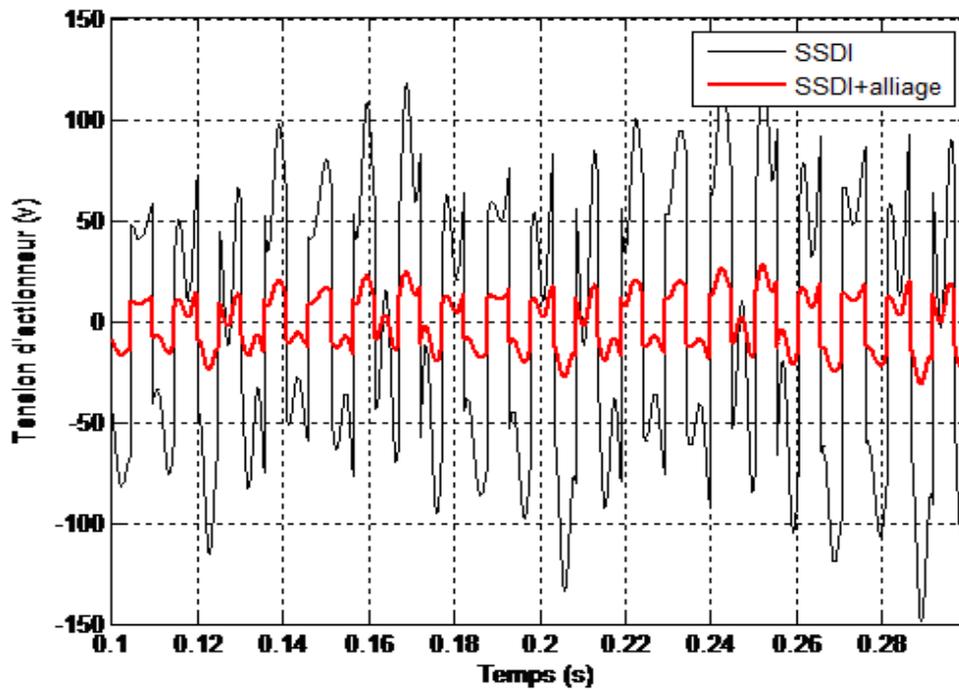


Figure 3.9 : Tension d'actionneur à  $T=50^{\circ}\text{C}$  en fonction de temps.

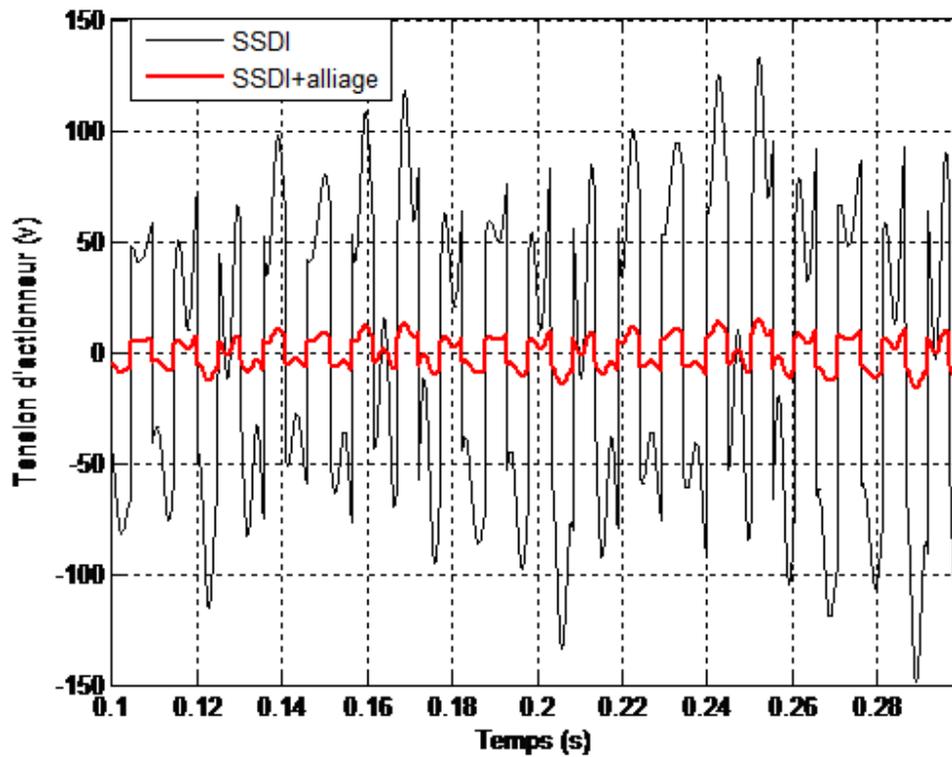


Figure 3.10: Tension d'actionneur à T=70°C en fonction de temps.

En comparant les courbes qui représentent les valeurs de tension d'actionneur en fonction du temps et le (tableau 3.7), on remarque que plus la température est augmentée plus la tension d'actionneur est diminuée.

Tableau 3.7: Comparaison entre les valeurs des tensions SSDI et SSDI+alliage.

$T$ (°C)	40	50	70
Tension ( $V_{moy}$ ) (SSDI) (V)	50	50	50
Tension ( $V_{moy}$ ) (SSDI+alliage) (V)	20	12.5	10

## Les courbes de déplacement

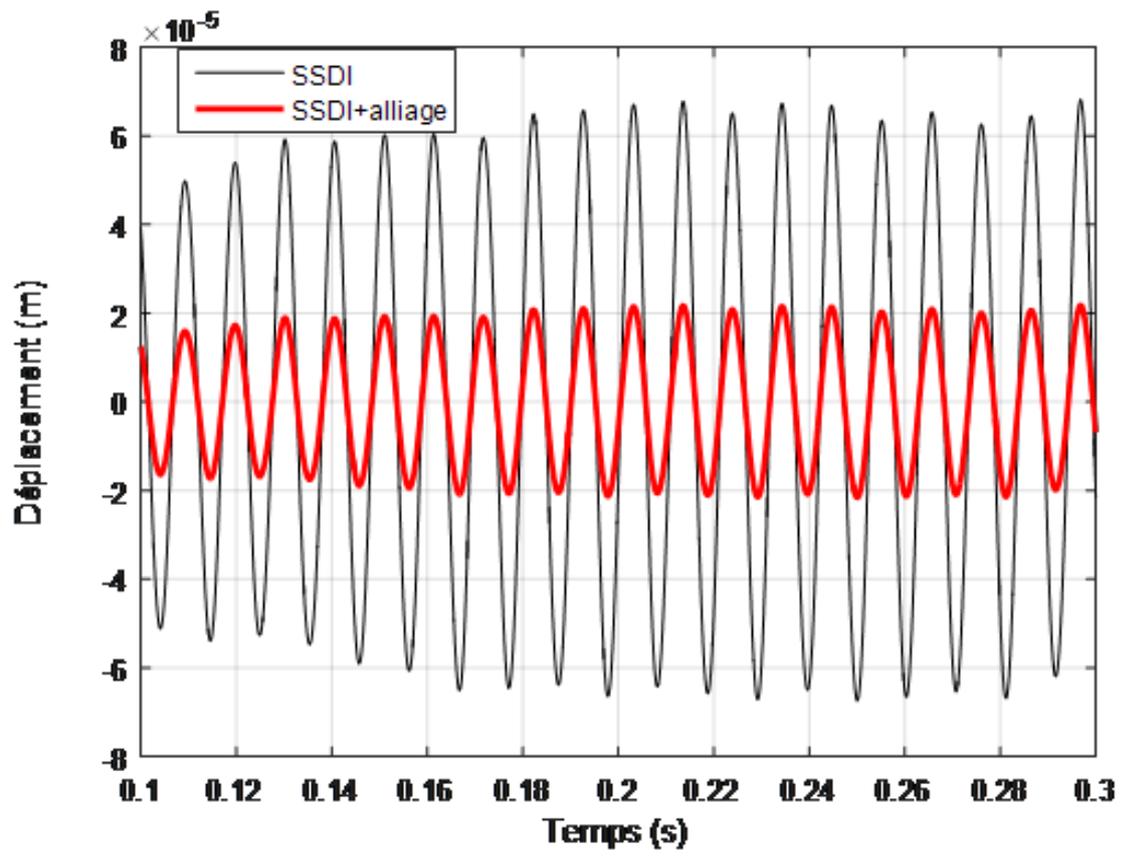


Figure 3.11 : Déplacement à  $T=40^{\circ}\text{C}$  en fonction de temps.

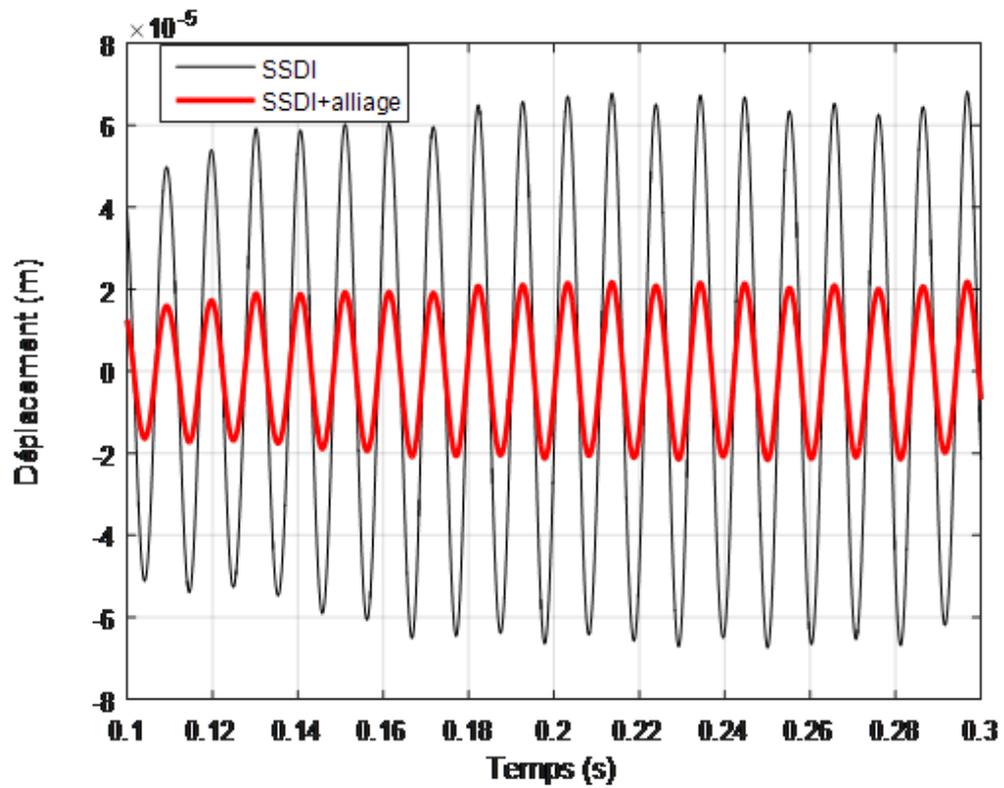


Figure 3.12 : Déplacement à  $T=50^{\circ}\text{C}$  en fonction de temps.

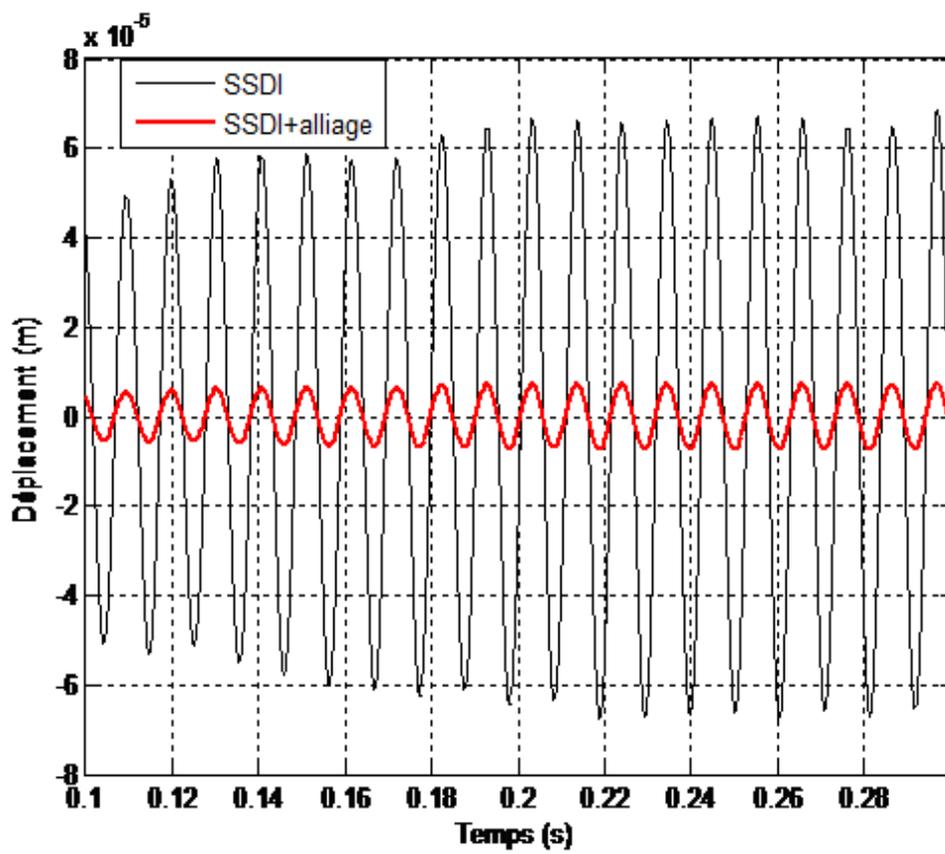


Figure 3.13 : Déplacement à  $T=70^{\circ}\text{C}$  en fonction de temps.

**Tableau 3.8 :** Comparaison entre les valeurs de déplacement SSDI et SSDI+alliage.

$T(^{\circ}\text{C})$	40	50	70
Déplacement SSDI ( $u_{moy}$ ) $\times 10^{-5}$ (m)	5	5	5
Déplacement SSDI+alliage ( $u_{moy}$ ) ( $\times 10^{-5}$ m)	1.5	1	0.5

En comparant les courbes qui représentent les valeurs de déplacement en fonction du temps et le tableau 3.8 on remarque qu'il y a un amortissement dans les amplitudes des courbes d'alliage + SSDI par rapport à SSDI. On remarque aussi que plus la température est élevée, l'amortissement de déplacement est meilleur.

Le système à deux effets qui intervient pour le contrôle :

- Méthode de SSDI : cette méthode absorbe une grande quantité d'énergie de la poutre ce qui la convertit en une grande tension de sorte que l'amortissement est faible.
- Méthode de SSDI+alliage : l'alliage a un effet mécanique et soustractif, il donne une force contre la force de la plaque pour diminuer les vibrations avec l'intervention de SSDI qui absorbe l'énergie et l'a dissipée, alors l'amortissement est meilleur mais la tension est diminuée.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié comment contrôler les vibrations à l'aide de la méthode (SSDI + alliage à mémoire de forme). Grâce à cette étude, nous avons montré que cette méthode a un grand effet sur les vibrations et est facile à appliquer. La température a également un effet sur l'amortissement des vibrations. Plus on augmente la température, on voit qu'il y a plus d'amortissement c'est à cause de la température à un effet sur la force d'alliage.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse permet sur les matériaux intelligents et leurs applications pour le développement d'une structure intelligente, c'est-à-dire capable d'autocontrôler le niveau de ses vibrations unimodales et multimodales.

- Le premier chapitre présente généralités sur les matériaux intelligents, les types de ces matériaux et leurs applications.
- Le deuxième chapitre porte sur les types de contrôle (contrôle actif, passif, semi actif, semi passif) et les techniques de contrôle des vibrations (SSDI, SSDV, SSDS). Dans les matériaux piézoélectriques, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique lorsque la structure vibre. Le transfert ou la réduction de l'énergie mécanique à la structure se traduit par un amortissement efficace de la vibration. Ces systèmes étant très consommateurs d'énergie, il y a eu dans le domaine du contrôle des vibrations un développement des techniques de réduction des vibrations appelée technologie SSDI qui permet d'inverser la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique à chaque maximum. Cette technologie se caractérise par son fonctionnement autonome grâce à l'énergie électrique portable. Dans le cas d'une excitation à large bande, l'amortissement est faible.
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une méthode de contrôle et de réduction des vibrations appelée SSDI+alliages. Dans ce chapitre, nous étudions les changements de la force de l'alliage à mémoire de forme en termes de température avec simulation à l'aide du programme MATLAB. Pour voir l'effet de la température sur l'amortissement des vibrations par des interactions physiques sur la contraction interne et la déformation des alliages. Pour réduire les vibrations, nous avons associé la technologie SSDI à des alliages à mémoire de forme pour donner un meilleur amortissement car le SSDI seul ne suffit pas, il absorbe une quantité d'énergie pour la convertir en tension ce qui entraîne un faible amortissement. La méthode SSDI+Alliages dissipant l'énergie pour réduire les vibrations, l'amortissement est meilleur et la tension est plus faible. Cette méthode est considérée comme une méthode moderne et avancée dans le domaine de la réduction des vibrations.

# Références

- [1] <https://www.futura-science.com>, publié le 22/02/2002
- [2] Chetouh Samir, caractérisation mécanique des matériaux intelligents de type magnétostrictifs et leur application, mai 2010.
- [3] Jean-Yves Gauthier, modélisation des alliages à mémoire de forme magnétiques pour la conversion d'énergie dans les actionneurs et leur commande, 25 feb 2008.
- [4] Cécile fizan Michel <https://Metalblog.ctif.com>, 22 juin 2022.
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/alliage>.
- [6] <https://www.nanomotion.com>.
- [7] Saber Mohammadi, semi-passive vibration control using shunted piezoelectric materials, 2008
- [8] Chérif Aida, optimisation du transformateur piézoélectrique .application : controle semi-passive des vibrations , 17.10.2012.
- [9] Pierre Desproges, modèle électromécanique.
- [10] Bensiline Rami, Abdoune Mahmoud, contrôle de vibration par les méthodes non linéaires, juin 2013.
- [11] Stéphanie Harari, contrôle modal semi-actif et actif à faible consommation énergétique par composants piézoélectriques, 12/octobre/ 2009
- [12] Linyüan Yan, contrôle de vibrations large band à l'aide d'éléments piézoélectriques utilisant une technique non-linéaire, 29 aout 2013.
- [13] Kaixiang LI, amortissement vibratoire avec échange d'énergie synchronisé entre des éléments piézoélectriques, septembre 2011.
- [14] Bertrand Peultier, alliages à mémoire de forme :modélisation et calcul de structures , 11 juillet 2005.
- [15] Mademoiselle karine Taillard, étude du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme sous sollicitations multiaxiales complexes , 21 dec 2007.
- [16] Medjane Elaid, l'optimisation des structures intelligente pour la récupération d'énergie vibratoire, septembre 2019.
- [17] Le bilame : principe de fonctionnement et applications , partie du dossier « physique et ingénierie des objets » rédigé et publié avec le site culture sciences de l'ingénieur , 16/11/2020.
- [18] <https://matelec2020.sciencescnof.org>.