

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

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

En : Electrotechnique

Spécialité : commande électrique

Par : - Djendel Assia

- Mekhalfia Meriem

- Touati Amani Abir

-Touati Romaissa

Intitulé

Développement d'un capteur intelligent à excellente flexibilité intégrable dans des structures textiles pour la surveillance des signes vitaux

Soutenu publiquement, le 03 / 07 / 2023 , devant le jury composé de :

D r Benhadouga Sedik

MCA

Univ-BBA

Président

D r zehhar Djamila

MCB

Univ-BBA

Examineur

Pr Meddad Mounir

Pr

Univ-BBA

Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

# *Remerciements*

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Nous tenons à remercier tout particulièrement Pr MEDDAD MOUNIR docteur à l'Université Mohamed El Bachir EL Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, pour sa confiance et son soutien tout au long de cette période. Nous sommes reconnaissants pour ses commentaires constructifs et la confiance et la liberté dont il a fait preuve. Sa compétence et sa disponibilité ont été inestimables dans la direction de cet humble travail. Ses conseils et ses encouragements ont été précieux pour la réalisation de ce travail. Nous remercions sincèrement tous les membres du jury qui ont accepté de noter notre travail et pour l'intérêt qu'ils lui ont porté.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs de l'Université Mohamed El Bachir Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, en particulier du Département d'électromécanique, qui ont contribué à notre formation.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à tous les membres de notre famille pour leur soutien et leur patience tout au long de ces années. Leur soutien indéfectible est grandement apprécié et nous leur en sommes profondément Reconnaisants.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos collègues et amis pour leur soutien moral et matériel. Nous les remercions pour leur présence et leur soutien tout au long de ce parcours.

# Dédicace 1

قال تعالى (وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ)

إلهي لا يطيب الليل الا بشكرك ولا يطيب النهار الا بطاعتك ولا تطيب اللحظات الا بذكرك ولا تطيب الآخرة الا بعفوك  
ولا تطيب الجنة الا برويتك الله جل جلاله

الى من كلله الله بالهيبة و الوقار الى من علمني العطاء بدون انتظار الى من احمل اسمه بكل افتخار والذي الغالي

< عباس >

الى ملاكي في الحياة الى معنى الحب و الحنان الى بسملة الحياة و سر الوجود الى من كان دعائها سر نجاحي اليك اعلى  
الحياب والذني الغالية

< ربعة اوزنجة >

الى من كان قدوتي ومثلي الا على دوما الاقرب و الاحب الى قلبي الى من اشارك معهم الدم والصدق والحنان اخواني

< منال و عبيدة >

الى اخي الوحيد < عبد الرؤوف >

الى اجمل من في منزلنا الكتكوت < اياد >

الى من جمعني بهم اجمل الصدف فكانوا خير الرفقة و نعم الصديقات < هديل و بثينة >

الى صديقاتي و رفيقاتي في المذكرة < اماني - اسيا - رميساء >

الى كل الامل و الاقارب

الى من تمنوا لي الخير سرا او جهرا الى كل من ارسل لي نواياه الطيبة الى كل من قدم لي دعما و لو كان مجرد كلمة شكرا  
من القلب

**Mekhafia Meriem**

# Dédicace 2

الحمد لله الذي أنار لي طريقي وكان لي خير عون

إلى أعلى ما أملك في هذه الدنيا إلى من كان سبب وجودي على هذه الأرض، إلى من وضعت الجنة تحت أقدامها إلى التي  
انحني لها بكل إجلال وتقدير إلى التي أرجو قد أكون نلت رضاها

**أمي الغالية " الريح " أطال الله في عمرها**

إلى من أدين له بحياتي إلى من ساندي وكان شمعة تحترق لتضيء طريقي إلى من أكن له مشاعر التقدير والاحترام والعرفان

**أبي " العيد " أطال الله في عمره**

إلى سندي في هذه الدنيا إلى شريك العمر ونور الحياة زوجي الغالي "صهيب"

إلى صغيرتي وصديقتي في الحياة ابنتي الغالية "رنيم" حفظهما الله لي

إلى كل أفراد عائلتي وأخص بالذكر أخواتي : **رزيقة- مريم وصغيرتان أماني وابتهاال -ختام-اية**

إلى سندي أخي الغالي الوحيد "أسامة"

إلى عائلة زوجي الغالي: **"عمي الصديق و خالتي حليلة" إخوتي: رضوان- عبد الرحمان -أيوب -أنس** أشكرهم

جزيل الشكر على ووقوفهم إلى جانبي حفظهم الله

إلى كل صديقاتي بدون استثناء إلى كل الأساتذة الذين قدموا لنا يد المساعدة إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع وأسأل

الله عز وجل أن يوفقنا لما فيه الخير لنا

**Djendel Assia**

# *Dédicace 3*

ما سلكننا البدايات الا بتسييره وما بلغنا النهايات الا بتوفيقه وما حققنا الغايات الا بفضلته فالحمد لله الذي وفقنا  
لنتممين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية

اهدي ثمرة نجاحي الى :من قال فيهما الله تعالى: «وقضى ربك الا تعبدوا الا إياه وبالوالدين إحسانا."

إلى من أعطى دون انتظار مقابل. أعتزف بفضلته برّاً لوالدي الغالي أطل الله في عمره {مبـروك }

إلى جنة الله على الأرض، إلى من لا أسعى في هذه الدنيا إلا لنيل رضاها وتقبيـل يداها أمي العزيزة {وردة  
{

إلى من شهدوا معي متاعب الدراسة وسهر الليالي، من كانوا خير عون لي في دربي اخواتي الأعزاء

إلى أصدقاء المواقف لا السنين، شركاء الدرب الطويل والطموح البعيد {خولة عفاف حنان}

إلى رفاق خطوات النجاح بدءاً من أول خطوة وانتهاءً بأخر خطوة {مريم اماني اسيا}

لي الأيادي التي لم تبخل بالعطاء يوماً، ولم تتردد بتقديم العون ولو للحظة أستاذي المشرف {مداد منير}

وختاماً إلى كل فرد من دائرة حياتي الي كل من زرع في قلبي املا وأضاف لمسة خاصة في مسيرتي شكرا  
لكم كل باسمه ومقامه

*Romaissa Touati*

# Dédicace 4

ما سلكننا البدايات الا بتسييره وما بلغنا النهايات الا بتوفيقه وما حققنا الغايات الا بفضلله

فالحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه

الى من قال فيهما الله تعالى: «وَأَخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذَّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا»

الى من كان قوتي عندما تسلل الضعف في لحظات التعب الى قلبي، الداعم الاول لي ... ابي الغالي

" رابع "

الى من ينبض القلب مع انفاسها من تجعل لحياتي معنى أسمى وأعمق وأجمل امي الغالية

" سميرة "

الى حبيبي سندي اخي الوحيد "هارون"

الى زوجي المستقبلي "عمار"

الى ابي الثاني وامي الثانية "جمال ونورة"

الى اجدادي وجداتي أطل الله عمرهم

الى من كانوا رفيقاتي في الدرب "مريم اسيا رميساء"

الى كل عائلتي صغيرا وكبيراً

**Touati Amani Abir**

## **Liste des tableaux :**

- Tableau. 1.** Applications des matériaux piézoélectriques en fonction de l'effet utilisé
- Tableau. 2.** caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques
- Tableau. 3.** Comparaison des différentes technologies de récupération d'énergie vibratoire
- Tableau. 4.** Paramètres théoriques du composite PU-PZT
- Tableau. 5.** Paramètres théoriques du composite PU-PZT-Graphène
- Tableau. 6.** Les paramètres de simulation d'alliage de mémoire de forme (AMF)
- Tableau. 7.** Les valeurs de F AMF en fonction de la température
- Tableau. 8.** les valeurs de Force en fonction de la température avec différent déformation
- Tableau.9.** la tension en fonction de la fréquence

## **Liste des figures :**

- Figure.1.** Evolution des matériaux dans le temps
- Figure.2.** méta-matériaux
- Figure.3.** piézoélectrique
- Figure.4.** schéma de principe d'un transducteur magnétostrictif
- Figure.5.** Marché du MEMS
- Figure.6.** le substrat dépôt de résine photosensible puis du masque
- Figure.7.** la révélation par dissolution en en fonction de type de résine
- Figure.8.** polymère composite
- Figure.9.** la place des matériaux composites dans une automobile en 2014
- Figure.10.** plaque de polymère
- Figure.11.** GRAPHENE
- Figure.12.** GRAPHENE/polymère composite
- Figure.13.** alliage à mémoire de forme
- Figure.14.** superélasticité de AMF (les valeurs numérique d'un AMF de type NITI)
- Figure.15.** Force de rappel
- Figure.16.** cycle thermomécanique typique d'un alliage à mémoire de forme

**Figure.17.**valve cardiaque

**Figure.18.**broche d'orthodontie

**Figure.19.**satellite clementine lance le 25 janvier 1994

**Figure.20.**fragibolt de la compagnie TINI Alloy Aerispace Inc. de San Leadro 42

**Figure.21.**le circuit électrique équivalent du composite PU/PZT

**Figure.22.**la tension générer à partir du composites PU-PZT avec déférents pourcentages et  $S=0.6\%$

**Figure.23.**la puissance récupérer à partir du composites PU-PZT avec déférentes pourcentages et  $S=0.6$

**Figure.24.**la tension générer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  et  $S=0.3\%$

**Figure.25.** la puissance récupérer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  Et  $S=0.3\%$

**Figure.26.** La tension générer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  et  $S=0.4\%$

**Figure.27.** la puissance récupérer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  et  $S=0.4\%$

**Figure.28.** la tension générer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT  $S=0.6\%$  et  $S=0.29\%$

**Figure.29.** la puissance récupérer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  et  $S=0.29\%$

**Figure.30.** déformation d'un bilame sous forme de poutre soumis à une variation de température : a) bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre

**Figure.31.** déformation lors du chauffage d'un bilame à extrémités immobiles

**Figure.32.** bilame encastré d'un coté

**Figure.33.** la variation de la force en fonction de la température

**Figure.34.** la variation de la tension en fonction de la résistance

**Figure.35.** Le circuit électrique équivalent du composite PU/PZT-G /AMF

**Figure.36.** la tension générer à partir des composite PU-PZT33%  $S=0.6\%$  GRAPHENE  $S=0.3\%$

**Figure.37.** la puissance générer à partir des composite PU-PZT33%  $S=0.6\%$  GRAPHENE  $S=0.3\%$

**Figure.38.** la tension générer à partir du composite PU-PZT avec déférentes pourcentages et  $S=0.6\%$

## Liste des abréviations

<b>Abréviations</b>	<b>Dénominations</b>
<b>PZT</b>	Plomb zirconate-titane
<b>PU</b>	Le Polyuréthane
<b>AMF</b>	Alliage mémoire de forme
<b>PVDF</b>	Le polyvinylidène difluoride
<b>PVA</b>	Le polyacrylate de vinyle
<b>Les MEMS</b>	Les microsystèmes électromécaniques
<b>MEB</b>	La microscopie électronique à balayage
<b>CVD</b>	Dépôt chimique en phase vapeur
<b>PVD</b>	Dépôt physique en phase vapeur
<b>L'IoT</b>	L'Internet des objets
<b>TCAC</b>	Un taux de croissance annuel composé
<b>AF</b>	Austénite finish
<b>CDT</b>	Coefficient de dilatation thermique
<b>Edc</b>	Un champ électrique continu
<b>Cm</b>	Capacité mécanique équivalente
<b>Cp</b>	La capacité de la matrice PU
<b>Ce</b>	La capacité de la particule céramique PZT
<b>C0</b>	Capacité bloquée

## Liste des Symboles :

<b>Symboles</b>	<b>Signification</b>
<b>R<sub>p</sub></b>	La résistance symbolise les pertes diélectriques
<b>T</b>	Coefficient Thomson
<b>A<sub>33</sub></b>	Surface en mode 33
<b>S</b>	L'épaisseur du bilame
<b>S<sub>M</sub></b>	L'amplitude de la déformation
<b>ε<sub>r</sub></b>	La permittivité relative du composite PU/PZT
<b>E</b>	L'épaisseur du composite PU/PZT
<b>M<sub>31</sub></b>	Coefficient de couplage électromécanique
<b>A</b>	Surface
<b>T</b>	Température
<b>F<sub>0</sub></b>	Force initiale
<b>L<sub>0</sub></b>	Longueur initial
<b>Y</b>	Modules de Young
<b>α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub></b>	Coefficients de dilatation thermique
<b>f<sub>0</sub></b>	Force à la température de référence T <sub>0</sub>
<b>L</b>	Largeur
<b>K</b>	Constante
<b>W</b>	Pulsation

## **Résumé**

La surveillance des signes vitaux par des capteurs intelligents est une application cruciale dans le domaine médical et de la santé. Ces capteurs sont conçus pour mesurer et surveiller des paramètres physiologiques importants.

L'objectif de ce mémoire est de développer un capteur intelligent à base d'un polymère composite et d'un alliage à mémoire de forme. Cette recherche est de concevoir un capteur capable de mesurer en temps réel des paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle et la température corporelle, en exploitant les propriétés uniques des matériaux utilisés.

Cette étude ouvre la voie à de nouvelles avancées technologiques dans le domaine de la santé connectée et offrent des opportunités pour le développement de dispositifs médicaux intelligents et non invasifs.

Les mots clés : capteur intelligent, polymère composite, alliage mémoire de forme, signes vitaux, matériaux intelligent

## **Abstract:**

Monitoring of vital signs by smart sensors is a crucial application in the medical and healthcare field. These sensors are designed to measure and monitor important physiological parameters.

The objective of this thesis is to develop an intelligent sensor based on a composite polymer and a shape memory alloy. This research is to design a sensor capable of real-time measurement of physiological parameters such as heart rate, blood pressure and body temperature, by exploiting the unique properties of the materials used.

This study paves the way for new technological advances in the field of connected health and offers opportunities for the development of smart and non-invasive medical devices.

Key words: smart sensor, composite polymer, shape memory alloy, vital signs, smart materials

## الملخص

تعد مراقبة العلامات الحيوية بواسطة أجهزة الاستشعار الذكية أحد التطبيقات المهمة في المجال الطبي والرعاية الصحية. تم تصميم هذه المستشعرات لقياس ومراقبة المعلمات الفسيولوجية المهمة. الهدف من هذه الأطروحة هو تطوير جهاز استشعار ذكي يعتمد على البوليمر المركب وسبائك ذاكرة الشكل. يهدف أيضا إلى تصميم جهاز استشعار قادر على القياس في الوقت الفعلي للمعلمات الفسيولوجية مثل معدل ضربات القلب وضغط الدم ودرجة حرارة الجسم، من خلال استغلال الخصائص الفريدة للمواد المستخدمة. تمهد هذه الدراسة طريقا للتقدم التكنولوجي الجديد في مجال الصحة المتصلة وتوفر فرصا لتطوير أجهزة طبية ذكية وغير جراحية.

الكلمات المفتاحية: أجهزة الاستشعار الذكية، بوليمر مركب، سبيكة ذاكرة الشكل، إشارات حيوية، مواد ذكية

:

# SOMMAIRE

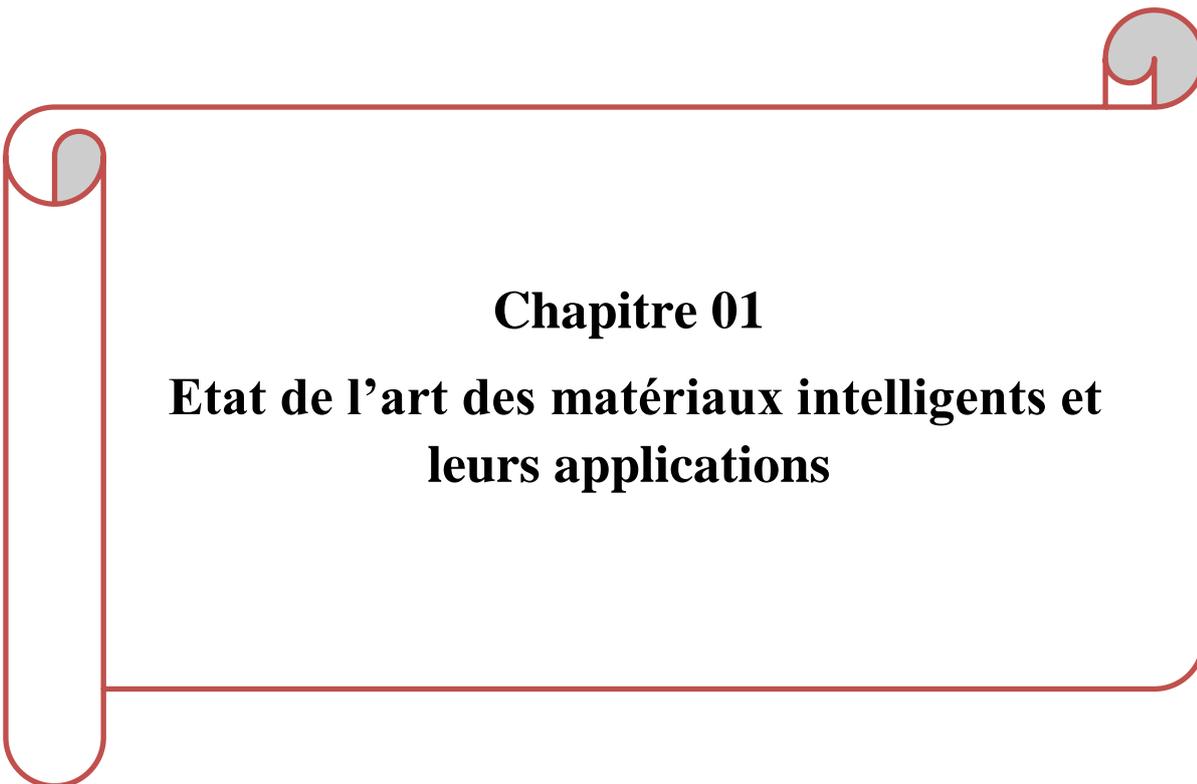
Table des matières	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Abréviations et symboles	
Résumés	
Table des matières	
Introduction générale-----	1
<b>Chapitre 01: Etat de l'art des matériaux intelligents et leurs applications-----</b>	<b>2</b>
1. Introduction-----	3
2. Les matériaux intelligents-----	3
2.1. Définition-----	4
2.2. Différents types des matériaux intelligents-----	5
2.2.1. Les méta-matériaux-----	5
2.2.1.1. Définition-----	5
2.2.1.2. Historique-----	5
2.2.1.3. Caractéristiques des métras matériaux-----	6
2.2.1.4. Les applications des méta-matériaux-----	6
2.2.2. <i>Les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs</i> -----	7
2.2.2.1. <i>Le phénomène de la piézoélectricité</i> -----	7
2.2.2.2. <i>Principales classes de matériaux piézoélectriques</i> -----	7
2.2.2.3. <i>Application</i> -----	8
2.2.2.4. <i>Choix du matériau Piézoélectrique</i> -----	9
2.2.3. Les matériaux magnétostrictifs-----	10
2.2.3.1. <i>Définition</i> -----	10
2.2.3.2. <i>Historique</i> -----	11
2.2.3.3. <i>Application</i> -----	11
2.3. Les avantages et les inconvénients des matériaux intelligents-----	12
3. Les MEMS-----	12
3.1 Analyse du marché des MEMS-----	12
3.2 Historiques-----	14
3.3 Définition de microsystèmes-----	14
3.3.1. Les principes physiques du microsysteme-----	14
3.4 Production des MEMS-----	15

4.	Conclusion-----	16
	<b>Chapitre 02: : Polymère composite-----</b>	<b>17</b>
1.	Introduction-----	18
2.	Définition polymère composite-----	18
3.	Historique-----	19
4.	Avantage des polymères composites par rapport aux matériaux traditionnels-----	20
5.	Applications des polymères composites dans diverses industries-----	20
5.1.	Industrie aérospatiale -----	20
5.2.	Industrie automobile -----	20
5.3.	Industrie du sport -----	21
5.4.	Industrie de l'énergie-----	21
6.	Type des polymères composites-----	21
6.1.	Le Polyuréthane (PU)-----	21
6.1.1.	Définition-----	21
6.1.2.	Propriétés du PU-----	22
6.1.3.	Méthodes de synthèse du PU -----	23
6.1.4.	Polymères composites à base de PU-----	24
6.1.4.1	Fabrication de polymères composites à base de PU -----	24
6.1.4.2	Propriétés des polymères composites à base de PU-----	25
6.1.4.3	Applications des polymères composites à base de PU -----	25
6.2.	Polymères composites à base de PZT -----	26
6.2.1.	Fabrication de polymère composite à base de plomb-zirconate-titane -----	26
6.2.2.	Propriétés des polymères composites à base de plomb-zirconate-titane -----	27
6.2.3.	Applications des polymères composites à base de plomb-zirconate-titane-----	28
6.3.	Le GRAPHENE -----	28
6.3.1	Définition-----	28
6.3.2	Les propriétés du GRAPHENE -----	29
6.3.3	Fabrication du GAPHENE-----	29
6.3.4	Polymère composite à base d'un GRAPHENE -----	30
6.3.4.1	Fabrication de polymère composite à base d'un GRAPHENE-----	30
6.3.4.2	Propriétés des polymères composites à base de GRAPHENE -----	30
6.3.4.3	Applications des polymères composites à base de GRAPHENE -----	31
6.3.5	Fabrication des polymères composites à base de PU ; PZT et GRAPHENE -----	31
6.3.6	Applications des polymères composites à base de PU ; PZT et GRAPHENE-----	32
6.4.	Les alliages à mémoire de forme -----	33
6.4.1.	Définition-----	33
6.4.2.	Histoire des AMF -----	34

6.4.3.	Propriétés des AMF-----	34
6.4.4.	Fabrication AMF -----	35
6.4.4.1	Techniques de fabrication-----	35
6.4.4.2	Caractérisation des alliages à mémoire de forme-----	36
6.4.5.	Applications des alliages à mémoire de forme -----	38
6.4.6.	Les perspectives d'avenir pour l'amélioration des propriétés et des applications des alliages à mémoire de forme-----	41
7.	Conclusion-----	42
<b>Chapitre 03: Modélisation et Simulation -----</b>		<b>43</b>
1.	Introduction-----	44
2.	Procédure de Modélisation-----	44
3.	Composite PU-PZT/GRAPHENE -----	49
4.	Les procédures de la modélisation et de la simulation de l'AMF -----	54
5.	Composite PU-PZT-GRAPHENE avec AMF -----	61
6.	Conclusion-----	65
7.	Conclusion générale -----	66

### Introduction générale

Les matériaux intelligents ont suscité un intérêt considérable dans de nombreux domaines de l'ingénierie en raison de leurs capacités uniques et de leurs applications prometteuses. Dans ce contexte, notre étude se concentre sur le développement d'un capteur intelligent basée sur un polymère composite et un alliage à mémoire de forme. Le capteur intelligent développe présente des propriétés exceptionnelles qui lui permettent de répondre aux stimuli externes de manière adaptative et de conserver cette réponse en mémoire, Le premier chapitre de nos recherches est consacré à l'art le plus récent des matériaux intelligents et à leurs applications. Nous explorons les avancées récentes dans ce domaine en nous concentrant sur les matériaux à mémoire de forme et les polymères intelligents. Nous discutons également des différentes techniques utilisées pour caractériser et évaluer les performances de ces matériaux, Le deuxième chapitre se concentre spécifiquement sur les polymères composites. Nous examinons les caractéristiques des polymères composites, leur structure et leurs propriétés mécaniques. De plus, nous passons en revue les différentes techniques de fabrication des polymères composites, telles que l'infusion, l'injection, la pultrusion, etc. Nous abordons également les principaux avantages des polymères composites par rapport aux matériaux conventionnels, notamment leur légèreté, leur résistance et leur capacité à être modifiés pour répondre à des besoins spécifiques. Ces caractéristiques en font des candidats idéaux pour notre mémoire de capteur intelligent. Dans le troisième chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation et la simulation Nous présentons les différentes approches utilisées pour modéliser le comportement des polymères composites et des alliages à mémoire de forme. Nous discutons également des outils et des logiciels de simulation qui peuvent être utilisés pour prédire et analyser le comportement de notre étude intelligent dans des conditions spécifiques. Grâce à la modélisation et à la simulation, nous pouvons optimiser la conception d'un capteur intelligent et prédire ses performances avant même sa fabrication. Notre recherche vise à développer ce capteur intelligent qui représente une avancée prometteuse dans le domaine de la surveillance des signes vitaux. Son utilisation permet une surveillance précise, non invasive et confortable, améliorant ainsi la qualité des soins médicaux et ouvrants de nouvelles perspectives dans le domaine de la médecine personnalisée et de la télémédecine. Nous terminons notre étude avec une conclusion et perspectives.



**Chapitre 01**  
**Etat de l'art des matériaux intelligents et**  
**leurs applications**

## 1. Introduction

Le monde de la technologie est en constante évolution, et avec elle, les matériaux qui la composent. Les composites, en particulier, sont des matériaux qui continuent d'évoluer pour répondre à la demande croissante de produits à la fois économiques et performants. De plus, dans un souci de préservation de l'environnement et de la santé publique, les composites tendent à devenir de plus en plus écologiques. Ces matériaux sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreuses industries, et leur importance ne cesse de croître. Les matériaux intelligents ou adaptatifs, quant à eux, sont une autre classe de matériaux qui suscite un grand intérêt. Composés de matériaux tels que les piézoélectriques, les électrostrictifs et les magnétostrictifs, ils ont la capacité de modifier leurs propriétés physiques en réponse à un stimulus externe, tel qu'une contrainte mécanique, un champ électrique ou magnétique, ou un changement de température. Les matériaux magnétostrictifs, en particulier, sont très utiles en tant qu'actionneurs et capteurs, car ils peuvent transformer l'énergie mécanique en énergie magnétique, et vice versa. Les efforts de recherche continuent de se concentrer sur ces matériaux pour exploiter leurs propriétés uniques dans des domaines d'application spécifiques.

## 2. Les matériaux intelligents

Au fil des siècles, nos sociétés ont su évoluer et se perfectionner en s'adaptant à leur environnement. Les premières civilisations ont utilisé des matériaux naturels tels que le bois, la pierre, le cuir, l'os, la corne, le lin ou le chanvre pour construire leur monde. Par la suite, l'avènement des matières plastiques et des composites a entraîné des répercussions dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, l'automobile, l'aéronautique, le sport et le secteur militaire. Nous sommes actuellement à l'aube de la troisième génération de matériaux, celle des matériaux multifonctionnels capables de s'adapter à leur environnement. Ces matériaux intelligents représentent une véritable révolution pour le XXI<sup>e</sup> siècle, tout aussi importante que celles liées aux révolutions de la communication ou des biotechnologies [1]

Le marché des matériaux intelligents est en croissance rapide en raison de l'augmentation de la demande pour des matériaux qui peuvent s'adapter à leur environnement et offrir des fonctionnalités avancées. Les matériaux intelligents sont des matériaux qui peuvent changer leurs propriétés physiques ou chimiques en réponse à des stimuli externes tels que la chaleur, la lumière, l'humidité ou les champs électrique. Selon un rapport de recherche de le marché mondial des matériaux intelligents devrait atteindre 7,8 milliards de dollars d'ici 2024, avec un taux de

croissance annuel composé de 12,5% entre 2019 et 2024. Les facteurs clés de cette croissance incluent la demande croissante pour des matériaux intelligents dans les applications automobiles et de construction, ainsi que l'augmentation de la recherche et développement dans ce domaine [2] .

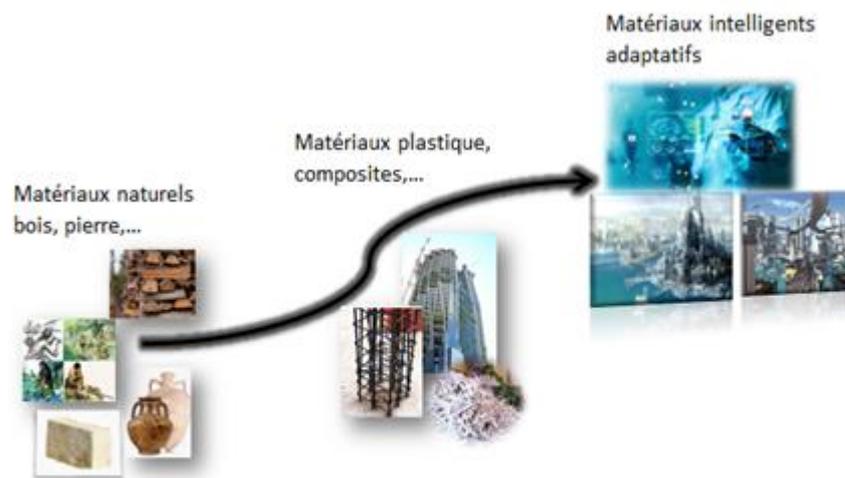


Figure. 1. Evolution des matériaux dans le temps

## 2.1. Définition

Les matériaux intelligents sont des matériaux qui ont la capacité de réagir de manière autonome à leur environnement. Ils peuvent être programmés pour changer de forme ou de propriété en réponse à des stimuli externes tels que la température, la pression, l'humidité ou la lumière. [3] Les matériaux intelligents ont la capacité d'être sensibles, adaptatifs et évolutifs. Ils peuvent jouer le rôle de capteurs pour détecter des signaux, d'actionneurs pour effectuer des actions sur leur environnement ou même de processeurs pour traiter, comparer et stocker des informations. Ces matériaux peuvent modifier spontanément leurs propriétés physiques telles que leur forme, leur connectivité, leur viscoélasticité ou leur couleur, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'intérieur ou de l'extérieur du matériau, tels que des variations de température, des contraintes mécaniques, des champs électriques ou magnétiques. En adaptant leur réponse, ces matériaux peuvent signaler une modification de leur environnement et dans certains cas, provoquer une action corrective. Par exemple, ils peuvent détecter des faiblesses de structures dans le revêtement d'un avion, des fissures apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton, réduire les vibrations des pales d'un hélicoptère ou encore, être utilisés pour insérer des

filtres dans les artères pour réduire le risque de dispersion de caillots sanguins[4]. Il existe différents types de matériaux intelligents.

## 2.2. Différents types des matériaux intelligents

### 2.2.1. Les méta-matériaux

#### 2.2.1.1. Définition

Les méta-matériaux sont des matériaux artificiels conçus pour avoir des propriétés électromagnétiques inhabituelles qui ne se trouvent pas dans les matériaux naturels. Ils sont fabriqués à partir de structures artificielles en trois dimensions qui sont conçues pour manipuler la lumière, les ondes radio, les micro-ondes ou d'autres types de rayonnement électromagnétique de manière inattendue. Les méta-matériaux ont des propriétés optiques qui n'existent pas dans la nature, telles que la réfraction négative de la lumière, qui permet à la lumière de se plier dans des directions inhabituelles. Les méta-matériaux ont des applications dans les antennes, les capteurs, les dispositifs d'invisibilité, les technologies de l'information et les applications médicales. [5]

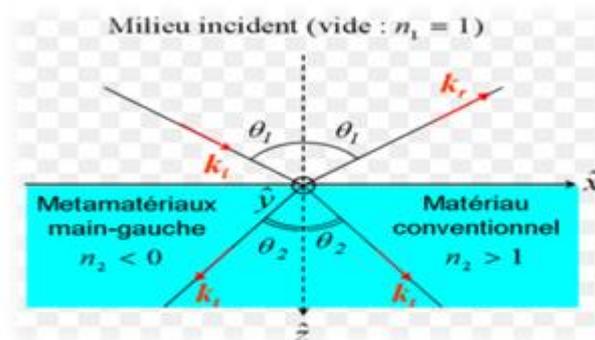


Figure. 2. Méta-matériaux. [5]

#### 2.2.1.2. Historique

Les métras-matériaux sont des matériaux synthétiques développés par l'homme qui possèdent des propriétés physiques exceptionnelles. Depuis les années 1960, des recherches menées dans des laboratoires du monde entier ont régulièrement mis en lumière les avancées dans ce domaine. Les travaux du physicien russe Victor Veselago ont théorisé les métras matériaux, mais ce n'est qu'en 2000 que leurs propriétés ont été pleinement dévoilées grâce aux expériences menées par les physiciens John Pendry et David Smith sur des prototypes de capes d'invisibilité. Les métras matériaux présentent des propriétés électromagnétiques, acoustiques,

sismiques, thermiques et mécaniques qui ne se retrouvent pas dans les matériaux naturels. Ces matériaux sont constitués de structures périodiques diélectriques ou mécaniques, qui se comportent comme un matériau homogène, mais qui n'existent pas à l'état naturel [6]

### **2.2.1.3. Caractéristiques des métras matériaux**

Les métras matériaux ont des caractéristiques physiques uniques qui les différencient des matériaux naturels. Voici quelques-unes des caractéristiques les plus courantes :

Les caractéristiques des métra-matériaux peuvent inclure une permittivité ou une perméabilité effective négative, une polarisation du champ magnétique de résonance, un indice de réfraction négatif, une réfraction superficielle, une dispersion anormale, une anisotropie et une chiralité. Ces propriétés ont des applications dans de nombreux domaines, tels que l'optique, les télécommunications, la défense, les capteurs et la médecine [7]

Les métras matériaux sont des matériaux artificiels avec des propriétés physiques exceptionnelles qui leur permettent de manipuler la lumière et les ondes électromagnétiques de manière unique, ainsi que d'autres types d'ondes. Ils sont créés avec des structures périodiques bien plus petites que la longueur d'onde de la lumière ou des ondes électromagnétiques qu'ils sont censés interagir, et ils n'existent pas à l'état naturel. [8]

### **2.2.1.4. Les applications des métra-matériaux**

Les métra-matériaux ont de nombreuses applications dans différents domaines, notamment :

- Antennes : les métra-matériaux peuvent être utilisés pour améliorer les performances des antennes en augmentant leur bande passante et leur directivité.
- Dispositifs d'invisibilité : les métra-matériaux peuvent être utilisés pour créer des structures qui ont des propriétés de réfraction négative, ce qui peut rendre des objets invisibles aux ondes électromagnétiques.
- Capteurs : les métra-matériaux peuvent être utilisés pour créer des capteurs de haute précision pour mesurer les propriétés électromagnétiques de l'environnement.
- Technologies de l'information : les métra-matériaux peuvent être utilisés pour créer des composants optiques miniatures pour les technologies de l'information, telles que les ordinateurs quantiques.
- Applications médicales : les métra-matériaux peuvent être utilisés pour créer des lentilles de contact et des implants qui ont des propriétés optiques personnalisées. [9]

### ***2.2.2. Les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs***

Les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs sont deux types de matériaux qui ont la capacité de se déformer en réponse à un champ électrique appliqué.

#### ***2.2.2.1. Le phénomène de la piézoélectricité***

La piézoélectricité est un phénomène électromécanique où certains matériaux sont capables de produire une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique, comme une pression ou une vibration. De même, ils peuvent subir une déformation physique en réponse à un champ électrique appliqué. C'est un effet réversible qui est utilisé dans de nombreuses applications, notamment les capteurs de pression, les transducteurs d'ultrasons, les allumeurs piézoélectriques, les actionneurs piézoélectriques et les systèmes d'imagerie médicale... [10] ces matériaux possédant une propriété spéciale peuvent se polariser lorsqu'ils sont soumis à une contrainte et se déformer lorsqu'ils sont exposés à un champ électrique. Dans le cas de certains matériaux tels que le quartz, cet effet est observable naturellement. L'application d'une force génère un champ électrique (effet piézoélectrique direct), tandis que l'application d'un champ électrique entraîne la déformation du matériau (effet piézoélectrique inverse). Les céramiques possédant ces caractéristiques piézoélectriques sont initialement polarisées dans un champ électrique à une température contrôlée. Une fois produites sous forme de céramiques massives, elles sont capables de générer des contraintes atteignant environ 40 MPA, avec des déformations relatives allant de 1000 à 2000 ppm [11]

#### ***2.2.2.2. Principales classes de matériaux piézoélectriques***

Les principales classes de matériaux piézoélectriques sont :

- Les céramiques piézoélectriques : ce sont des matériaux cristallins inorganiques tels que le quartz, la tourmaline, la céramique à base de plomb zirconate-titane (PZT), l'aluminate de plomb ( $\text{PbAl}_2\text{O}_4$ ) et le titanate de plomb ( $\text{PbTiO}_3$ ).
- Les polymères piézoélectriques : ce sont des matériaux organiques qui présentent une polarisation spontanée en raison de leur structure moléculaire asymétrique, tels que le polyvinylidène difluorure (PVDF), le copolymère éthylène trifluoroéthylène (PVDF-TrFE) et le polyacrylate de vinyle (PVA).

- Les cristaux liquides piézoélectriques : ce sont des matériaux organiques à base de molécules de cristaux liquides qui ont des propriétés piézoélectriques.
- Les semi-conducteurs piézoélectriques : ce sont des matériaux cristallins tels que le silicium, le germanium et le gallium arsenide qui sont capables de produire une polarisation spontanée en réponse à une contrainte mécanique. [12]

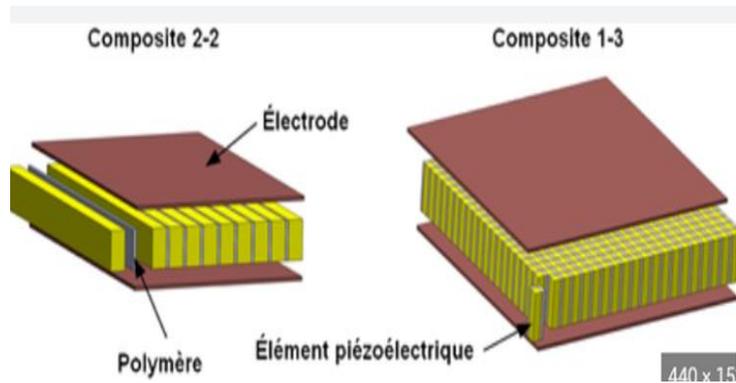


Figure. 3. Piézoélectrique [13]

### 2.2.2.3. Application

Les matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés dans deux types de structures : les structures quasi-statiques et les structures résonnantes. Chacune de ces structures offre des avantages spécifiques en fonction de l'application :

- Des structures quasi-statiques : Utilisent des matériaux piézoélectriques pour créer des changements de forme lents et continus. Ces structures sont utilisées dans les actionneurs piézoélectriques, les capteurs de pression, les systèmes de positionnement de précision et les dispositifs de contrôle de vibration.
- Des structures résonnantes : Utilisent des matériaux piézoélectriques pour créer des vibrations à haute fréquence et à faible amplitude. Ces structures sont utilisées dans les capteurs de vibration, les filtres à ondes acoustiques, les oscillateurs électroniques et les générateurs d'ultrasons

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 [14]

**Tableau.1.** Applications des matériaux piézoélectriques en fonction de l'effet utilisé [15]

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

#### 2.2.2.4. Choix du matériau Piézoélectrique

La comparaison des valeurs caractéristiques de matériaux piézoélectriques permet de choisir le matériau le plus adapté à l'action qui sera utilisé

Tableau. 2. Caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques. [16]

	Quartz $\text{SiO}_2$	PVDF	PZT
Densité ( $\text{g} / \text{cm}^3$ )	2.65	1.76	7.5
Constante diélectrique $\epsilon_r$	4.5	12	200-4000
Constante de charge $d_{33} \times 10^{-12}$	2	20	40-750
Constante de tension $g_{33} \times 10^{-3}$	50	190	15-40
Température de curie ( $^{\circ}\text{C}$ )	573	180	<350
Coefficient de couplage K(%)	10	14	40-70

### 2.2.3. Les matériaux magnétostrictifs

#### 2.2.3.1. Définition

Les matériaux magnétostrictifs sont des matériaux qui ont la capacité de changer de forme en réponse à un champ magnétique. Cette propriété est connue sous le nom de magnétostriction. Lorsqu'un matériau magnétostrictif est exposé à un champ magnétique, les domaines magnétiques à l'intérieur du matériau se réalignent, ce qui provoque une déformation du matériau. [17]

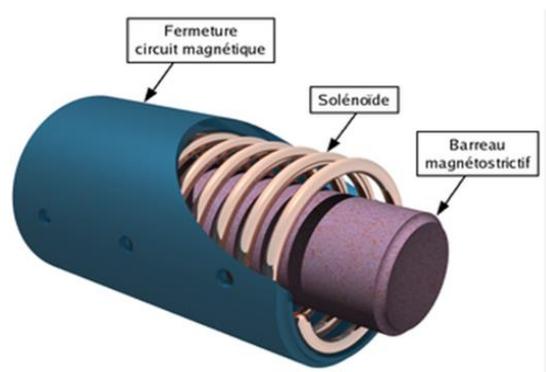


Figure. 4. Schéma de principe d'un transducteur magnétostrictif. [13]

### 2.2.3.2. *Historique*

Les matériaux magnétostrictifs ont été découverts au XIXe siècle, lorsque le physicien James Joule a découvert l'effet magnétostriction, qui est le changement de forme d'un matériau en réponse à un champ magnétique. Depuis lors, de nombreux scientifiques ont étudié cet effet et ont découvert de nouveaux matériaux magnétostrictifs. Au XXe siècle, ces matériaux ont été largement utilisés dans diverses applications telles que les haut-parleurs, les transformateurs et les capteurs. Au fil du temps, de nouveaux matériaux ont été développés, et aujourd'hui, les matériaux magnétostrictifs continuent d'être étudiés et développés pour de nouvelles applications dans les domaines de l'énergie, de l'électronique et de la robotique. [18]

### 2.2.3.3. *Application*

Les matériaux magnétostrictifs ont des propriétés intéressantes qui permettent leur utilisation dans une variété d'applications, y compris les capteurs, les actionneurs et les émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques.

- Le capteur magnétostrictif

Le capteur magnétostrictif convertit une mesure physique en un signal électrique en utilisant un matériau magnétostrictif. Lorsque ce matériau est soumis à une contrainte mécanique, il subit une modification de sa structure cristalline qui affecte son champ magnétique, ce qui est ensuite mesuré par le capteur. Les capteurs magnétostrictifs ont une large gamme d'applications, telles que la mesure de contraintes, de pression, de température, de déformation et de position.

- Les actionneurs magnétostrictifs

Produisent un mouvement mécanique en utilisant un matériau magnétostrictif soumis à un champ magnétique. Lorsque le champ magnétique varie, le matériau magnétostrictif se dilate ou se contracte, produisant ainsi un mouvement mécanique

- Les émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques

Sont utilisés pour produire et détecter des ondes élastiques, telles que les ondes acoustiques et les ondes de surface. Les matériaux magnétostrictifs peuvent être utilisés dans les émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques pour produire des ondes acoustiques ou pour détecter les ondes réfléchies.

### 2.3. Les avantages et les inconvénients des matériaux intelligents

Ce **tableau.3** Représente les différentes catégories des matériaux intelligents et les différentes technologies de récupération d'énergie vibratoire (électromagnétique, piézoélectrique, électrostatique, magnétostriction) et les avantages et inconvénients de cette type.

**Tableau. 3.** Comparaison des différentes technologies de récupération d'énergie vibratoire

Technologie	Avantages	Inconvénients
Electromagnétisme	Fonctionnement maîtrisé	Système imposant Difficile à miniaturiser Faible voltage produit
Piézoélectricité	Voltage produit élevé Couplage fort du PZN-PT Système compact Facile à miniaturiser	Fragilité du PZT Vieillessement et dépolariation Haute impédance de sortie Couplage faible de PVDF
Electrostatique	Fonctionnement maîtrisé Voltage produit élevé Facile à miniaturiser	Source externe de voltage Haut capacitance Source vibrante parfaitement Maîtrisée
Magnétostriction	Fort coefficient de couplage Très innovant	Système volumineux Méconnaissance du comportement Difficile à miniaturiser Usinage délicat

## 3. Les MEMS

### 3.1 Analyse du marché des MEMS

En 2020, le marché mondial des MEMS a été évalué à 10,92 milliards USD. Au cours de la période de prévision 2021-2026, on prévoit que ce marché atteindra 18,88 milliards USD, avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 8,71 %. Plusieurs facteurs importants influencent la croissance de ce marché, notamment la popularité croissante de l'IoT dans les semi-conducteurs, la demande croissante d'électronique grand public intelligente et d'appareils portables, ainsi que l'adoption croissante de l'automatisation dans les industries et les foyers. Les dispositifs portables représentent une évolution majeure de l'IoT et un

nouveau domaine d'application pour les capteurs MEMS [19]. Les MEMS utilisés dans ces produits exploitent des cartes de circuits imprimés minces et flexibles pour améliorer le facteur de forme. Comme les facteurs de forme standard utilisent encore des dispositifs MEMS grand public, les fournisseurs de MEMS sont sous pression pour réduire encore la hauteur et l'empreinte du boîtier du capteur, afin de donner au produit final une meilleure apparence et une meilleure sensation, avec des fonctionnalités supplémentaires. Les MEMS jouent également un rôle clé dans l'industrie de l'automatisation, offrant une sensibilité, une fiabilité, une évolutivité et une conception rentable grâce à leur technologie. Les accéléromètres et les gyroscopes MEMS sont particulièrement adaptés à une large gamme d'applications d'automatisation industrielle, en raison de leur petite taille, de leur grande fiabilité et de leur faible consommation d'énergie. La pandémie de COVID-19 a également accéléré l'innovation dans le domaine des MEMS, en particulier dans les secteurs médicaux, des télécommunications, de la téléphonie mobile et de la consommation, stimulant ainsi le marché des MEMS. La demande de dispositifs minuscules est en hausse, de l'imagerie thermique aux tests rapides en passant par les outils de détection de SRAS-CoV-2 basés sur la micro fluidique. Les MEMS ont également été utilisés Pour la fabrication de ventilateurs, de capteurs de pression et de débitmètres pour aider à gérer les échanges gazeux et contrôler la pression de l'air soufflé et entrant dans les poumons du patient. Cependant, les entreprises de MEMS sont confrontées à des obstacles dans la fabrication de prototypes et de dispositifs, en raison d'un accès limité aux installations de fabrication et de la capacité limitée des organisations à gérer la production de MEMS. Cela a un impact direct sur la normalisation de la fabrication. Malgré ces défis, les perspectives de croissance pour le marché des MEMS sont positives, en raison de l'adoption croissante de l'IoT, de l'automatisation industrielle et de la demande de technologies innovantes pour lutter contre les défis mondiaux. [19]



Figure.5. marché du MEMS [19]

### 3.2 Historiques

Dans les années 1970, les MEMS ont évolué comme une ramification de la microélectronique. Ils sont entrés dans l'arène commerciale dans les années 1980, en commençant par les capteurs de pression en silicium. Celles-ci ont rapidement supplanté les méthodes traditionnelles et continuent de constituer une part substantielle de l'industrie électronique. Depuis leur création, les MEMS ont connu des progrès remarquables et continuent de prospérer. Nouvelle discipline scientifique, les MEMS englobent un amalgame de méthodologies électroniques, chimiques, mécaniques, informatiques et optiques. Alors que sa base repose principalement sur le silicium, d'autres matériaux trouvent une utilisation en fonction de leur adéquation à des fonctions spécifiques, y compris, mais sans s'y limiter, les métaux, les matériaux piézoélectriques et les polymères multiples. La croissance de cette industrie a conduit à la création de nouveaux termes pour décrire des types distincts de dispositifs MEMS. Dans le domaine optique on utilise le terme MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical Systems) ou Optical MEMS ; dans le domaine biologique on utilise bioMEMS. On notera aussi un nouveau terme, NEMS (Nano Electro Mechanical Systems), Nano systèmes en français, désignant des structures semblables aux MEMS mais de taille nanométrique. [20]

### 3.3 Définition de microsystèmes

Un microsystème est un assemblage de dispositifs de taille micrométrique. Un microsystème peut contenir un capteur de température, de l'électronique analogique pour la conversion des valeurs du capteur et de l'électronique numérique pour l'interfaçage avec d'autres puces, le tout intégré dans un seul composant électronique. Quand le microsystème comprend des parties mobiles, on emploie le terme de microsystème électromécanique. Les microsystèmes ont été développés au début des années 1970 en tant que dérivés de la micro-électronique et leur première commercialisation remonte aux années 1980 avec des capteurs de pression sur silicium qui remplacèrent rapidement les technologies plus anciennes. Une autre utilisation importante au début des microsystèmes a été les accéléromètres des coussins gonflables de sécurité pour l'automobile. [21]

#### 3.3.1. Les principes physiques du microsystème

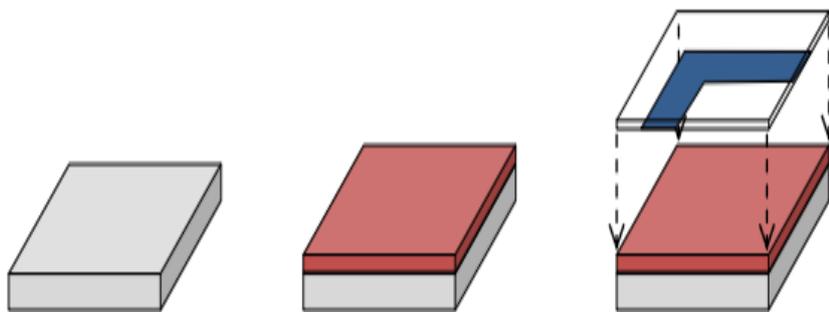
Les principes de conception des microsystèmes ne sont pas fondamentalement différents de ceux des microsystèmes systèmes macroscopiques, car les lois de la physique et les équations qui les décrivent existent toujours Surtout le même. Cependant, au regard de la loi de proportionnalité, l'importance de l'effet La physique dans ces équations change avec la taille du système. Rapport de fait L'interaction entre les différentes forces change à mesure que la

dimension diminue : la force La gravité est proportionnelle au volume d'un objet, la réduction de la taille réduit le poids Proportion cubique ; pression agissant sur une surface, force résultante Diminue avec le carré de la taille. On peut également citer la capillarité Il a un impact majeur sur l'impact sur les systèmes de réduction de dimensionnalité. [22]

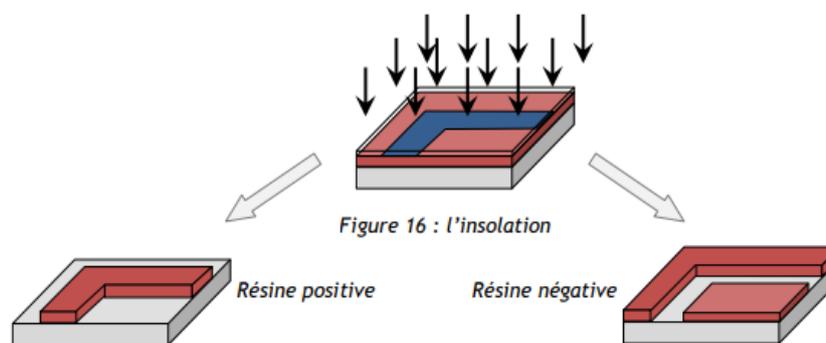
### 3.4 Production des MEMS

Les étapes de fabrication des technologies MEMS sont calquées sur celle de la production des circuits intégrés. Des procédés de gravure et de structuration du silicium ont été développés afin d'intégrer des fonctions mécaniques à des fonctions électriques ; ils ne sont pas développés dans cette ressource. Des procédés de gravure et de structuration du silicium ont été développés afin d'intégrer des fonctions mécaniques à des fonctions électriques.

- La photolithographie permet la délimitation des zones accessibles à la gravure et des zones non accessibles.
- La lithographie est une technique d'impression créée à la fin du 18e siècle par Aloys Senefelder. Le grec lithos (pierre) et graphène (écrire) le principe est de reporter sur une pierre calcaire plane un motif à l'aide d'un mélange gras.



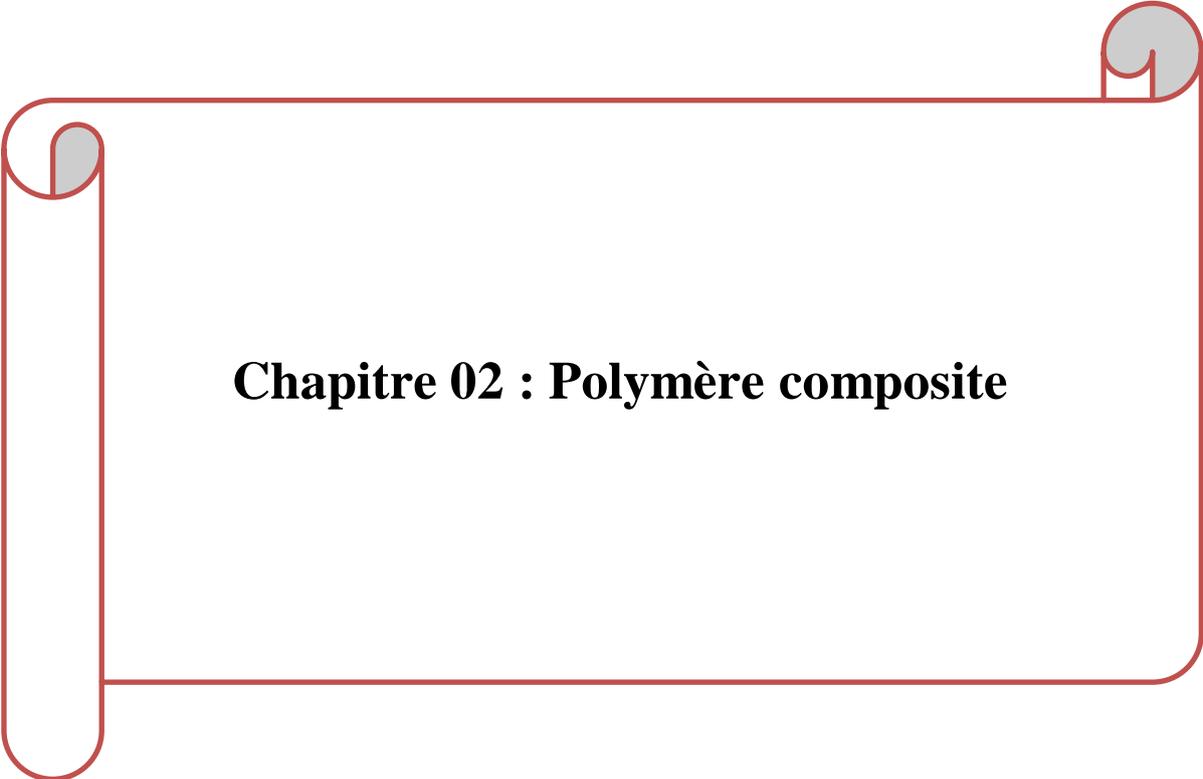
**Figure. 6.** le substrat dépôt de résine photosensible puis du masque. [23]



**Figure.7.** La révélation par dissolution en fonction du type de résine. [23]

## 4. Conclusion

Les avancées technologiques dans le domaine des générateurs et des actionneurs ont permis d'obtenir des structures plus flexibles. Cependant, la plupart des structures actuelles restent rigides et fabriquées à partir de matériaux comme les métaux ou les céramiques piézoélectriques qui peuvent être très fragiles. Même si les bobines et les aimants peuvent être réalisés sur des supports plus souples, ils restent tout de même des éléments rigides. C'est pourquoi les polymères électro-actifs, avec leurs propriétés physiques particulières et leur souplesse, sont considérés comme les meilleurs candidats pour développer des générateurs flexibles et des actionneurs souples. Ces matériaux sont capables de se déformer sous l'effet d'un champ électrique et de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, ce qui en fait une solution prometteuse pour les applications nécessitant une flexibilité et une adaptabilité accrues.



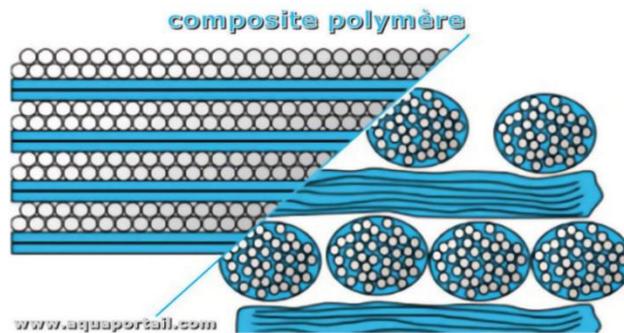
**Chapitre 02 : Polymère composite**

## 1. Introduction

Les polymères composites sont des matériaux qui ont révolutionné l'industrie moderne en raison de leur haute résistance, leur faible poids et leur résistance à la corrosion. Ils sont utilisés dans une variété d'applications, allant de l'aérospatiale à l'industrie automobile en passant par la construction et les sports. Les composites sont constitués d'un polymère qui est renforcé par des fibres ou des particules, qui améliorent la résistance et les propriétés mécaniques du matériau. Les matériaux composites sont souvent comparés à des matériaux traditionnels tels que le bois, le métal ou le béton en termes de propriétés mécaniques et de durabilité. Ils présentent de nombreux avantages par rapport à ces matériaux, notamment une résistance accrue aux chocs et aux vibrations, une meilleure résistance à la corrosion et une résistance accrue aux températures élevées. La recherche et le développement continuent de conduire à des améliorations dans les polymères composites, en particulier dans la réduction des coûts de production, l'amélioration des propriétés et la diversification des applications industrielles. Les avancées dans les domaines de la nanotechnologie et de la biotechnologie ouvrent également de nouvelles perspectives pour les polymères composites, avec des applications potentielles dans la médecine, l'électronique et l'énergie.

## 2. Définition polymère composite

Un polymère composite est un matériau constitué de deux phases principales : une matrice polymère et des renforts dispersés à l'intérieur de cette matrice. La matrice polymère agit comme une substance liante qui maintient les renforts en place, tandis que les renforts fournissent une résistance et des propriétés spécifiques au matériau composite. Les renforts dans les polymères composites peuvent prendre différentes formes, telles que des fibres, des particules ou des plaques, et peuvent être composés de matériaux tels que le verre, la céramique, le carbone ou les polymères renforcés de fibres. Les polymères composites sont connus pour leur combinaison de légèreté et de résistance mécanique, ce qui les rend utiles dans de nombreuses applications industrielles. Ils sont utilisés dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction, les sports et loisirs, où une légèreté, une résistance et une durabilité élevées sont nécessaires. [24]



**Figure.8.** Composite polymère. [13]

### 3. Historique

Les polymères composites ont une histoire qui remonte aux années 1930, lorsque des chercheurs ont commencé à expérimenter avec des matériaux renforcés de fibres pour améliorer les propriétés des polymères. Cependant, le véritable essor de l'utilisation des composites polymères a eu lieu dans les années 1950 et 1960, lorsque les premiers avions en matériaux composites ont été développés. Au cours des années 1970 et 1980, les composites polymères sont devenus de plus en plus populaires dans l'industrie aérospatiale et ont commencé à être utilisés dans d'autres domaines, tels que l'automobile, la construction navale et l'énergie éolienne. Les avantages des polymères composites, tels que leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leur résistance aux chocs, ont contribué à leur popularité croissante. Au fil des ans, de nouveaux types de fibres ont été développés pour renforcer les polymères, notamment les fibres de carbone, les fibres de verre et les fibres d'aramide. Les résines utilisées pour lier les fibres ont également évolué, passant des résines polyester aux résines époxy.

Aujourd'hui, les composites polymères sont largement utilisés dans une variété d'applications, de la construction de ponts et de bâtiments à la production de pièces pour l'industrie automobile et aérospatiale. Avec les avancées constantes dans les matériaux et les processus de fabrication, les polymères composites continuent d'évoluer et de trouver de nouveaux usages. [25]

#### **4. Avantage des polymères composites par rapport aux matériaux traditionnels**

Les polymères composites offrent plusieurs avantages par rapport aux matériaux traditionnels tels que les métaux et les céramiques. Voici deux avantages majeurs des polymères composites :

- Résistance élevée et légèreté
- Résistance à la corrosion
- Isolation électrique
- Résistance chimique

#### **5. Applications des polymères composites dans diverses industries**

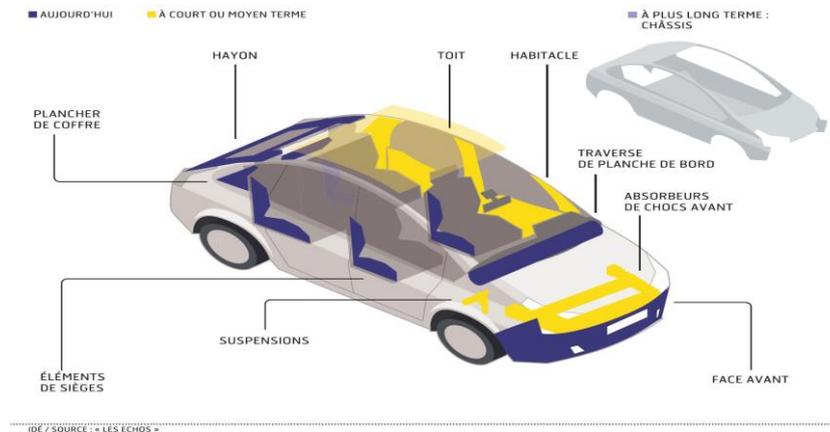
Les polymères composites sont utilisés dans une grande variété d'industries en raison de leurs propriétés uniques et de leur capacité à être adaptés à différentes applications. Voici trois exemples d'applications des polymères composites dans différentes industries :

##### **5.1. Industrie aérospatiale**

Les polymères composites, tels que la fibre de carbone renforcée de résine époxy, sont utilisés pour la fabrication de pièces aéronautiques légères et résistantes, comme les ailes d'avions, les nacelles de moteurs, les fuselages et les composants structurels. Ils offrent une excellente résistance aux contraintes mécaniques et une réduction significative du poids par rapport aux matériaux conventionnels.

##### **5.2. Industrie automobile**

Les polymères composites sont utilisés dans la fabrication de pièces automobiles légères, telles que les pare-chocs, les panneaux de carrosserie, les sièges et les composants intérieurs. Ces composites permettent de réduire le poids des véhicules, ce qui se traduit par une meilleure efficacité énergétique et des performances accrues.



**Figure.9.** La place des matériaux composites dans une automobile en 2014. [26]

### 5.3. Industrie du sport

Les polymères composites sont utilisés dans la fabrication d'équipements sportifs tels que les raquettes de tennis, les clubs de golf, les skis, les planches de surf, les casques de protection, etc. Ils offrent une combinaison de légèreté, de rigidité et de résistance qui améliore les performances des athlètes.

### 5.4. Industrie de l'énergie

Les polymères composites sont utilisés dans la fabrication d'éoliennes, de panneaux solaires, de câbles haute tension et d'autres équipements énergétiques. Ils offrent une grande résistance aux intempéries, à la fatigue et à la corrosion, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des environnements difficiles.

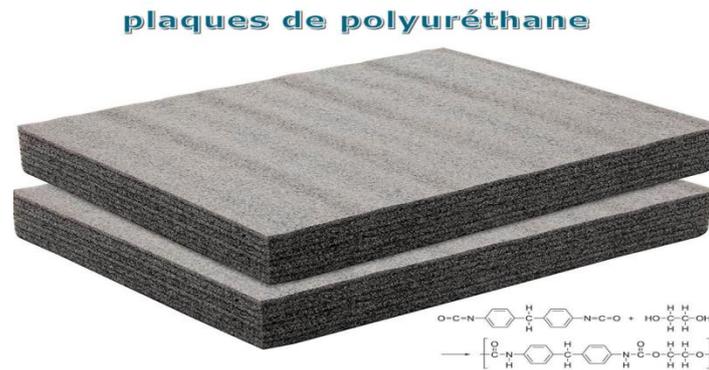
Ces exemples montrent que les polymères composites ont une large gamme d'applications dans différentes industries, et continuent d'être utilisés dans de nouveaux domaines en raison de leurs avantages uniques.

## 6. Type des polymères composites

### 6.1. Le Polyuréthane (PU)

#### 6.1.1. Définition

Le polyuréthane PU est un polymère composé d'unités organiques reliées par des liaisons en uréthane. C'est un matériau polyvalent qui peut être formulé pour être rigide ou flexible et peut être utilisé dans une variété d'applications, y compris l'isolation, les adhésifs, les mastics, les revêtements et les élastomères. Le PU est formé par une réaction chimique entre un polyol (un alcool à plusieurs groupes hydroxyle) et un diisocyanate (un composé chimique contenant deux groupes isocyanate). D'autres produits chimiques, tels que des catalyseurs, des agents gonflants et des tensioactifs, peuvent également être ajoutés à la formule pour obtenir des propriétés spécifiques. Le PU est connu pour sa durabilité, sa résistance à l'abrasion et aux produits chimiques, et ses excellentes propriétés isolantes. Il est utilisé dans un large éventail d'industries, y compris la construction, l'automobile, l'ameublement et la chaussure, entre autres. Cependant, certaines formes de PU peuvent libérer des composés organiques volatils (COV), qui peuvent être nocifs pour la santé humaine et l'environnement, il faut donc veiller à les utiliser de manière responsable. [27]



**Figure.10.** Plaques de polymère. [13]

### 6.1.2. Propriétés du PU

Les propriétés du polyuréthane peuvent varier considérablement en fonction de la formulation spécifique utilisée pour le produire. Cependant, certaines des propriétés générales du polyuréthane comprennent :

- Résistance à l'abrasion : Les polyuréthanes ont une excellente résistance à l'usure et à l'abrasion, ce qui les rend utiles pour les revêtements de sol et les roues industrielles.
- Résilience : Les polyuréthanes ont une grande résilience, c'est-à-dire qu'ils peuvent être comprimés et déformés, mais reviennent ensuite à leur forme d'origine. Cela les rend utiles pour les coussins, les matelas et les tapis de gymnastique.
- Faible conductivité thermique : Les polyuréthanes ont une faible conductivité thermique, ce qui les rend utiles comme isolants thermiques, par exemple pour les réfrigérateurs et les congélateurs.
- Bonne stabilité dimensionnelle : Les polyuréthanes ont une faible tendance à se déformer ou à se contracter avec le temps, ce qui les rend utiles pour les applications où une stabilité dimensionnelle est importante, comme les mousses d'isolation.
- Légèreté : Le PU est un matériau léger, ce qui le rend facile à manipuler et à transporter.
- Résistance aux UV : Le PU est résistant aux UV, ce qui le rend approprié pour une utilisation en extérieur, comme les revêtements de sol extérieurs.

Ces propriétés peuvent être modifiées en fonction de la formulation utilisée pour produire le polyuréthane, ainsi que du procédé de fabrication.

### 6.1.3. Méthodes de synthèse du PU

Le PU est un matériau synthétique utilisé dans de nombreux domaines, tels que l'isolation, l'automobile, l'ameublement et la construction. Il existe plusieurs méthodes pour synthétiser le PU :

- La méthode à deux composants : Cette méthode implique la réaction de deux composants principaux, le polyol et l'isocyanate. Le polyol est un liquide visqueux contenant des groupes hydroxyle (-OH) et l'isocyanate est un liquide toxique contenant des groupes isocyanate (-NCO). Lorsque les deux composants sont mélangés, ils réagissent pour former un mélange de PU en quelques minutes. Cette méthode est utilisée pour fabriquer des mousses de PU souples ou rigides.
- La méthode de la dispersion aqueuse : Cette méthode implique la dispersion de PU dans l'eau. Les composants principaux, le polyol et l'isocyanate, sont d'abord mélangés pour former un prépolymère. Ce pré polymère est ensuite dispersé dans de l'eau avec l'aide d'un émulsifiant. La réaction de polymérisation se produit ensuite pour former des particules de PU dans l'eau. Cette méthode est utilisée pour fabriquer des adhésifs, des revêtements et des textiles enduits de PU.
- La méthode de polymérisation en deux étapes : Dans cette méthode, la première étape consiste à préparer un diisocyanate (un composé contenant deux groupes isocyanate) et un polyol

(un composé contenant plusieurs groupes alcool). Ces deux composés sont mélangés dans des proportions définies et chauffés pour réagir et former un prépolymère contenant des groupes isocyanate. Dans la deuxième étape, le prépolymère est mélangé avec un diol (un composé contenant deux groupes alcool) et d'autres additifs pour former le PU final.

- La méthode de coulage : Dans cette méthode, les ingrédients nécessaires pour produire le PU (polyol, diisocyanate et additifs) sont mélangés dans un réservoir. Ce mélange est ensuite versé dans un moule et laissé durcir à température ambiante ou chauffé pour accélérer le processus de polymérisation. Cette méthode est souvent utilisée pour produire des mousses de PU qui peuvent être utilisées dans des matelas, des sièges de voiture et d'autres produits similaires. [28]

#### **6.1.4. Polymères composites à base de PU**

##### **6.1.4.1 Fabrication de polymères composites à base de PU**

La fabrication de polymères composites à base de PU implique généralement l'utilisation de polymères réactifs et de renforts tels que des fibres de verre, de carbone ou de kevlar. Les étapes clés de la fabrication des polymères composites à base de PU sont les suivantes :

- Préparation des matériaux : Les polymères réactifs et les renforts sont préparés en fonction des spécifications requises pour le matériau composite.
- Mélange des polymères : Les polymères réactifs sont mélangés ensemble pour former une résine. Des additifs tels que des catalyseurs et des agents de réticulation peuvent également être ajoutés à ce stade.
- Imprégnation des renforts : Les renforts sont immergés dans la résine pour être imprégnés. Cette étape est importante car elle permet de garantir une distribution uniforme de la résine à travers les renforts.
- Moulage : Le matériau composite est moulé dans la forme souhaitée en utilisant des techniques de moulage telles que l'injection, le laminage, le moulage par compression ou l'enroulement filamentaire.
- Durcissement : Le matériau composite est ensuite durci en fonction de la méthode de réticulation utilisée. Cela peut impliquer l'utilisation de la chaleur, de la pression, de la lumière ou de l'humidité.

Le choix des matériaux de renforcement et des polymères réactifs dépendra de l'application finale du matériau composite. Les polymères composites à base de PU sont utilisés dans une large gamme d'applications, y compris les pièces automobiles, les composants aéronautiques, les équipements sportifs, les revêtements de sol et les adhésifs. [29]

### 6.1.4.2 Propriétés des polymères composites à base de PU

Les polymères composites à base de PU sont des matériaux synthétiques formés par la combinaison de deux ou plusieurs composants différents, dont l'un est le polyuréthane. Ces composites sont connus pour présenter de nombreuses propriétés intéressantes, telles que :

**Résistance mécanique :** Les polymères composites à base de PU ont une résistance mécanique élevée, ce qui les rend utiles dans de nombreuses applications, notamment dans les domaines de l'ingénierie et de la construction.

- **Résistance à l'usure :** Les composites à base de PU sont également connus pour leur résistance à l'usure, ce qui les rend appropriés pour une utilisation dans des environnements où le frottement est un problème.
- **Résistance aux produits chimiques :** Les polymères composites à base de PU sont également résistants à de nombreux produits chimiques, tels que les acides et les alcalis.
- **Résistance aux intempéries :** Les composites à base de PU sont résistants aux intempéries, ce qui les rend appropriés pour une utilisation dans des environnements extérieurs.
- **Faible densité :** Les polymères composites à base de PU ont une faible densité, ce qui les rend légers et faciles à manipuler.
- **Isolation thermique et acoustique :** Les composites à base de PU ont une excellente isolation thermique et acoustique, ce qui les rend utiles dans de nombreuses applications, telles que l'isolation des bâtiments.
- **Facilité de transformation :** Les polymères composites à base de PU peuvent être facilement transformés en différentes formes et tailles pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

### 6.1.4.3 Applications des polymères composites à base de PU

Les polymères composites à base de PU sont utilisés dans de nombreuses applications différentes en raison de leurs propriétés mécaniques, de leur résistance à l'usure et de leur durabilité. Voici trois exemples d'applications courantes :

- **Revêtements de sol :** Les revêtements de sol en PU sont couramment utilisés dans les espaces commerciaux et industriels en raison de leur résistance à l'usure, de leur durabilité et de leur facilité de nettoyage. Les polymères composites à base de PU offrent une grande variété de couleurs, de motifs et de textures, ce qui les rend idéaux pour les revêtements de sol esthétiques et fonctionnels.

- Coques de bateaux : Les composites à base de PU sont utilisés pour fabriquer des coques de bateaux en raison de leur résistance à la corrosion et à l'eau salée. Les composites de PU sont également légers, ce qui permet aux bateaux de se déplacer plus rapidement et de consommer moins de carburant.
- Panneaux isolants : Les panneaux isolants à base de PU sont utilisés pour l'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments résidentiels et commerciaux. Les polymères composites à base de PU offrent une excellente isolation thermique, ce qui permet de réduire les coûts de chauffage et de refroidissement, ainsi qu'une bonne isolation acoustique, qui permet de réduire le bruit à l'intérieur des bâtiments.
- Les sports et loisirs : Les polymères composites à base de PU sont utilisés dans la fabrication de planches de surf, de skis, de raquettes de tennis et de raquettes de badminton. Ces matériaux offrent une grande légèreté, une résistance accrue et une flexibilité, ce qui les rend parfaits pour les sports de plein air.
- L'industrie automobile : Les polymères composites à base de PU sont utilisés pour la fabrication de pièces automobiles telles que des pare-chocs, des panneaux intérieurs, des sièges et des tableaux de bord. Ces matériaux sont légers et résistants, offrant une sécurité accrue aux passagers tout en réduisant le poids et la consommation de carburant du véhicule.

## 6.2. Polymères composites à base de PZT

### 6.2.1. Fabrication de polymère composite à base de plomb-zirconate-titane

Le PZT est un matériau complexe à fabriquer, et chaque étape doit être effectuée avec précision pour obtenir les propriétés piézoélectriques souhaitées. [30] et la fabrication de polymères composites à base PZT implique généralement les étapes suivantes :

- Préparation des matériaux : Les matériaux de base, tels que le plomb, le zirconate et le titane, doivent être préparés sous forme de poudres de haute pureté.
- Mélange des matériaux : Les poudres de plomb, de zirconate et de titane sont mélangées en proportions précises pour former un mélange homogène.
- Fabrication du polymère composite : Le mélange de poudres est ensuite ajouté à un polymère, tel que le polyvinylidène difluoride (PVDF), pour former un composite. Cette étape peut être réalisée par extrusion, moulage par injection ou laminage.
- Traitement thermique : Le polymère composite est ensuite soumis à un traitement thermique pour améliorer ses propriétés électriques et mécaniques. Cette étape implique généralement une cuisson à haute température pour consolider le composite.

- Usinage et finition : Le composite est ensuite usiné et fini selon les besoins pour produire le produit final.

Il convient de noter que la fabrication de polymères composites à base de PZT est une tâche complexe qui nécessite une expertise technique et des équipements spécialisés. Les procédés de fabrication peuvent varier en fonction des spécifications du produit final et des exigences de qualité. [31]

### 6.2.2. Propriétés des polymères composites à base de plomb-zirconate-titane

Les polymères composites à base de PZT sont des matériaux qui présentent des propriétés piézoélectriques, ce qui signifie qu'ils sont capables de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. Les propriétés spécifiques des polymères composites à base de PZT dépendent de la proportion de plomb, de zirconate et de titane dans le matériau, ainsi que des techniques de fabrication utilisées. Cependant, voici quelques propriétés générales des polymères composites à base de PZT :

- Haute sensibilité piézoélectrique : Les polymères composites à base de PZT sont connus pour leur sensibilité élevée à l'énergie mécanique, ce qui les rend utiles dans les capteurs et les actionneurs.
- Large gamme de fréquences : Les polymères composites à base de PZT peuvent être utilisés à des fréquences allant de quelques hertz à plusieurs mégahertz.
- Haute densité d'énergie : Les polymères composites à base de PZT peuvent stocker une grande quantité d'énergie dans un petit volume, ce qui les rend utiles dans les applications nécessitant une densité d'énergie élevée.
- Haute résistance aux chocs : Les polymères composites à base de PZT sont capables de résister à des chocs et des vibrations intenses sans se casser, ce qui les rend utiles dans les environnements difficiles.
- Faible coefficient de dilatation thermique : Les polymères composites à base de PZT ont un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui signifie qu'ils ne se dilatent pas beaucoup lorsqu'ils sont chauffés, ce qui peut réduire les contraintes thermiques dans les applications à haute température.
- Faible conductivité électrique : Les polymères composites à base de PZT ont une faible conductivité électrique, ce qui les rend utiles dans les applications nécessitant des matériaux diélectriques.

### 6.2.3. Applications des polymères composites à base de plomb-zirconate-titane

Les polymères composites à base de PZT ont une large gamme d'applications, Principalement en raison de leurs propriétés piézoélectriques et de leur capacité à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. Voici quelques exemples d'applications des polymères composites à base de PZT :

- Capteurs : Les polymères composites à base de PZT sont largement utilisés dans la fabrication de capteurs piézoélectriques, tels que les capteurs de pression, de température, de déplacement, de vibration, de débit et d'accélération.
- Actionneurs : Les polymères composites à base de PZT sont également utilisés comme actionneurs piézoélectriques, qui sont des dispositifs capables de générer des déplacements mécaniques à partir d'un signal électrique, tels que les actionneurs pour les miroirs de télescopes, les vérins piézoélectriques pour la micro-robotique, etc.
- Transducteurs : Les polymères composites à base de PZT sont utilisés comme transducteurs, qui convertissent l'énergie électrique en énergie acoustique ou vibratoire, tels que les transducteurs pour les applications sonar ou les transducteurs pour les ultrasons médicaux.
- Amplificateurs : Les polymères composites à base de PZT sont également utilisés comme amplificateurs piézoélectriques, qui sont capables d'amplifier un signal électrique sans nécessiter de composants électroniques supplémentaires.
- Convertisseurs d'énergie : Les polymères composites à base de PZT peuvent également être utilisés comme convertisseurs d'énergie, qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique, tels que les dispositifs de récupération d'énergie dans les véhicules automobiles.
- Dispositifs de stockage d'énergie : Les polymères composites à base de PZT sont également utilisés dans la fabrication de dispositifs de stockage d'énergie, tels que les batteries piézoélectriques, qui sont capables de stocker de l'énergie mécanique sous forme d'énergie électrique.

## 6.3. Le GRAPHENE

### 6.3.1 Définition

le GRAPHENE est une feuille de carbone pur avec une seule couche d'atomes Étroitement lié dans un maillage hexagonal en nid d'abeille, Ce matériau est considéré comme l'un des plus prometteurs du 21e siècle en raison de ses propriétés uniques, telles que la résistance, la conductivité thermique et électrique, la flexibilité et la légèreté. Le GRAPHENE est utilisé dans une variété d'applications, allant des écrans tactiles aux batteries et même en médecine. [32]

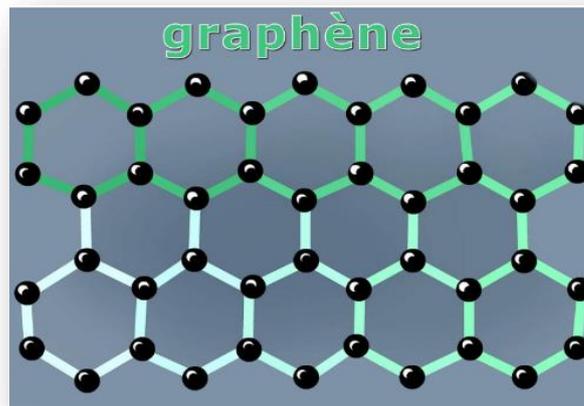


Figure. 11. GRAPHENE. [33]

### 6.3.2 Les propriétés du GRAPHENE

Le GRAPHENE a captivé le monde scientifique en raison de ses propriétés exceptionnelles, telles :

- une excellente conductivité thermique et électrique
- une mobilité électronique sans précédent,
- une grande transparence,
- une résistance remarquable,
- une haute flexibilité
- une imperméabilité aux gaz, mais perméable à l'eau.
- De plus, le GRAPHENE possède des propriétés antimicrobiennes remarquables.

### 6.3.3 Fabrication du GRAPHENE

Au début, la fabrication à grande échelle de graphène n'était possible que grâce à un processus très coûteux et complexe appelé dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Ce processus impliquait l'utilisation de produits chimiques toxiques pour faire pousser du graphène monocouche sur un substrat métallique, tel que du platine, du nickel ou du carbure de titane, en exposant le substrat à de l'éthylène ou du benzène à des températures élevées.

Des études menées en 2012 ont révélé qu'il était possible de séparer efficacement le graphène du substrat métallique sur lequel il se développe en analysant l'énergie adhésive interraciale du graphène. De plus, la qualité du graphène séparé à l'aide de cette méthode était suffisamment élevée pour créer des dispositifs électroniques moléculaires. Depuis lors, la recherche sur la croissance du graphène CVD a considérablement progressé et la qualité du graphène n'est plus

un obstacle à l'adoption de la technologie. Le coût du substrat métallique sous-jacent est désormais le principal obstacle à la production à grande échelle de graphène. [34]

#### 6.3.4 Polymère composite à base d'un GRAPHENE

Des scientifiques américains ont constaté que l'incorporation de feuilles de graphène dans des polymères améliore considérablement leur résistance mécanique et thermique. Cette découverte ouvre la voie à une multitude d'applications allant des avions aux cellules solaires.

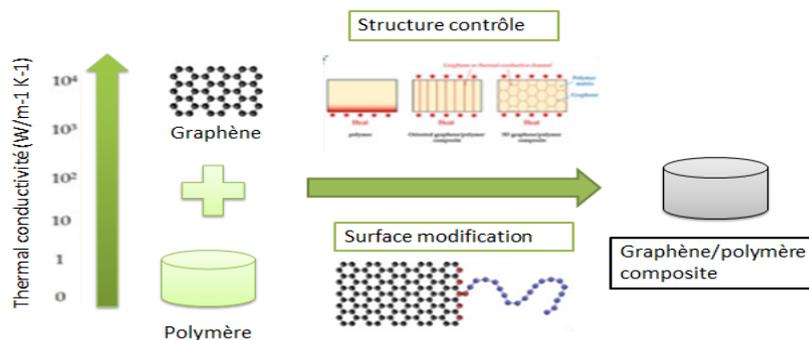


Figure. 12. Graphène / polymère composite

##### 6.3.4.1 Fabrication de polymère composite à base d'un GRAPHENE

La réalisation de polymères composites à base de GRAPHENE est un processus complexe qui nécessite une dispersion homogène du graphène dans une matrice polymère. Cette dispersion peut être obtenue grâce à diverses méthodes telles que la sonication, l'exfoliation chimique ou mécanique, ou la réduction de l'oxyde de graphène. Une fois que le graphène est bien dispersé dans la matrice polymère, différents procédés peuvent être utilisés pour former des composites, tels que l'injection, le moulage par compression ou le dépôt de films minces. Le choix de la méthode dépend des propriétés finales souhaitées pour le composite. [32]

##### 6.3.4.2 Propriétés des polymères composites à base de GRAPHENE

Les polymères composites à base de GRAPHENE possèdent plusieurs propriétés intéressantes, telles que :

- Haute conductivité thermique et électrique : le GRAPHENE est un excellent conducteur thermique et électrique, ce qui confère au composite une conductivité thermique et électrique élevée.

- Résistance mécanique élevée : l'ajout de GRAPHENE dans les polymères renforce leur résistance mécanique et leur rigidité.
- Légèreté : les composites à base de GRAPHENE ont une faible densité, ce qui les rend légers.
- Résistance à l'usure : le GRAPHENE confère au composite une grande résistance à l'usure.
- Propriétés de barrière : les composites à base de GRAPHENE ont une grande résistance à la diffusion des gaz et des liquides.
- Propriétés antistatiques : les composites à base de GRAPHENE ont des propriétés antistatiques en raison de leur haute conductivité électrique.

#### **6.3.4.3 Applications des polymères composites à base de GRAPHENE**

Les polymères composites à base de GRAPHENE ont de nombreuses applications potentielles dans différents secteurs. Voici quelques exemples :

- Électronique : en raison de leur excellente conductivité électrique, les composites à base de graphène peuvent être utilisés dans les circuits imprimés, les batteries et les capteurs.
- Aérospatiale : la légèreté et la résistance mécanique des composites à base de graphène les rendent idéaux pour la fabrication de pièces aérospatiales, telles que les fuselages d'avions.
- Énergie : les composites à base de GRAPHENE peuvent être utilisés pour améliorer l'efficacité des panneaux solaires, des piles à combustible et des super condensateurs.
- Médical : les propriétés antibactériennes et la biocompatibilité des composites à base de GRAPHENE les rendent utiles pour les implants médicaux et les revêtements de surface.
- Automobile : les composites à base de GRAPHENE peuvent être utilisés pour fabriquer des pièces légères et résistantes pour les véhicules, tels que les carrosseries et les suspensions.
- Sports et loisirs : les composites à base de GRAPHENE peuvent être utilisés pour fabriquer des équipements sportifs légers et résistants, tels que des raquettes de tennis, des planches de surf et des vélos.

Ces applications ne sont que quelques exemples de l'utilisation potentielle des polymères composites à base de GRAPHENE. Avec le temps, de nouvelles utilisations pourraient émerger, à mesure que les scientifiques et les ingénieurs découvrent de nouvelles façons d'exploiter les propriétés uniques de ces matériaux.

#### **6.3.5 Fabrication des polymères composites à base de PU ; PZT et GRAPHENE**

La fabrication d'un polymère composite à base de PU, PZT et GRAPHENE peut être réalisée en suivant les étapes suivantes :

- Préparation du PU : Tout d'abord, le polyuréthane (PU) est préparé en mélangeant les composants de base tels que le polyol et l'isocyanate. Le mélange est ensuite chauffé et agité pour former une solution homogène.
- Incorporation de PZT : Ensuite, le PZT est ajouté à la solution de PU. Le PZT est une céramique piézoélectrique qui peut être utilisée pour générer de l'électricité à partir de vibrations mécaniques. Il est important de bien mélanger le PZT avec le PU pour assurer une distribution homogène des particules de PZT.
- Ajout de GRAPHENE : Le graphène est ajouté au mélange PU-PZT pour renforcer la conductivité électrique et mécanique de la solution.
- Fabrication : La solution de PU-PZT-GRAPHENE est alors moulée selon les besoins pour obtenir la forme souhaitée.
- Durcissement : Le mélange est laissé durcir pour former le composite final à base de PU-PZT-GRAPHENE.
- Caractérisation : Enfin, le composite est caractérisé en utilisant des techniques telles que la microscopie électronique à balayage MEB et la spectroscopie Raman pour évaluer les propriétés électriques et mécaniques du matériau.

Il est important de noter que la fabrication de composites à base de PU-PZT-GRAPHENE peut être un processus complexe et doit être réalisée avec soin pour assurer une distribution uniforme des particules de PZT et de GRAPHENE dans la matrice de PU. [33]

### 6.3.6 Applications des polymères composites à base de PU ; PZT et GRAPHENE

Les polymères composites à base de PU, PZT et GRAPHENE ont de nombreuses applications dans divers domaines, notamment :

- Électronique : Les composites PU/PZT/GRAPHENE peuvent être utilisés dans la fabrication de capteurs, de transducteurs, de condensateurs et d'autres composants électroniques.
- Aérospatiale : Les composites PU/PZT/GRAPHENE peuvent être utilisés pour la fabrication de pièces légères et résistantes aux chocs pour les avions et les satellites.
- Automobile : Les composites PU/PZT/GRAPHENE peuvent être utilisés pour fabriquer des pièces légères et résistantes pour les voitures, notamment des pare-chocs, des portes et des éléments structurels.
- Énergie : Les composites PU/PZT/GRAPHENE peuvent être utilisés pour fabriquer des matériaux pour la production d'énergie propre, tels que des cellules solaires, des batteries et des capteurs de température.

- Médical : Les composites PU/PZT/GRAPHENE peuvent être utilisés pour la fabrication de prothèses, de matériaux d'imagerie médicale et de dispositifs médicaux implantables.
- Sport : Les composites PU/PZT/GRAPHENE peuvent être utilisés pour la fabrication de raquettes de tennis, de planches de surf et d'autres équipements de sport.

#### 6.4. Les alliages à mémoire de forme

##### 6.4.1. Définition

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux métalliques qui ont la capacité de revenir à leur forme d'origine après avoir été déformés, chauffés ou refroidis. Cette capacité est due à une transformation de phase qui se produit dans la structure cristalline du matériau lorsqu'il est soumis à une certaine température ou contrainte. Plus précisément, les alliages à mémoire de forme sont composés principalement de nickel, de titane et d'autres métaux tels que le cuivre, le zirconium ou le cobalt. Lorsqu'ils sont soumis à une température élevée, ces matériaux subissent une transformation de phase de leur structure cristalline qui leur permet de conserver une déformation particulière. Lorsque la température est réduite, le matériau retrouve sa forme initiale. Les alliages à mémoire de forme ont de nombreuses applications, notamment dans l'industrie automobile, l'aérospatiale, la médecine, la robotique et l'électronique. Ils sont utilisés pour la fabrication de pièces de précision, de capteurs, de stents vasculaires, de fils de sutures, de joints mécaniques, de dispositifs de contrôle de la température et d'autres produits innovants. [34]

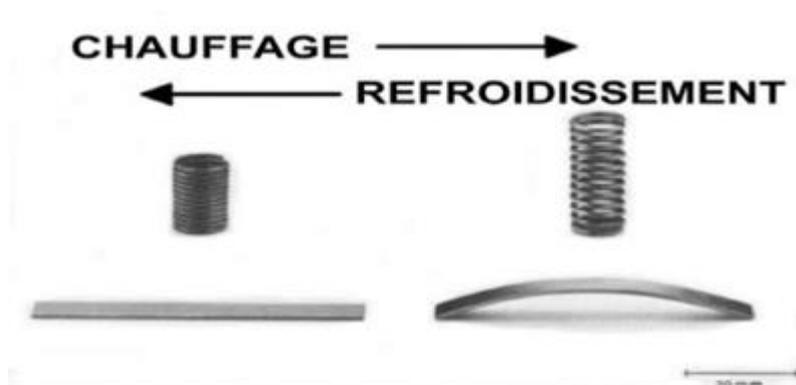


Figure. 13. Alliage a mémoire de forme. [13]

#### 6.4.2. Histoire des AMF

Les AMF ont été découverts pour la première fois en 1932 par un métallurgiste suédois du nom d'Arlt. Cependant, leur véritable potentiel n'a été reconnu que dans les années 1960 par deux scientifiques américains, William Buehler et Frederick Wang. Le premier AMF commercialisé a été développé par la société Raychem Corporation dans les années 1970. Il s'agissait d'un alliage de nickel-titane, également connu sous le nom de Nitinol, qui a été utilisé dans une variété d'applications médicales telles que les stents, les fils orthodontiques et les implants dentaires. Dans les années 1980, les AMF ont commencé à être utilisés dans des applications aérospatiales, notamment pour les antennes et les actionneurs. Depuis lors, leur utilisation s'est répandue dans de nombreux autres domaines, notamment l'automobile, l'électronique, la robotique et les jouets. Au fil du temps, de nouveaux AMF ont été développés, chacun ayant ses propres propriétés uniques. Par exemple, certains alliages à base de cuivre ont été développés pour des applications à haute température, tandis que d'autres alliages ont été conçus pour être très résistants à la corrosion.

Aujourd'hui, les AMF continuent d'être étudiés et développés pour de nouvelles applications, ce qui promet de futures innovations et avancées technologiques. [35]

#### 6.4.3. Propriétés des AMF

Les propriétés des AMF sont liées à leur structure cristalline et à leur capacité à subir une transition de phase réversible sous l'effet de la température. Voici quelques-unes des propriétés les plus importantes des alliages à mémoire de forme :

- Transition de phase : Les AMF subissent une transition de phase réversible sous l'effet de la température. Cette transition de phase se produit à une température caractéristique appelée température de transition. Lorsqu'ils sont chauffés au-dessus de cette température, les AMF passent d'une structure cristalline martensitique à une structure cristalline austénitique.
- Effet mémoire de forme : l'effet mémoire de forme est la capacité des AMF à retrouver leur forme d'origine après avoir été déformés et chauffés au-dessus de leur température de transition. Cet effet est dû à la réorientation des variantes cristallines martensitiques lors de la transition de phase.
- Superplasticité : La superplasticité est une propriété des AMF qui leur permet de subir de grandes déformations élastiques réversibles sans subir de dommages permanents. Cette propriété est due à la capacité des AMF à subir une déformation réversible de leur structure cristalline lorsqu'ils sont sollicités

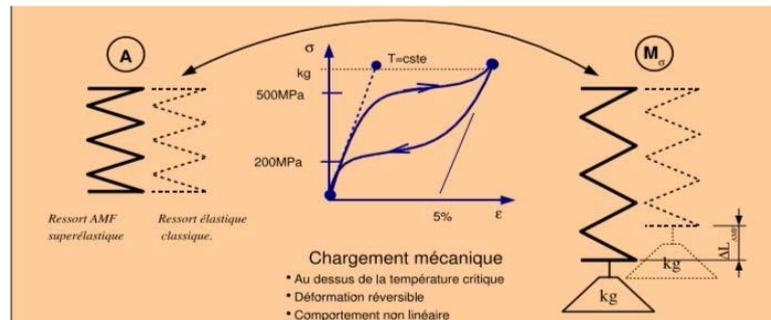


Figure.14. Superplasticité de AMF(les valeurs numériques d'un AMF de type NiTi). [36]

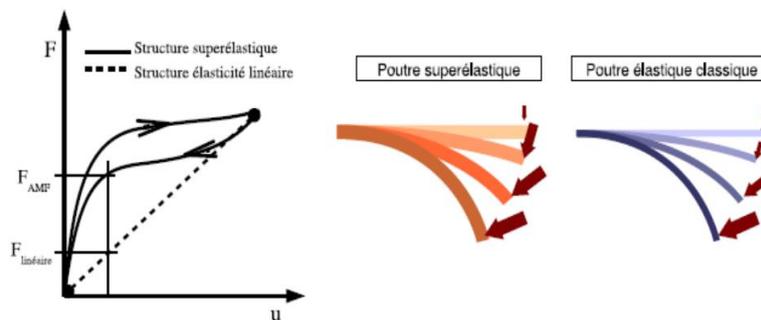


Figure.15. Force de rappel. [36]

- **Dumping interne** : AMF ont une capacité de dissipation d'énergie, appelée dumping interne, qui leur permet d'absorber les vibrations et les chocs. Cette propriété est due à la présence de défauts cristallins dans la structure des alliages à mémoire de forme.

Ces propriétés font des AMF des matériaux intéressants pour de nombreuses applications dans les domaines de la médecine, de l'aérospatiale, de l'automobile, de l'électronique, etc.

#### 6.4.4. Fabrication AMF

##### 6.4.4.1 Techniques de fabrication

Les AMF sont des matériaux très particuliers qui nécessitent des techniques de fabrication spécifiques. Les principales techniques utilisées pour la fabrication des AMF sont les suivantes

- **Fusion** : La technique de fusion est la plus courante pour la fabrication AMF. Elle implique la fusion de différents métaux à des températures élevées pour créer l'alliage à mémoire de forme souhaité. La technique de fusion peut être utilisée pour fabriquer AMF à base de nickel-titane, de cuivre-zinc-aluminium, de fer-manganèse-silicium, etc.

- Laminage : Le laminage est une technique qui consiste à aplatir un matériau en le faisant passer entre deux rouleaux. Cette technique est souvent utilisée pour fabriquer des AMF à base de cuivre-zinc-aluminium.
- Frittage : Le frittage est une technique qui consiste à chauffer un matériau en poudre à des températures élevées pour le faire adhérer et former une pièce solide. Cette technique est souvent utilisée pour fabriquer des AMF à base de nickel-titane.
- Dépôt physique en phase vapeur (PVD) : Le PVD est une technique de dépôt de couches minces qui utilise la vaporisation d'un matériau pour former une couche sur une surface. Cette technique est souvent utilisée pour fabriquer des alliages à mémoire de forme en couches minces.
- Fabrication additive : La fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D, est une technique qui permet de créer des objets tridimensionnels en ajoutant des couches successives de matériau. Cette technique peut être utilisée pour fabriquer AMF complexe.

Chaque technique a ses avantages et ses limites, et le choix dépendra des propriétés spécifiques requises pour l'application finale de l'alliage à mémoire de forme. [37]

#### 6.4.4.2 Caractérisation des alliages à mémoire de forme

L'une des propriétés clés AMF est leur capacité à retrouver leur forme initiale après avoir subi une déformation importante en état martensitique. Cette capacité est appelée effet de mémoire de forme et elle est rendue possible grâce à la présence de deux phases solides distinctes dans l'AMF. Lorsque le matériau est chauffé à une température supérieure à sa température « austénite finish » (AF), il subit un changement de phase qui lui permet de retrouver sa forme initiale à l'état austénitique, en conservant le souvenir de sa forme initiale. Ainsi, les AMF sont capables de récupérer leur forme originale de manière réversible.

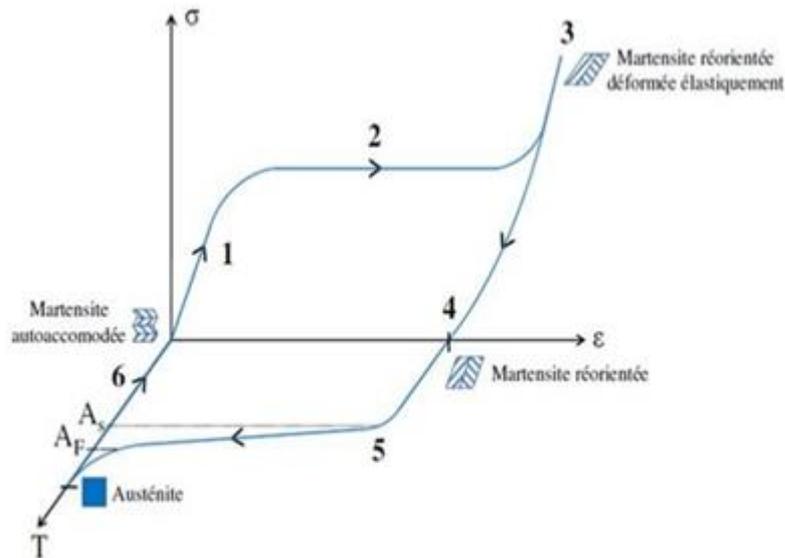


Figure.16. Cycle thermomécanique typique d'un AMF. [38]

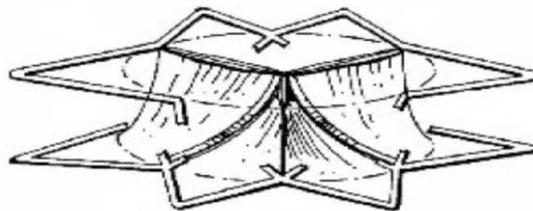
Les AMF sont des matériaux très intéressants car ils sont capables de retrouver leur forme initiale après avoir subi une déformation plastique. Cette propriété incroyable est due à la présence de deux phases à l'état solide dans ces matériaux : la martensite à basse température et l'austénite à haute température. Le changement de phase entre ces deux états permet aux AMF de se déformer de manière réversible. Le mécanisme de cet effet est représenté de manière schématique ci-dessus : lorsqu'une contrainte est appliquée sur une microstructure martensitique auto-accommodante (1), les interfaces mobiles des différentes variantes se déplacent pour permettre aux variantes de martensite les plus adaptées à la déformation de progresser au détriment des autres (2). Ce mouvement d'orientation des variantes permet d'obtenir la meilleure accommodation possible de la déformation, jusqu'à ce qu'une déformation maximale soit atteinte (3). Toutefois, lorsqu'on arrête d'appliquer la contrainte, seule une faible partie de la déformation est récupérée, car la martensite est stable à cette température (4). Pour retrouver l'état initial du matériau, il est donc nécessaire d'effectuer un chauffage à contrainte nulle jusqu'à une température supérieure à  $A_f$  afin d'atteindre une transformation inverse complète (5). Ce processus est expliqué par le retour du matériau en phase austénitique et permet de récupérer la déformation initiale. Enfin, le retour à température ambiante entraîne une transformation de phase sous contrainte nulle. Le phénomène d'accommodation se produit alors et reforme le mélange initial de variantes de martensite (6). Ce processus est appelé effet mémoire de forme simple sens et est très utile dans de nombreuses applications industrielles. [38]

#### 6.4.5. Applications des alliages à mémoire de forme

AMF sont des matériaux dotés d'une propriété unique qui leur permet de conserver leur forme d'origine même après avoir subi une déformation, sous l'effet d'une température ou d'une contrainte spécifique. Cette caractéristique particulière les rend extrêmement utiles dans de multiples applications. Voici quelques exemples d'utilisation de ces alliages à mémoire de forme :

- **Domaine médical :** AMF sont utilisés dans de nombreuses applications médicales, notamment pour la fabrication d'implants, d'instruments chirurgicaux, de dispositifs de diagnostic et de thérapies, dans la fabrication de cathéters, de valves cardiaques et de dispositifs de compression veineuse.

En effet, ce dispositif, une fois contracté, s'insère dans l'artère. Par la suite, lors du relâchement, l'effet superplastique contraint l'artère à retrouver le diamètre original et permet ainsi le passage du sang. Tout comme le sent, la valve cardiaque de la **(Figure 17)** permet une chirurgie minimalement invasive, ce qui réduit les répercussions négatives sur le patient [39].



**Figure. 17.** Valve cardiaque. [40]

Le dernier exemple du secteur biomédical est les broches d'orthodontie **(Figure 18)**. 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.18. Broche d'orthodontie. [40]*

- **Domaine aérospatial :** Les AMF ont de nombreuses applications dans le domaine aérospatial en raison de leur capacité à se déformer de manière réversible sous l'effet de températures variables. Ces alliages sont souvent utilisés pour des applications qui nécessitent des déformations répétitives, comme l'ouverture et la fermeture de portes ou de vannes, le déploiement d'antennes ou de miroirs, et la stabilisation de satellites.

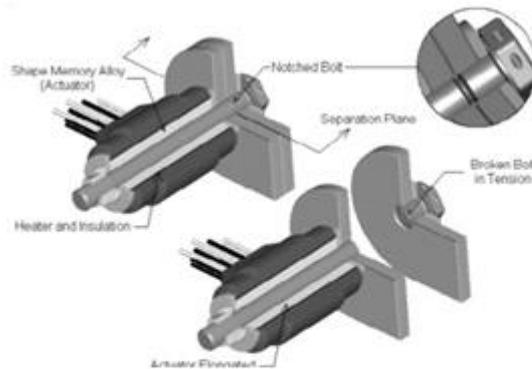
Les AMF sont également utilisés dans les moteurs d'avion pour les actionneurs et les vannes, les systèmes d'ancrage et de verrouillage des véhicules spatiaux.

L'exemple de 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 (**voir figure 19**). 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.19.** Satellite Clémentine lance le 25 janvier 1994. [41]

- Domaine de l'industrie automobile : Les AMF sont utilisés dans divers domaines de l'industrie automobile en raison de leurs propriétés uniques, notamment leur capacité à retrouver leur forme d'origine après avoir été déformés.



**Figure.20.** Frangibolt de la compagnie TiNi Alloy Aerospace Inc de San Leandro. [41]

Voici quelques exemples d'applications des alliages à mémoire de forme dans l'industrie automobile :

- Systèmes de sécurité
- Systèmes de régulation de température
- Systèmes d'ouverture automatique des portes
- Systèmes de freinage

- Domaine de Construction : AMF ont des applications dans le domaine de la construction, notamment dans les structures métalliques et les ponts. Les avantages des alliages à mémoire de forme dans ces domaines comprennent leur grande résistance à la fatigue et leur capacité à absorber les contraintes thermiques et mécaniques. Par exemple, les poutres en AMF peuvent se déformer sous l'effet d'une charge, mais retrouver leur forme d'origine lorsque la charge est retirée. Cela permet de réduire le stress sur les joints et les fixations, ce qui peut prolonger la durée de vie de la structure. Les alliages à mémoire de forme peuvent également être utilisés dans les revêtements de toiture et les panneaux solaires, où ils peuvent aider à absorber les chocs et les vibrations tout en réduisant les coûts de maintenance.

#### 6.4.6. Les perspectives d'avenir pour l'amélioration des propriétés et des applications des alliages à mémoire de forme

AMF sont des matériaux intéressants en raison de leur capacité à retrouver leur forme initiale après avoir subi une déformation. Ils ont une large gamme d'applications, notamment dans les domaines de l'ingénierie, de la médecine et de l'aérospatiale.

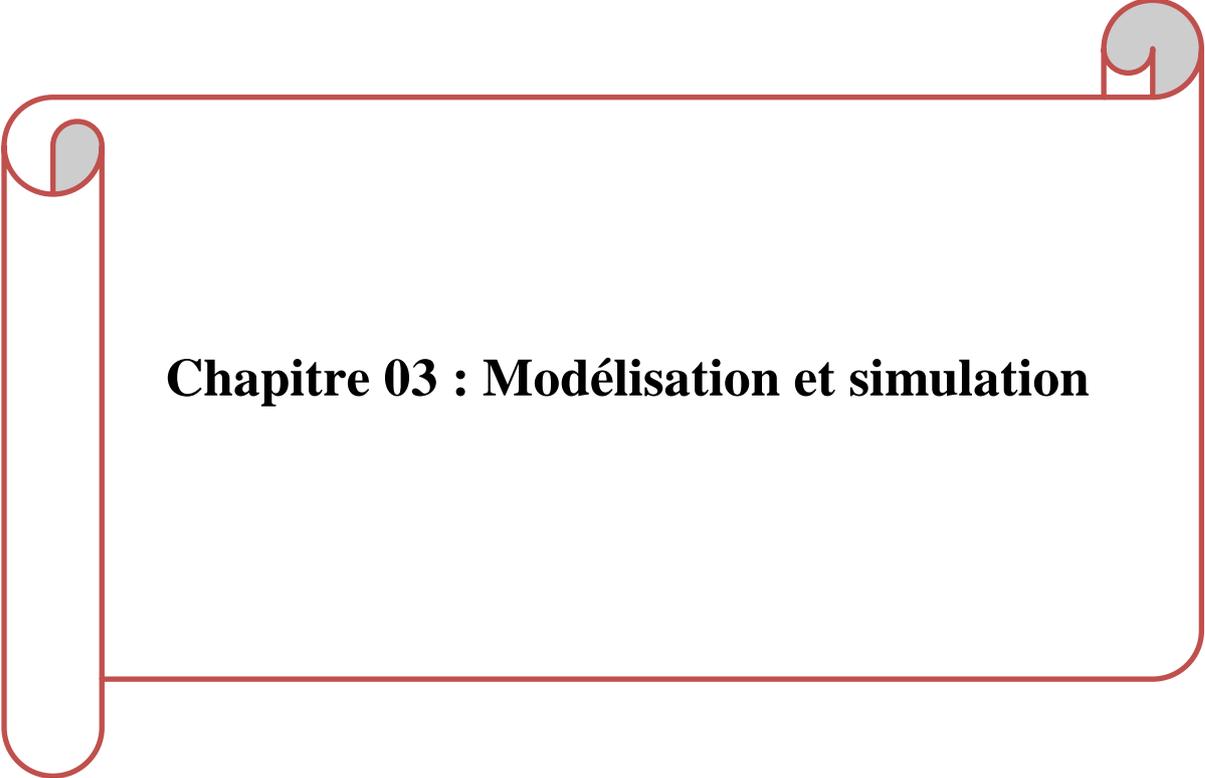
Les perspectives d'avenir pour l'amélioration des propriétés et des applications AMF sont prometteuses. Voici quelques exemples :

- Développement de nouveaux alliages : les chercheurs continuent de développer de nouveaux AMF qui présentent des propriétés améliorées telles que la résistance à la corrosion, la résistance à la fatigue, la résistance à l'usure et la résistance aux hautes températures.
- Intégration de la technologie des AMF dans de nouvelles applications : les alliages à mémoire de forme sont déjà utilisés dans des applications telles que les stents vasculaires et les implants dentaires. Dans l'avenir, ces matériaux pourraient être utilisés dans de nouvelles applications telles que les robots chirurgicaux, les dispositifs de stockage de l'énergie et les vêtements intelligents.
- Amélioration des processus de fabrication : les progrès dans les technologies de fabrication, comme la fabrication additive et la nano fabrication, pourraient permettre la production de pièces plus complexes et plus précises en utilisant des AMF. Cela ouvrirait la voie à de nouvelles applications pour ces matériaux.
- Optimisation des propriétés des alliages à mémoire de forme existants : les chercheurs cherchent également à optimiser les propriétés des alliages à mémoire de forme existants en modifiant la composition chimique et en utilisant des traitements thermiques spécifiques. Cela pourrait permettre de produire des AMF avec des propriétés encore meilleures pour des applications spécifiques.

## 7. Conclusion

En conclusion, les polymères composites offrent des propriétés uniques et des avantages significatifs pour de nombreuses applications industrielles. En combinant différentes charges avec une matrice polymère, les composites peuvent offrir une grande résistance, une faible densité, une résistance à la corrosion et une durabilité, par rapport aux matériaux traditionnels. Les applications des polymères composites sont vastes et variées, allant de l'aérospatiale à l'industrie automobile en passant par les sports et loisirs. Les industries ont adopté les composites à matrice polymère pour leurs performances élevées et leur durabilité, ce qui permet une amélioration significative de la qualité et de la fiabilité des produits finaux.

Cependant, la production de polymères composites nécessite une expertise spécifique et une attention particulière aux détails. La qualité et la fiabilité des composites dépendent d'une fabrication rigoureuse, de tests de qualité et d'une maintenance adéquate. Avec une conception et une fabrication appropriées, les composites à matrice polymère peuvent être utilisés pour améliorer la qualité et les performances de nombreux produits dans diverses industries.



## **Chapitre 03 : Modélisation et simulation**

## 1. Introduction

La modélisation et la simulation jouent un rôle essentiel dans la science des matériaux en permettant de prédire et d'analyser le comportement de différents matériaux dans des conditions spécifiques. Dans le cas du polyuréthane (PU), du titanate de plomb-zirconate (PZT), du GRAPHENE et des AMF, ces techniques sont utilisées pour étudier les propriétés électromécaniques et thermomécaniques, fournissant des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des dispositifs. En somme, la modélisation et la simulation sont des outils indispensables pour étudier et prédire les propriétés électromécaniques et thermomécaniques du PU, du PZT, du graphène avec des alliages à mémoire de forme. Ces techniques permettent une meilleure compréhension du comportement de ces matériaux favorisant ainsi la conception et l'optimisation de dispositifs innovants dans des domaines tels que l'électronique, les capteurs et les matériaux intelligents.

## 2. Procédure de Modélisation

Le processus de modélisation du courant électrostrictif repose sur des équations décrivant le couplage électromécanique. L'électrostriction, qui représente le couplage quadratique entre la déformation et le champ électrique, joue un rôle essentiel dans cette modélisation. Dans le cadre de cette étude, nous avons supposé que le champ électrique est appliqué parallèlement à l'épaisseur du matériau (axe 3), tandis que la contrainte est appliquée dans une direction orthogonale (axe 1). En considérant ces conditions, les équations constitutives d'un matériau électrostrictif peuvent être formulées de la manière suivante :

$$S_1 = M_{31} \cdot E_3^2 + S_{11}^E \cdot T_1 \quad (1)$$

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 + 2 \cdot M_{31} \cdot E_3 \cdot T_1$$

De plus, le piézoélectrique est défini à partir des équations constitutives qui peuvent être formulées de la manière suivante :

$$S_1 = d_{31} \cdot E_3 + S_{11}^E \cdot T_1 \quad (2)$$

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 + d_{31} \cdot T_1$$

L'équation suivante permet de décrire le comportement électrostrictif piézoélectrique qui se manifeste par l'expression du déplacement total  $D_3$  qui circule à travers le matériau :

$$\left( \varepsilon_{33}^T + \frac{d_{31}^2}{S_{11T}^E} + \frac{2.M_{31}.S_1}{S_{11T}^E} \right) . E_3 + \frac{d_{31}.S_1}{S_{11T}^E} - \frac{3.M_{31}.d_{31}.E_3^2}{S_{11T}^E} - \frac{2.M_{31}^2.E_3^3}{S_{11T}^E} \quad (3)$$

Le courant généré par la vibration latérale a été mesuré comme suit :

$$I = \int_A^{+\infty} \frac{\partial D_3}{\partial t} . dA \quad (4)$$

$$I = \int_A^{+\infty} \left[ \left( \varepsilon_{33}^T + Y . (d_{31}^2 + 2M_{31} . S_1 - 6M_{31} . d_{31} . E_3 - 6 . M_{31}^2 . E_3^2) \right) . \frac{\partial E_3}{\partial t} + y . (2 . M_{31} . E_3 + d_{31} . dS_1 . dt . dA) \right] \quad (5)$$

A correspond à la surface du polymère et D3 à la densité de flux électrique. Ici,  $\partial E_3 = \partial t$  et  $\partial S_1 = \partial t$  représentent les dérivées temporelles du champ électrique et de la déformation, respectivement. Nous supposons une valeur minimale du champ électrique car un champ électrique continu ( $E_{dc}$ ) a été appliqué à l'échantillon, ce qui signifie que  $\partial E_3 = \partial t = 0$ . Le courant de court-circuit dans les composites PU/PZT peut être exprimé comme suit :

$$I = I_1 + I_2 = (2 . M_{31} . E_3 + d_{31}) . Y . \int_A^{+\infty} \frac{\partial S_1}{\partial t} . dA \quad (6)$$

Ici, Y représente le module d'Young. Par conséquent, la quantité d'énergie récupérée par les composites peut être exprimée en utilisant l'équation suivante :

$$P_{rec} = RI^2 \quad (7)$$

Le modèle électromécanique qui permet de combiner deux comportements piézoélectriques/électrostrictifs est essentiel dans le domaine de la récupération d'énergie vibratoire. Cette approche vise à améliorer la densité de puissance captée grâce à l'état de couplage. On peut représenter l'impédance électrique d'un matériau composite vibrant à une fréquence donnée à l'aide d'un circuit électrique équivalent. Dans ce schéma, présenté dans la figure 3, on trouve le schéma électrique équivalent le plus couramment utilisé pour décrire ces deux comportements, où R représente la charge électrique. La résistance  $R_p(\omega)$  symbolise les pertes diélectriques. Selon ce schéma, le premier bloc est associé au comportement électrostrictif, tandis que le second bloc est associé au comportement piézoélectrique. Ainsi, nous ajustons les courants générés par ces deux blocs afin d'obtenir le courant total résultant de la conversion électromécanique au sein du composite, qui est ensuite transféré à la charge électrique.

Des travaux antérieurs ont démontré qu'il était possible de négliger la résistance de fuite  $R_p$ . Par conséquent, le modèle dynamique du courant est simplifié par :

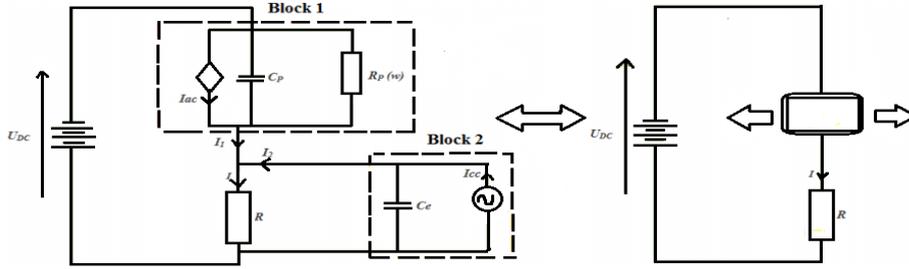


Figure. 21. Le circuit électrique équivalent du composite PU/PZT

$$I = \beta \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} - (C_p - C_e) \frac{\partial U}{\partial t} \quad (8)$$

Où :

$$\beta = (2 \cdot M_{31} \cdot E_3 + d_{31}) \cdot Y \quad (9)$$

La tension dynamique appliquée aux composites PU/PZT dans la plage de fréquences est déterminée par la capacité de la matrice PU ( $C_p$ ), la capacité de la particule céramique PZT ( $C_e$ ), et la déformation ( $S_1$ ).

$$U\check{U} = \frac{\beta \cdot R}{1 + jR \cdot (C_p + C_e) \cdot 2\pi \cdot f} \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \check{S}_1 \quad (10)$$

Selon l'équation (10), il est possible d'exprimer la puissance récupérée en fonction de l'amplitude de la déformation  $S_M$

$$P_{rec} = \frac{\check{U} \cdot \check{U}^*}{2 \cdot R} = \frac{\beta^2 \cdot R}{1 + (R \cdot (C_p + C_e) \cdot 2\pi \cdot f)^2} \cdot \frac{(2\pi \cdot f)^2 \cdot S_M^2}{2} \quad (11)$$

Selon l'équation (11), il y a une valeur de résistance de charge idéale à laquelle la puissance de conversion atteint son maximum. On peut déterminer cette résistance de charge optimale en utilisant la méthode suivante :

$$\frac{\partial P_{rec}}{\partial R} = \frac{1 - (R \cdot (C_p + C_e) \cdot 2\pi \cdot f)^2}{(1 + (R \cdot (C_p + C_e) \cdot 2\pi \cdot f)^2)^2} \cdot \frac{\beta^2 \cdot (2\pi \cdot f)^2 \cdot S_M^2}{2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_{rec}}{\partial R} = 0 \quad \text{OU} \quad R_{opt} = \frac{1}{((C_p + C_e) \cdot 2\pi \cdot f)} \quad (13)$$

En conséquence, pour la charge appropriée, on peut exprimer la puissance maximale récupérée de cette manière :

$$P_{\text{rec\_max}} = \frac{\beta^2 \cdot S_M^2}{4 \cdot (C_p + C_e)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (14)$$

L'équation (14) montre que la puissance maximale ne dépend pas seulement des paramètres intrinsèques du composite, mais aussi de la géométrie du film polymère et de ses propriétés mécaniques et électriques. L'ajout de particules PZT s'est révélé extrêmement intéressant. Comme le montre le tableau 1, l'incorporation de microparticules PZT a augmenté le constant diélectrique, ce qui a conduit à une amélioration de l'efficacité de la technologie et de la densité de puissance récupérée. Afin d'évaluer les performances de notre modèle, nous avons comparé les valeurs théoriques aux valeurs expérimentales en variant différents paramètres mécaniques et le pourcentage de PZT, et nous avons trouvé un bon accord entre les deux. Pour atteindre cet objectif, nous avons pris en compte les contributions des effets d'électrostriction et piézoélectrique dans les puissances électriques récupérées par les composites PU/PZT.

Les données théoriques présentées dans le tableau ci-dessous fournissent les paramètres théoriques du composite PU/PZT pour différentes fractions volumiques. Les simulations de ces paramètres ont donné les résultats suivants :

**Tableau. 4.** Paramètres théoriques du composite PU-PZT

<b>Matériau</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>M31</b>	<b>Y(MPA)</b>	<b>A (mm)</b>	<b>e (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>PU-33%PZT</b>	23.8	$1.508 \cdot 10^{-18}$	209	640	50
<b>PU-37%PZT</b>	27.03	$1.508 \cdot 10^{-18}$	285.95	640	50
<b>PU-41%PZT</b>	28.75	$1.508 \cdot 10^{-18}$	331.23	640	50

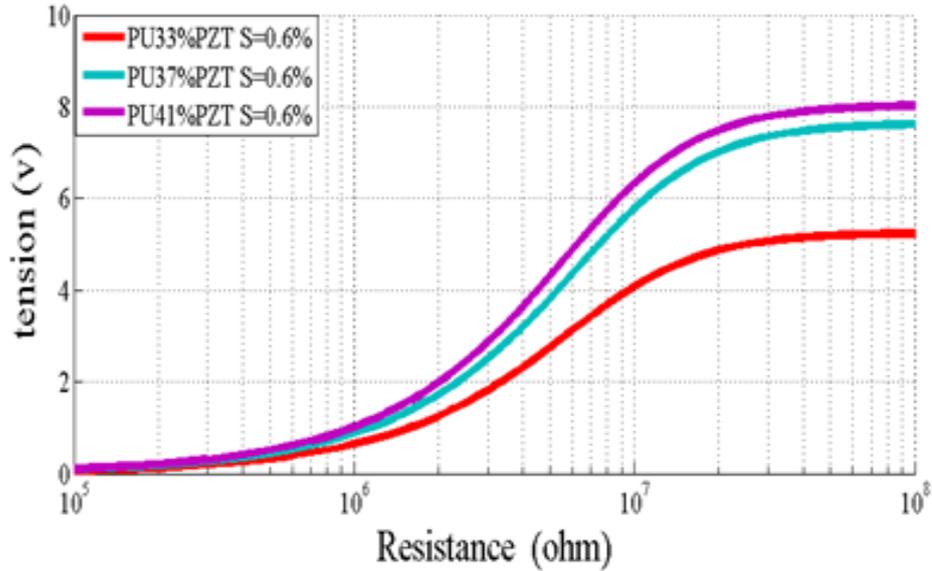


Figure. 22. La Tension générée à partir du composite PU-PZT avec différents pourcentages et  $S=0.6\%$

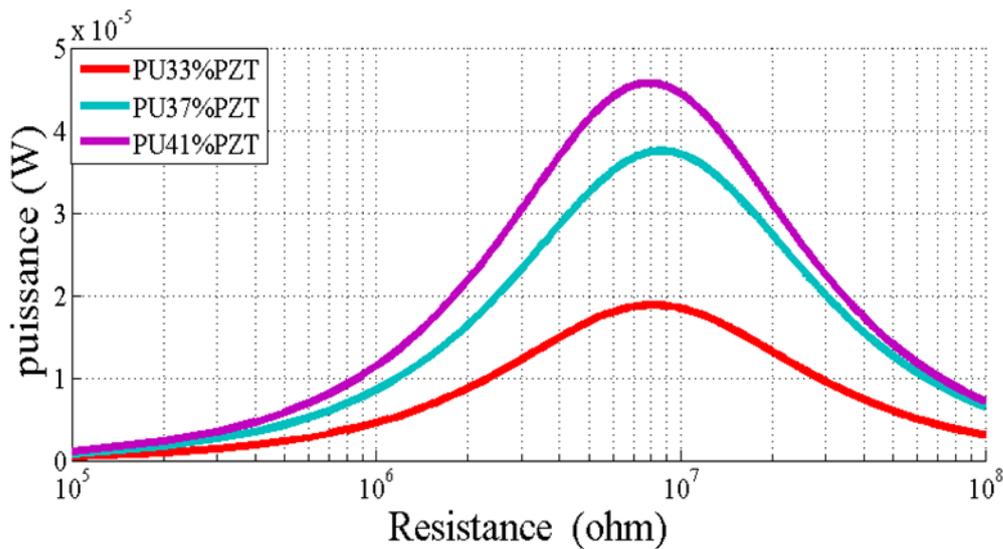


Figure. 23. La Puissance récupérée à partir du composite PU-PZT avec différents pourcentages et  $S=0.6$

### Commentaire

Les résultats obtenus à partir du modèle mathématique pour le composite PU-PZT avec une déformation de  $S=0.6\%$  et une fréquence de  $F=6$  Hz sont présentés dans la figure (22), qui montre la tension générée en fonction de la variation de la charge, et dans la figure (23), qui représente le graphique de la puissance récupérée.

La tension générée par un composite PU33%PZT atteint une valeur de 5.1 V sur une plage de résistance supérieure à  $10^7$  ohms. On observe que la tension augmente avec l'augmentation du pourcentage de PZT ajouté, atteignant 7.3 V pour 37% de PZT et 7.8 V pour 41% de PZT, sur la même plage de résistance.

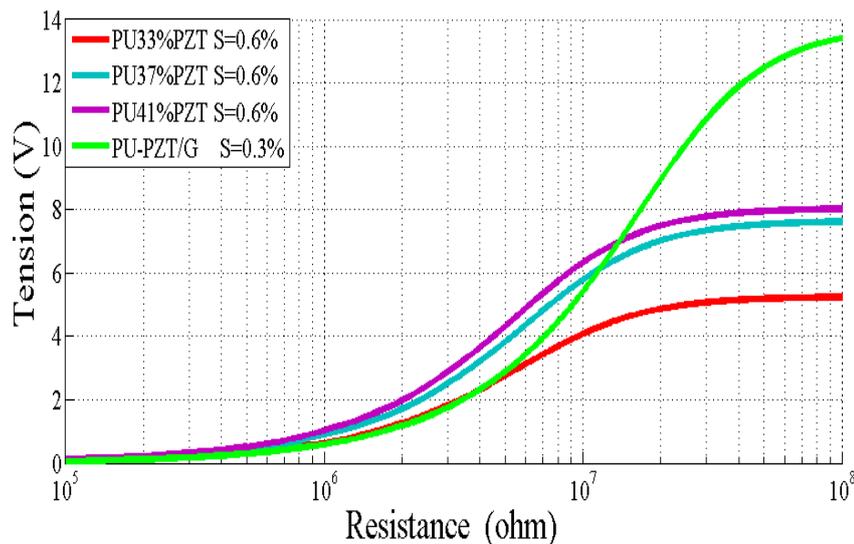
La simulation nous a également permis de prédire la puissance récupérée par ce composite, comme le montre **la figure (25)**. On observe une augmentation de la puissance jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale de  $4.2 \cdot 10^{-6}$  lorsque 41% de PZT est ajouté, sur la même plage de résistance supérieure à  $10^6$  ohms.

### 3. Composite PU-PZT/GRAPHENE

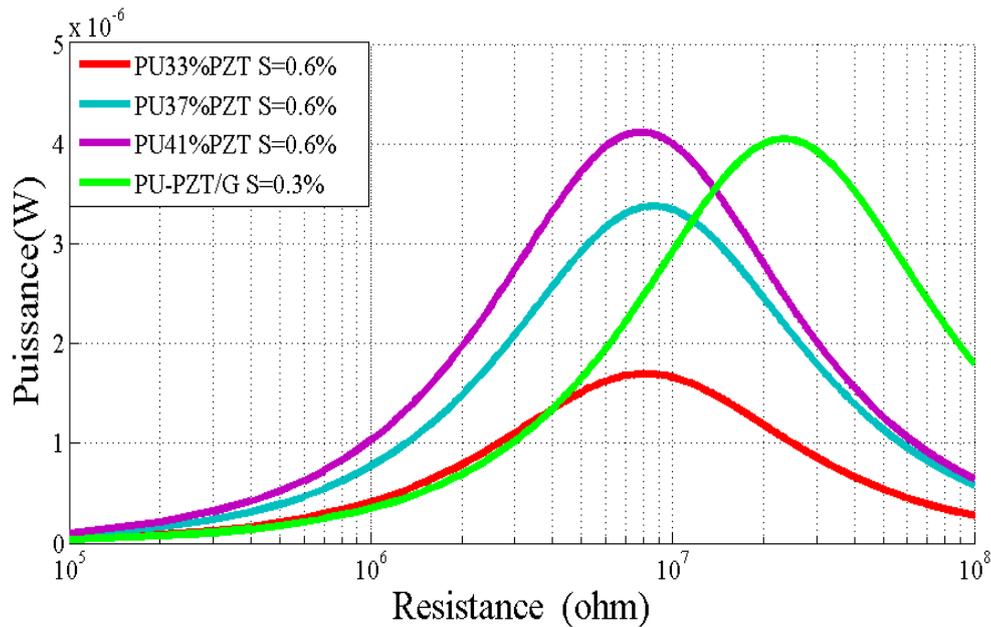
Un pourcentage de nano GRAPHENE a été ajouté pour créer un nouveau nano-composite PU-PZT/Graphène, présentant une performance structurale élevée :

**Tableau. 5.** Paramètres théoriques du composite PU-PZT-GRAPHENE

Matériau	Er	M31	Y(MPA)	A (mm)	e ( $\mu\text{m}$ )
PU-PZT-GRAPHENE	10	1,508e-18	381	640	50



**Figure.24.** La Tension générer à partir du composite PU-PZT-Graphène Et du composite PU-PZT avec S=0.6% Et S=0.3%



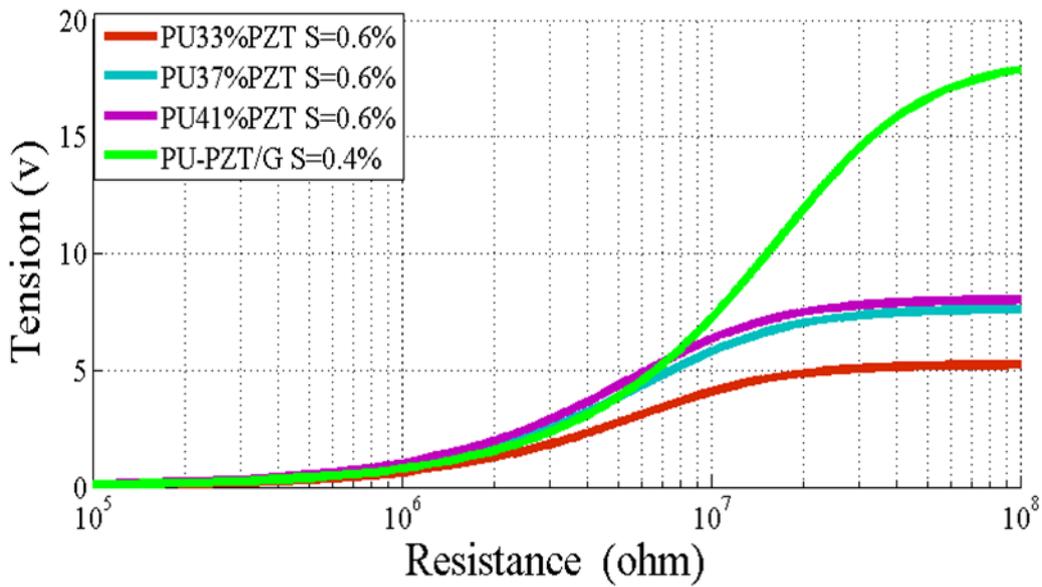
**Figure.25.**La puissance générée à partir du composite PU-PZT-Graphène Et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  Et  $S=0.3\%$

### Commentaire

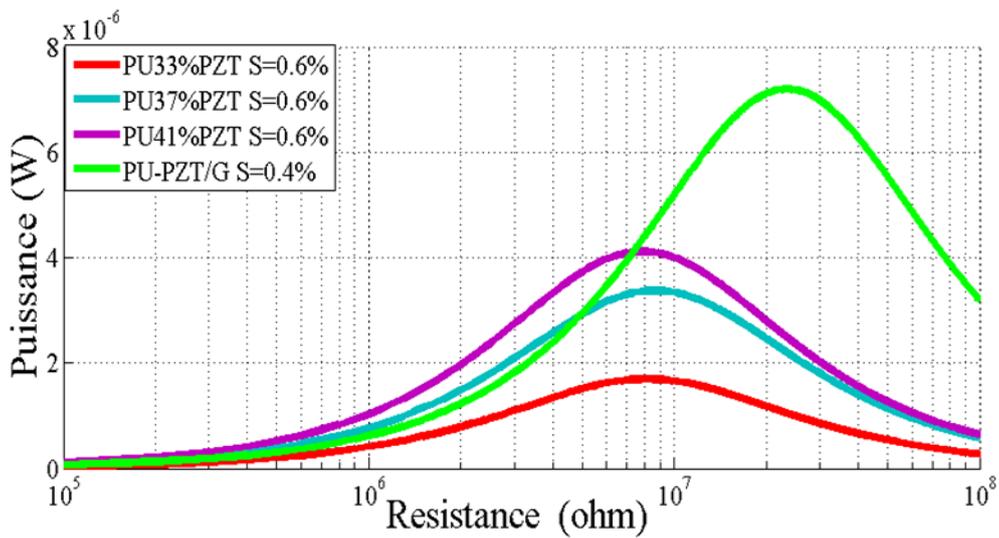
Les figures (24) et (25) présentent une comparaison de la tension générée et de la puissance récupérée à partir de deux différents composites PU-PZT, ainsi que du composite PU-PZT/Graphène, avec des pourcentages variés de PZT. Les valeurs de déformation sont de  $S=0.6\%$  et  $S=0.3\%$  respectivement.

Dans la figure (24) qui représente la tension générée, dans l'intervalle  $R \in [10^5, 10^7]$  ohms, on observe que la tension dominante est celle du composite PU-PZT, avec des valeurs comprises entre  $U \in [0, 8]$  volts. Au point  $R=10^7$  ohms, la tension atteint  $U=8$  volts. À partir de  $R>10^7$  ohms, la tension du composite PU-PZT se stabilise à  $U=4$  volts (PU33%PZT),  $U=6$  volts (PU37%PZT) et  $U=6.5$  volts (PU41%PZT). En revanche, la tension du composite à base de graphène continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $U=14$  volts lorsque  $R>10^8$  ohms.

Dans la figure (25) qui représente la puissance récupérée, on remarque que dans l'intervalle  $R \in [10^5, 10^7]$  ohms, la puissance dominante est celle du composite PU-PZT, avec une valeur de  $P \in [0, 4.3]$   $\mu\text{W}$  (microwatts). Au point  $R=10^7$  ohms, la puissance de ce dernier se stabilise avec une valeur de  $P=1.7$   $\mu\text{W}$  (PU33%PZT),  $P=3.4$   $\mu\text{W}$  (PU37%PZT) et  $P=4.3$   $\mu\text{W}$  (PU41%PZT). En revanche, la puissance du composite à base de graphène continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $P=4$   $\mu\text{W}$  lorsque  $R>10^7$  ohms.



**Figure.26.** La Tension générée à partir du composite PU-PZT-Graphène Et du composite PU-PZT avec S=0.6% Et S=0.4%



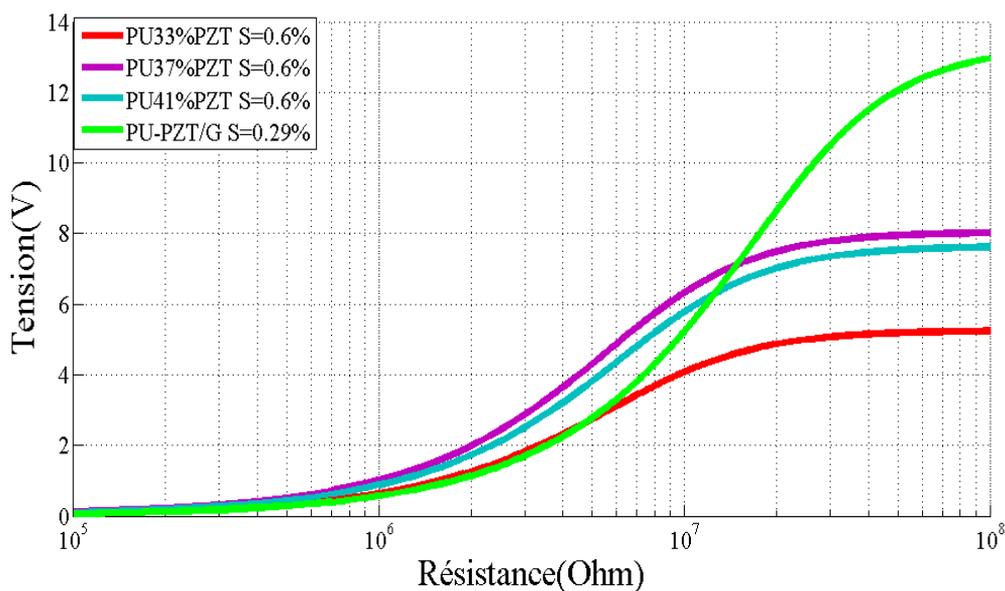
**Figure.27.** La puissance récupérée à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec S=0.6% Et S=0.4%

**Commentaire**

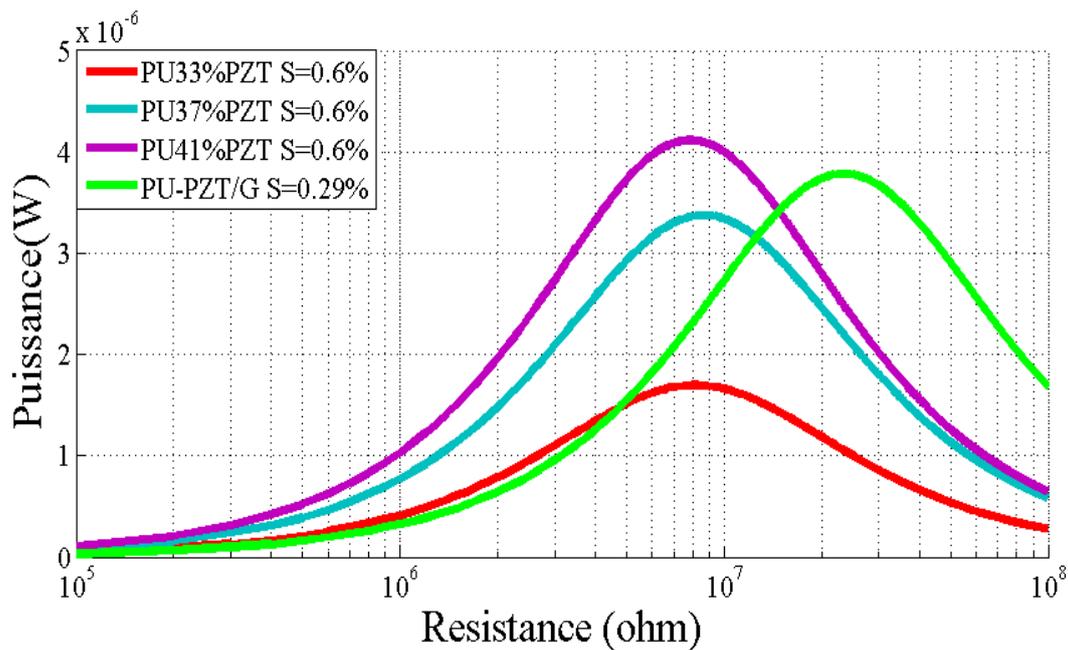
Les figures (26) et (27) présentent une comparaison de la tension générée et de la puissance récupérée à partir de deux différents composites PU-PZT, ainsi que du composite PU-PZT/Graphène, avec des pourcentages variés de PZT. Les valeurs de déformation sont de  $S=0.6\%$  et  $S=0.4\%$  respectivement.

Dans la figure (26) qui représente la tension générée, dans l'intervalle  $R \in [10^5, 10^7]$  ohms, on observe que la tension dominante est celle du composite PU-PZT, avec des valeurs comprises entre  $U \in [0, 6]$  volts. Au point  $R=10^7$  ohms, la tension atteint  $U=6$  volts. À partir de  $R>10^7$  ohms, la tension du composite PU-PZT se stabilise à  $U=4.8$  volts (PU33%PZT),  $U=5.5$  volts (PU37%PZT) et  $U=12$  volts (PU41%PZT). En revanche, la tension du composite à base de graphène continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $U=90$  volts lorsque  $R>10^8$  ohms.

Dans la figure (27) qui représente la puissance récupérée, on remarque que dans l'intervalle  $R \in [10^5, 10^7]$  ohms, la puissance dominante est celle du composite PU-PZT, avec une valeur de  $P \in [0, 4.3]$   $\mu\text{W}$  (microwatts). Au point  $R=10^7$  ohms, la puissance de ce dernier se stabilise avec une valeur de  $P=1.65$   $\mu\text{W}$  (PU33%PZT),  $P=3.4$   $\mu\text{W}$  (PU37%PZT) et  $P=4.3$   $\mu\text{W}$  (PU41%PZT). En revanche, la puissance du composite à base de graphène continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $P=7.2$   $\mu\text{W}$  lorsque  $R>10^7$  ohms.



**Figure.28.** La Tension générée à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  Et  $S=0.29\%$



**Figure.29.** La puissance récupérer à partir du composite PU-PZT-GRAPHENE et du composite PU-PZT avec  $S=0.6\%$  Et  $S=0.29\%$

### Commentaire

**Les figures (28)** et **(29)** présentent une comparaison de la tension générée et de la puissance récupérée à partir de deux différents composites PU-PZT, ainsi que du composite PU-PZT/Graphène, avec des pourcentages variés de PZT. Les valeurs de déformation sont de  $S=0.6\%$  et  $S=0.29\%$  respectivement.

Dans **la figure (28)** qui représente la tension générée, dans l'intervalle  $R \in [10^5, 10^7]$  ohms, on observe que la tension dominante est celle du composite PU-PZT, avec des valeurs comprises entre  $U \in [0, 7]$  volts. Au point  $R=10^7$  ohms, la tension atteint  $U=7$  volts. À partir de  $R>10^7$  ohms, la tension du composite PU-PZT se stabilise à  $U=4$  volts (PU33%PZT),  $U=6$  volts (PU37%PZT) et  $U=7$  volts (PU41%PZT). En revanche, la tension du composite à base de graphène continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $U=12$  volts lorsque  $R>10^8$  ohms. Dans **la figure (29)** qui représente la puissance récupérée, on remarque que dans l'intervalle  $R \in [10^5, 10^7]$  ohms, la puissance dominante est celle du composite PU-PZT, avec une valeur de  $P \in [0, 4.3]$   $\mu\text{W}$  (microwatts). Au point  $R=10^7$  ohms, la puissance de ce dernier se stabilise avec une valeur de  $P=1.6$   $\mu\text{W}$  (PU33%PZT),  $P=3.4$   $\mu\text{W}$  (PU37%PZT) et  $P=4.3$   $\mu\text{W}$  (PU41%PZT). En revanche, la puissance du composite à base de graphène continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $P=3.8$   $\mu\text{W}$  lorsque  $R>10^7$  ohms.

#### 4. Les procédures de la modélisation et de la simulation de l'AMF

L'effet bilame se manifeste par la courbure d'un empilement constitué d'un matériau à coefficient de dilatation thermique élevé et d'un matériau à coefficient de dilatation thermique faible. L'étude de référence sur cet effet a été réalisée par S. Timoshenko, qui a analysé le comportement des bilames utilisés dans les thermostats. Un bilame, se présentant sous la forme d'une poutre fixée d'un côté et libre à l'état initial (Figure III.8), adopte une forme d'arc de cercle lorsque la température change. Le rayon de courbure est déterminé par l'expression suivante

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

Avec

**RT** : rayon de courbure à la température cible T,

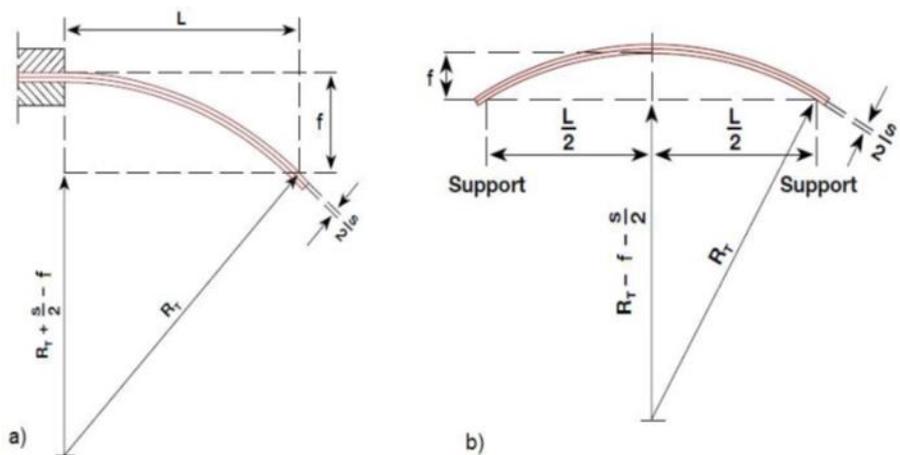
**R0**- rayon de courbure à la température de référence T0

**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 (30).



**Figure.30.** Déformation d'un bilame sous forme de poutre soumise à une variation de température :

a) bilame encasturé d'un côté ; b) bilame libre

Lorsque le bilame est plat à la température de référence  $T_0$  et que les épaisseurs des couches ainsi que les modules de Young sont égaux, l'équation (1) peut être simplifiée comme suit

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

La courbure spécifique d'un bilame est définie comme la mesure de la déformation relative par unité de rayon de courbure. Elle est directement liée à la différence de coefficient de dilatation thermique (CDT) et à la variation de température. Ainsi, plus la différence de CDT ou la variation de température est grande, plus la déformation du bilame sera importante. De plus, un bilame de faible épaisseur présentera une déformation plus prononcée qu'un bilame épais.

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

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

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

L'expression donnée est valable lorsque la flèche du bilame est inférieure à 10% de sa longueur. Dans le cas où le déplacement du bilame est bloqué à son extrémité, il développe une force  $F$  qui peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)1s^2}{4L} \quad (5)$$

Avec :

$F_0$  : force à la température de référence  $T_0$ , généralement équivalente à la température ambiante. La force est proportionnelle au rapport largeur sur longueur ( $l/L$ ) et au carré de l'épaisseur du bilame. Un bilame plus épais développe une plus grande force en raison de sa rigidité accrue. Un autre cas fréquemment rencontré en pratique est celui d'un bilame libre ou simplement supporté. Dans ce cas, la flèche du bilame peut être calculée selon l'expression suivante :

$$f = \frac{K(T - T_0)L^2}{2 \cdot 4S} \quad (6)$$

La flèche résultante est inférieure à celle d'une poutre encastree d'un côté de la même longueur. Cela 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 :

$$f = \frac{K(T-T_0)L^2}{2 \cdot 4S} - \frac{(F-F_0)L^3}{4Is^3Y} \tag{7}$$

Avec :

F0 : force à la température de référence T0.

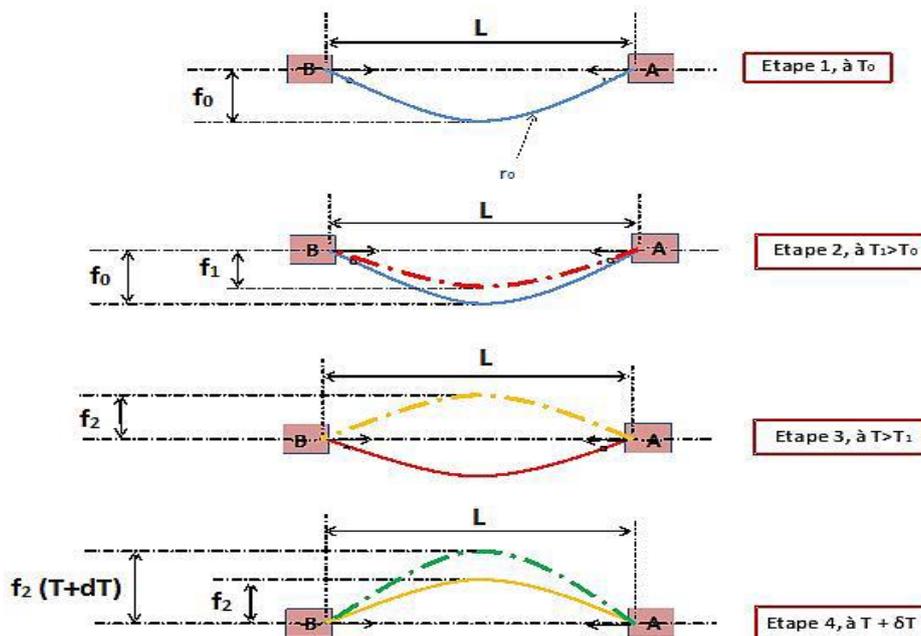
Pour annuler la flèche, il faut appliquer une force égale à :

$$F - F_0 = \frac{KY(T-T_0)Is^2}{2L} \tag{8}$$

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 encastré d'un côté. Cela est dû à la raideur supérieure que la structure libre manifeste.

Un bilame sous forme de poutre qui est contraint au niveau de ses extrémités est capable de flamber lors du chauffage. L'étude du flambage d'un bilame serré entre deux blocs immobiles avec des liaisons pivot est réalisée. Une forme initiale d'arc de sinus est considérée, avec la couche à haut coefficient de dilatation thermique en haut et une flèche f0 dirigée vers le bas (**Figure 31**). Lors du chauffage, la couche à haute dilatation thermique tire le bilame vers le haut et le met en compression.

Pour une certaine flèche f1, une position instable est atteinte. Si le bilame est chauffé davantage, il fléchit et change le sens de sa courbure. À ce stade, il aura une flèche f2, orientée vers le haut. Si la structure continue à être chauffée, la flèche continuera d'augmenter dans le même sens



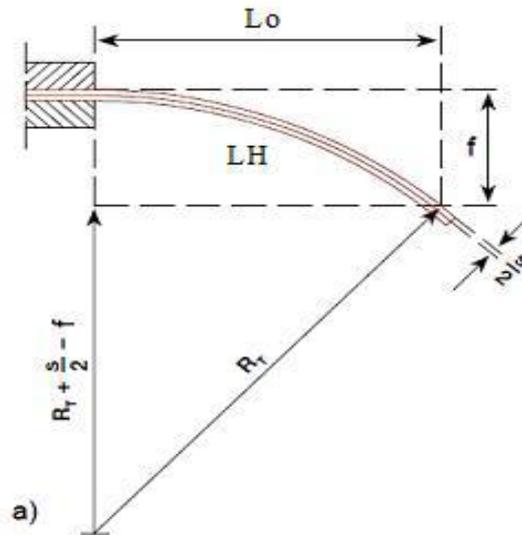


Figure.31. Déformation lors du chauffage d'un bilame a extrémités immobiles

$$L_0 = \sin(\theta) * R_r \tag{9}$$

$$R_T = \frac{2s}{3(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)} \tag{10}$$

$$L_{total} = L_H + dl_1 \tag{11}$$

Avec :

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

$$L_H = \text{arc sin}(\theta) * R_r \tag{12}$$

$$L_{total} = \text{arc sin}(\theta) * R_r + dl_1 \tag{13}$$

$$dl_1 = \alpha_1 \cdot L_0 \cdot \Delta T \tag{14}$$

On prendre :

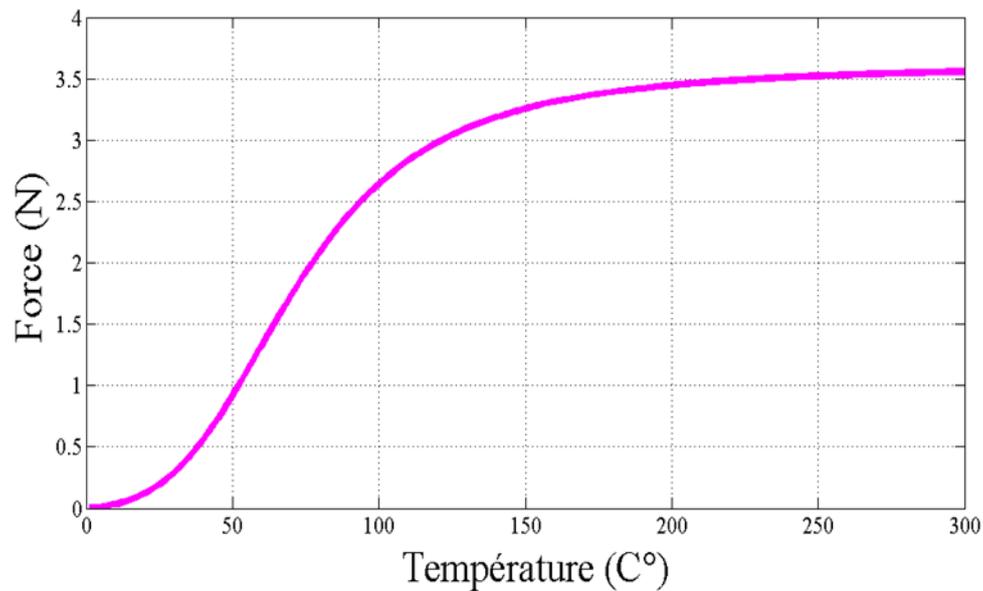
$$\Delta T = T - T_0 \tag{15}$$

Avec :

$T_0$  : Température initiale.

**Tableau. 6.** Les paramètres de simulation d'alliage de mémoire de forme(AMF)

Symbole	Paramètre	Valeurs
<b>L0</b>	longueur initial	$20 \cdot 10^{-2}$
<b>Y</b>	modules de Young	$0.03 \cdot 10^9$
<b>S</b>	L'épaisseur du bilame	$1 \cdot 10^{-3}$
<b><math>\alpha 1</math> : alpha 1</b>	coefficients de dilatation thermique (CDT).	$\alpha 1 = 2 \cdot 10^{-4}$
<b><math>\alpha 2</math> : alpha 2</b>	coefficients de dilatation thermique (CDT).	$\alpha 2 = 170 \cdot 10^{-4}$ ;
<b>F0</b>	force à la température de référence T0	0.01
<b>LS</b>	Largeur	$1 \cdot 10^{-2}$
<b>K</b>	Constante	$K = 2.5 \cdot 10^3$
<b>T</b>	Température	$T = [0, 300]$

**Figure.32.** La variation de la force en fonction de la température.

La modélisation et la simulation du système étudié sont basées sur les équations de la tension et de la puissance. Le système a été simulé en utilisant une force initiale de 1N ( $F_i = 1N$ )

$$u = \frac{R_L \cdot N \cdot Z_e \cdot F_i}{(R_L + Z_e) \cdot Z_m + (R_{conv})} \quad (17)$$

$$P = \frac{R_L \cdot R_{conv}^2 \cdot (F_i)^2}{2|(Z_e + R_L) \cdot Z_m + (R_{conv})|^2} \quad (18)$$

Avec :

$$Z_m = jL_m \omega + \frac{1}{jC_m \omega} + R_m \quad \text{Représente l'impédance mécanique.}$$

$$R_{conv} = \frac{h_{33}}{\omega} \quad \text{Correspondre à la conversion électromécanique}$$

$$Z_e = \frac{1}{jC_0 \omega} \quad (19)$$

$$C_m = S_{33}^d \frac{L_3}{A_3} \quad (20)$$

$C_0$  : Est généralement appelée capacité bloquée. C'est la capacité d'un condensateur dont le diélectrique, non piézoélectrique, aurait la même permittivité que la PVDF piézoélectrique.

$$C_0 = \frac{A_3}{L_3 \beta_{33e}^s} \quad (21)$$

$$N = \frac{g_{33}}{S_{33}^D} C_0 = h_{33e} C_0 \quad (22)$$

Avec :

$$F_2 = (D_2/D_1) \cdot F_1 \quad (23)$$

-  $D_1$  : diamètre de petite poulie  $D_1 = 4 \cdot 10^{-2}$

- D2 : diamètre de grande poulie  $D2=6*10^{-2}$

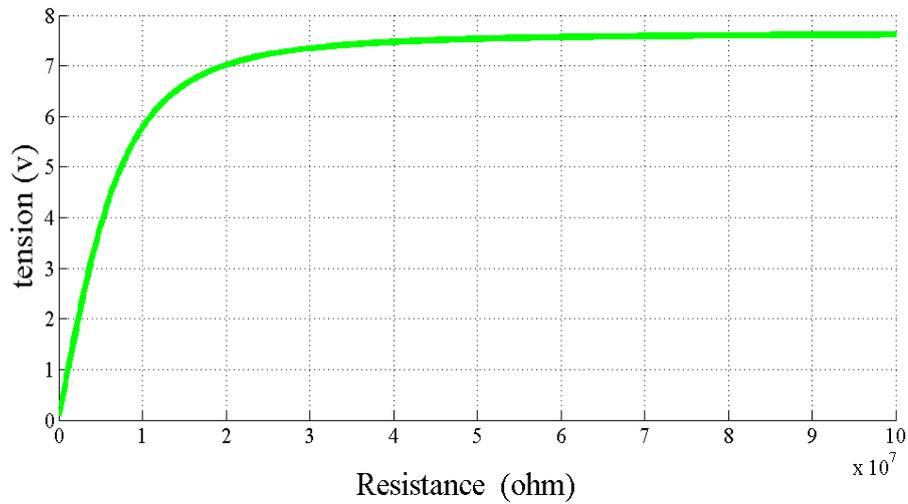


Figure.33. La variation de la tension en fonction de la résistance.

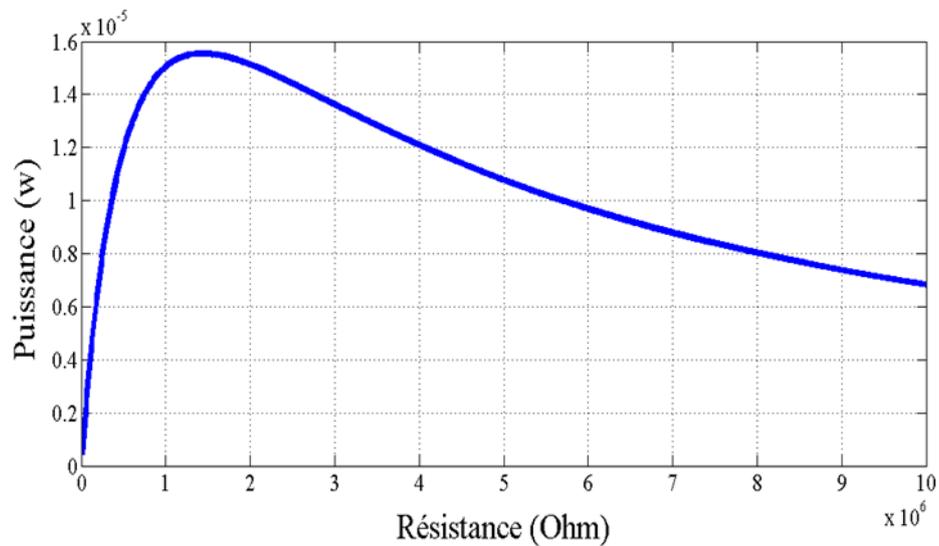


Figure. 34. La variation de la puissance en fonction de la résistance

### Commentaire

- La Figure (33) illustre la variation de la force dans un alliage à mémoire de forme en fonction de la température, sur une plage de 0 à 300 °C. On observe que la force atteint une valeur maximale de 3.5 N à une température de 200 °C.
- La Figure (34) présente la variation de la tension en fonction de la résistance. On remarque que la tension atteint une valeur maximale de 7.8V à une résistance de  $10 * 10^7$ .

- La Figure (35) montre la variation de la puissance en fonction de la résistance. On constate que la puissance atteint une valeur maximale de  $1.5 \cdot 10^{-5}$  lorsque la résistance est égale à  $1.5 \cdot 10^6$ .

### 5. Composite PU-PZT-GRAPHENE avec AMF

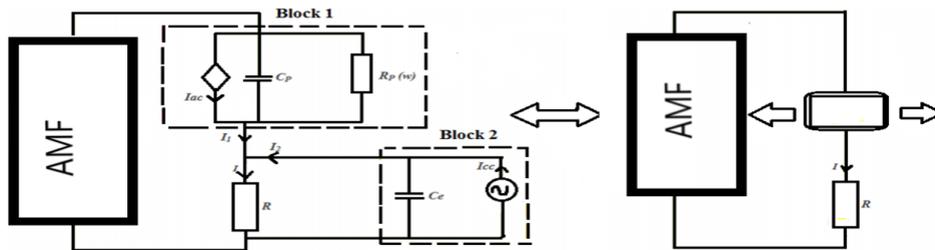


Figure. 35. Le circuit électrique équivalent du composite PU/PZT-G /AMF

Lors de l'application d'un nouveau système, qui consiste à ajouter AMF dans

un composé polymère, les résultats obtenus sont conformes à ce tableau et ces figures

Tableau.8. les valeurs de Force en fonction de la température avec différent déformation.

Température(C°)	25	30	35	40	42	45
Force ( N )	0.2	0.3	0.4	0.55	0.6	0.73
déformation	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%	1%	1.2%

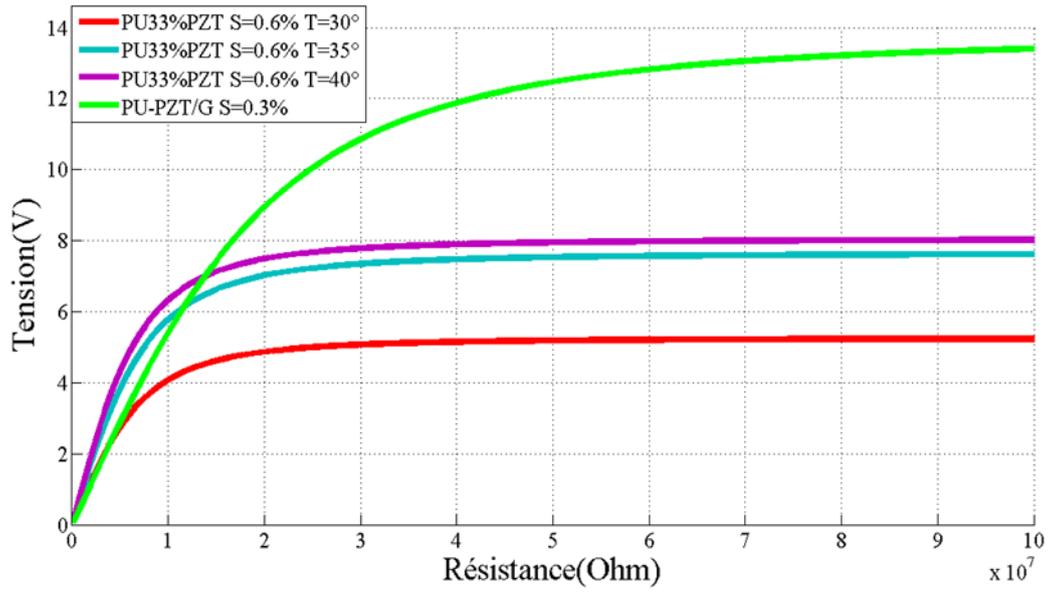


Figure.36. la tension générée à partir des composite PU-PZT33% S=0.6% GRAPHENE S=0.3%

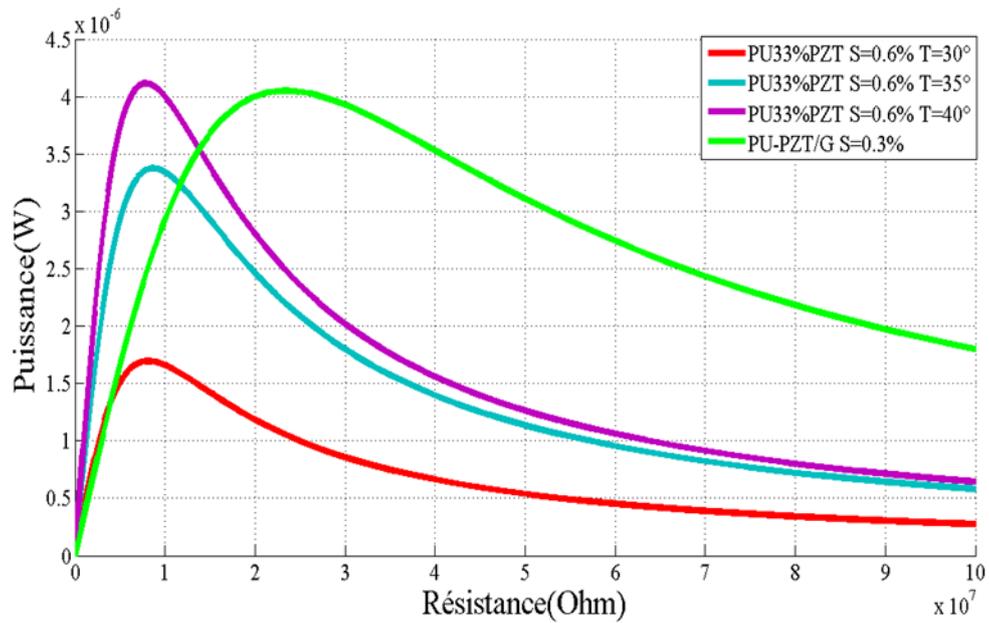


Figure.37. la puissance générée à partir des composite PU-PZT33% S=0.6% et GRAPHENE S=0.3%

Commentaire

**La figure (36)** représente de la tension générée à partir des composite PU-PZT33% S=0.6% GRAPHENE S=0.3% avec différentes températures, on remarque que la tension a une valeur maximale de 13.8 V lorsque  $R=4 \times 10^7$  avec GRAPHENE et PU-PZT33% on remarque dans :

- $T=30\text{ C}^\circ$  : la tension a une valeur maximale de 5.5 V lorsque  $R=4 \times 10^7$
- $T=35\text{ C}^\circ$  : la tension a une valeur maximale de 7.7 V lorsque  $R=4 \times 10^7$
- $T=40\text{ C}^\circ$  : la tension a une valeur maximale de 8 V lorsque  $R=4 \times 10^7$

En présence GRAPHENE la tension augmente d'une grande façon [ (PU-PZT/G) > PU-PZT33% ( $T=40\text{C}^\circ$ ) > PU-PZT33% ( $T=35\text{C}^\circ$ ) > PU-PZT33% ( $T=30\text{C}^\circ$ )]

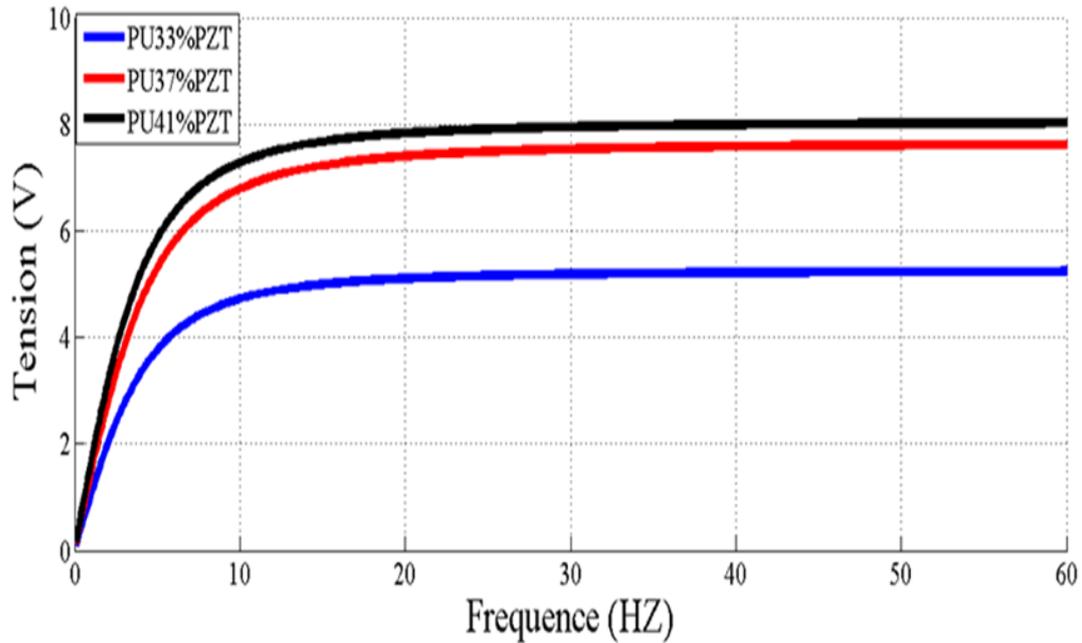
**La figure (37)** représente de la puissance générée à partir des composite PU-PZT33% S=0.6% GRAPHENE S=0.3% avec différentes températures, on remarque que la tension a une valeur maximale de  $4.2 \times 10^{-6}$  watt lorsque  $R=2.5 \times 10^7$  avec GRAPHENE et PU-PZT33% on remarque dans :

- $T=30\text{ C}^\circ$  : la puissance a une valeur maximale de  $1.7 \times 10^{-6}$  watt lorsque  $R=0.8 \times 10^7$
- $T=35\text{ C}^\circ$  : la puissance a une valeur maximale de  $3.4 \times 10^{-6}$  watt lorsque  $R=0.8 \times 10^7$
- $T=40\text{ C}^\circ$  : la puissance a une valeur maximale de  $4 \times 10^{-6}$  watt lorsque  $R=0.8 \times 10^7$

En présence GRAPHENE la puissance augmente d'une grande façon [ (PU-PZT/G) > PU-PZT33% ( $T=40\text{C}^\circ$ ) > PU-PZT33% ( $T=35\text{C}^\circ$ ) > PU-PZT33% ( $T=30\text{C}^\circ$ )] Alors le Graphene a des propriétés particulières par rapport aux autres matières, il donne une très bonne flexibilité

**Tableau.9.** les valeurs de tension en fonction de la fréquence

Fréquence (HZ)	10
PU33%PZT	5
PU37%PZT	7
PU41%PZT	7.9



**Figure.38.** la tension générer à partir du composites PU-PZT avec déferentes pourcentages et  $S=0.6\%$

### Commentaire

Les résultats obtenus à partir du modèle mathématique pour le composite PU-PZT avec une déformation de  $S=0.6\%$  et une résistance  $0.7 \cdot 10^7$  sont présentés dans **la figure (38)**, qui montre la tension générée en fonction de la fréquence

La tension générée par un composite PU33%PZT atteint une valeur de 5 V sur une plage de fréquence supérieure à 10HZ. On observe que la tension augmente avec l'augmentation du pourcentage de PZT ajouté, atteignant 7 V pour 37% de PZT et 7.9 V pour 41% de PZT, sur la même plage de fréquence.

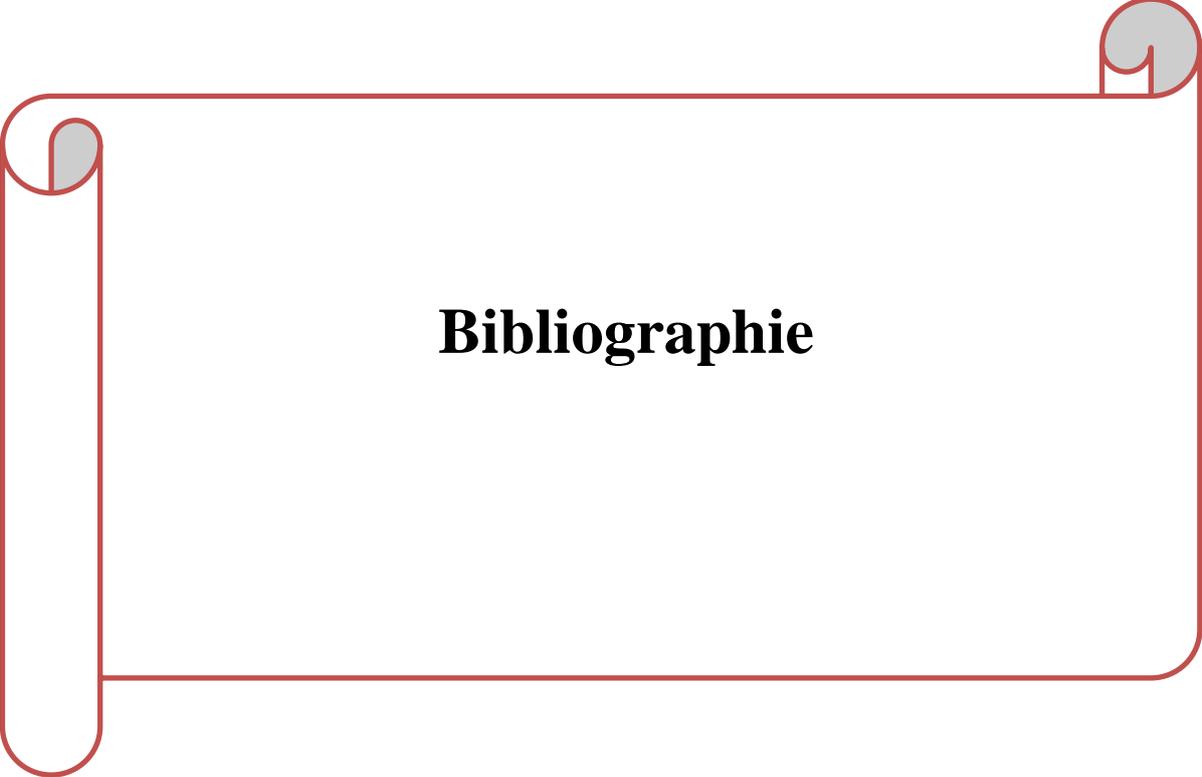
## 6. Conclusion

L'utilisation conjointe du PU, du PZT et du GRAPHENE avec AMF offre des perspectives prometteuses pour le développement de matériaux composites avancés. Ces matériaux combinent les propriétés uniques du PU, telles que la flexibilité, l'élasticité et la légèreté, avec les caractéristiques spécifiques du PZT, telles que l'effet piézoélectrique, et les propriétés exceptionnelles du graphène, telles que la conductivité élevée. L'intégration d'un alliage à mémoire de forme ajoute la capacité de récupération de la forme initiale après déformation, ce qui en fait un ajout précieux pour de nombreuses applications. La modélisation et la simulation de ces matériaux permettent de mieux comprendre leurs interactions, leurs comportements électromécaniques et leurs performances globales. Ces outils offrent la possibilité de prédire et d'optimiser les propriétés des matériaux composites, ainsi que de concevoir des structures et des dispositifs adaptés à des applications spécifiques.

### Conclusion générale

En conclusion, le développement d'un capteur intelligent à excellente flexibilité intégrable dans des structures textiles pour la surveillance des signes vitaux repose sur l'utilisation de matériaux intelligents, tels que les polymères composites, ainsi que sur des techniques de modulation et de simulation. Cette technologie prometteuse ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de la santé, en offrant des solutions plus confortables, flexibles et précises pour la surveillance des signes vitaux, ce qui pourrait améliorer la qualité de vie des patients et faciliter le travail des professionnels de la santé. La réalisation de la simulation des paramètres théorique pour différents composite (PU-33%PZT, PU-37%PZT, PU-41%PZT) été remarqué une augmentation de tension et la puissance lorsque le pourcentage des charges PZT augmente dans le composite. L'ajout de l'alliage a mémoire de forme AMF comme un matériau de renforcement Multifonctionnel qui a amélioré les propriétés physicochimique, les alliages à mémoire de forme Constituent une famille de matériaux possédant des propriétés mécaniques tout à fait Remarquables ils sont capables de mémoriser une ou deux formes différentes et d'y revenir après Déformation par un simple changement de température ,L'ajout de GRAPHENE dans un composite peut améliorer ses propriétés de conductivité, de résistance et de flexibilité.

Les capteurs intelligents basés sur un polymère composite PU et PZT et du GRAPHENE et AMF représentent une combinaison prometteuse de matériaux offrant des performances améliorées et des fonctionnalités avancées pour une gamme étendue d'applications. Leur développement et leur optimisation continus ouvriront de nouvelles perspectives dans le domaine des capteurs intelligents et contribueront à l'avancement des technologies de détection et de surveillance. Notre étude ouvrira la voie à de futures études ou ils pourront développer et produire un autre matériau avec une bonne flexibilité sur notre ancien polymère et avec une très bonne intégration.



# **Bibliographie**

## References bibliographies

- [1] « <https://www.olikrom.com/fr/blog/oeil-de-lexpert/les-materiaux-intelligents-de-demain/>, » [En ligne].
- [2] « <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/-smart-materials-market>, » [En ligne].
- [3] J. D. ROSNAY, les matériaux intelligents l'Université de tous les savoirs, 2000.
- [4] S. & W. Zhang, Recent advances in electromagnetic metamaterial devices for biomedical applications, 2019
- [5] « <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tam%C3%A9riau>, » [En ligne].
- [6] « <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/quest-ce-quun-metamateriau-112527/>, » [En ligne].
- [7] T. S. D. a. L. R. ] Cui, Metamaterials: theory, design, and applications. Springer., 2014.
- [8] A. T. L. V. a. J. B. P. par Filiberto Bilotti, «Metamaterials: Fundamentals and Applications", » dans la revue Wiley Interdisciplinary Reviews: Microwave and Wireless Communications,, 2012.
- [9] « <https://www.tekceleo.fr/technologie-piezoelectricite/>, » [En ligne].
- [10] Piezoelectricity an Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals «Walter Hewing, Jürgen Klee Mann Publisher: Springer Science & Business Media ISBN: 978-3540213784.2005
- [11] B. Clephas, Adaptronics and smart structures, Hartmut Janocha editor, Springer-Verlag, chap. 6.2: piezoelectric actuator, 1999.
- [12] A. S. e. al, Piezoelectric Materials and Structures for Energy Harvesting Applications," Energies,, 2015., pp. 9587-9606
- [13] « <https://www.google.com/>, » [En ligne]
- [14] A.PARENT, Apport des nouveaux matériaux piezoelectriques dans le domaine des microgyromètres vibrants, Paris: Thèse de doctorat : Faculté des Sciences d'Orsay – Université de Paris-Sud, 2008, p. 167p..
- [15] K. N. T. F. Yuya Sakai, «: "A Historical Overview of Magnetostrictive Materials and Their Applications", » : Journal of Applied Physics, Vols. %1 sur %2117, Issue 17, 2015.

- [16] E. J. John Smith, «A Historical Overview of Magnetostrictive Materials and Their Applications»,» Materials Science Review, 2020
- [17] J. S. John Doe, «"Magnetostrictive Materials and Their Applications: A Review",» Journal of Materials Science, pp. 789-802, 2020
- [18] M. E. e. S. Ibrahim, Écrivain, L'optimisation des structures intelligente pour la récupération d'énergie vibratoire. [Performance]. 2019
- [19] «<https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/mems-market>,» [En ligne].
- [20] «balance en MEMS sur le site esiee.fr [archive],» [En ligne].
- [21] Moussa, « Elaboration des modèles mathématiques pour l'étude de la Dégradation du polyéthylène dans les câbles d'énergie électrique ». Thèse de Magister d'Institut de l'Electrotechnique, UFAS, 1995
- [22] B. Estibals, J. L. Sanchez, C. Alonso, H. Camons, J. P. Laur, « Vers l'intégration de convertisseurs pour l'alimentation des microsystemes ». Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes (LAAS-CNRS).
- [23] <http://www.satie.ens-cachan.fr/>.
- [24] Composite Materials: Science and Engineering" par Krishan K. Chawla.
- [25] Article de recherché: "Historical Developments in Polymer Matrix Composites" par Ramesh Talreja, Department of Aerospace Engineering, and Texas A&M University.
- [26] «<https://www.google.com/>,» [En ligne]
- [27] Livre: "Polyurethane Handbook: Chemistry, Raw Materials, Processing, Application, Properties" par G. Oertel.
- [28] Livre: "Polyurethane Handbook: Chemistry, Raw Materials, Processing, Application, Properties" par G. Oertel.
- [29] Article de recherche : "Polymère-Matrix Composites: Manufacturing Techniques and Applications" par N. E. Zafeiropoulos, M. S. Vyzantinidou et S. N. Georga.
- [30] J. E. Jaffe, «Piezoelectric ceramics»,» Academic Press, , New York, 1971.
- [31] S. Somiya, Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties"

[32] <https://tome.app/aabbiirr/le-graphene-le-materiau-miracle-du-futur->

[33] <https://www.aquaportail.com/definition-14805-graphene.html>

[34] <https://www.products.pcc.eu/fr/blog/le-graphene-quest-ce-que-cest-et-a-quoi-sert-il/>

[35] Arlt, G. (1932). The Influence of Temperature on the Elastic Properties of Alloys. *Zeitschrift für Physik*, 75(9-10), 499-525.

[36] Patoor E. et Berveiller M., *Technologie des alliages à mémoire de forme, Comportement mécanique et mise en oeuvre*, Paris : Hermès, 1994

[37] Bhattacharya, K. (Ed.). (2003). *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. Springer Science & Business Media.

[38] Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.

[39] Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 56, 1078-1113.

[40] Patoor E. et Berveiller M., *Technologie des alliages à mémoire de forme, Comportement mécanique et mise en oeuvre*, Paris : Hermès, 1994

[41] <http://perso.wanadoo.net.ma/orthobest/ortho.htm>[en ligne] visite le 12/8/2019.

[42] S. P. Beeby, M. J. Tudor, ET N. M. White, «Energy harvesting vibration sources for Micro systems applications», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no12, p. R175, 20