

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Commande Electrique

Par

➤ **HADDAD AYMEN**

➤ **SAFFIDINE ZAINEB**

Intitulé

*Etude d'un système autonome de production d'énergie
couplant AMF/Piézoélectrique polymère composite*

Soutenu le : 26 / 09 / 2022

Devant le Jury composé de :

Mme	Zahar djamila	MCB	Président	Univ-BBA
Mme	Cherif aida	MCB	Examineur	Univ-BBA
Mr	Meddad mouir	PR	Rapporteur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

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

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

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants qui a contribué à notre formation Par ailleurs, Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous adressons un infini remerciement à toute la famille, à nos parents spécialement ce modeste travail est une gratitude pour

vos

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à sacrifices.

tous nos amis et collègues pour le soutien moral.



Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail à :

◇ *A mes **parents** qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner tout toute ma reconnaissance, alors simplement << **MERCI POUR TOUT** >>.*

◇ *A mon binôme **Saffidine Zaineb***

◇ *J'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches amis et collègues, qui m'ont Toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

◇ *Enfin, A tous ceux que je ne peut citer ici mais qui savent combien d'avoir croisé Leur route m'a apporté.*



Haddad Aymen



Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail à :

◇ *A mes **parents** qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner tout toute ma reconnaissance, alors simplement << **MERCI POUR TOUT** >>.*

◇ *A mon binôme **Haddad Aymen** .*

◇ *J'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches amis et collègues, qui m'ont Toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

◇ *Enfin, A tous ceux que je ne peut citer ici mais qui savent combien d'avoir croisé Leur route m'a apporté.*



Saffidine Zaineb

➤ Liste des tableaux :

❖ *Chapitre II : Source des MEMS.*

Tableau II.1: Applications des matériaux ferroélectriques en fonction de l'effet

❖ *Chapitre III : Modélisation et simulation.*

Tableau III.1 : Paramètres théoriques du composite PU-PZT.

Tableau III.2 : Les paramètres de simulation d'alliage de mémoire de forme (AMF).

Tableau III.3 : Caractéristiques du matériau P188 et paramètres du modèle (mode 33).

Tableau III.4 : les valeurs de F_{amf} en fonction de la température.

➤ Listes des figures :

❖ *Chapitre I : La Récupération d'énergie.*

Figure I.1: Le pétrole.

Figure I.2: Le charbon.

Figure I.3: Le gaz naturel.

Figure I.4: Centrale nucléaire.

Figure I.5: Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.

Figure I.6: Schéma d'une installation de production d'énergie géothermie.

Figure I.7: La biomasse.

Figure I.8: Les éoliennes.

Figure I.9: Éolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b).

Figure I.10: Éléments constituant une éolienne à axe horizontal.

Figure I.11 : Fonctionnement de panneau solaire thermique.

Figure I.12 : Centrale photovoltaïque.

Figure I.13 : Les types de rayonnement solaire.

❖ *Chapitre II : Source des MEMS.*

Figure II.1 : Exemple d'accéléromètre AD-XL50 (3mm²).

Figure II.2: MEMS et son environnement.

Figure II.3: Les quatre secteurs des MEMS.

Figure II.4: Jacques et Pierre Curie, découvreurs de l'effet direct de la Piézoélectricité mise en évidence de l'effet indirect de la piézoélectricité.

Figure II.5: Représentation de l'effet direct et inverse.

Figure II.6 :quelques matériaux piézoélectriques.

Figure II.7: Propriétés des classes cristallines.

Figure II.8 :Un capteur magnétostrictif.

Figure II.9 :Dispositif de charge par effet triboélectrique.

Figure II.10 :Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique.

Figure II.11: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur.

Figure II.12: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone

Figure II.13: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.

Figure II.14: Les régimes du lit fluidise en fonction de la vitesse de fluidisation.

Figure II.15: Dispositif à vibrations.

Figure II.16: Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique.

Figure II.17: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par tambour tournant (a) –Lisse ;(b) – à ailettes .

Figure II.18: Représentation d'un polymère (Polyéthylène).

❖ **Chapitre III : Modélisation et simulation.**

Figure III.1 : La structure globale de piézoélectrique polarisé.

Figure III.2 : Structure du PZT(Le titano-zirconate de plomb).

Figure III.3 : Synthèse du polyuréthane.

Figure III.4 : Polyuréthane mousse et solide.

Figure III.5 : Le circuit électrique équivalent du composite PU/PZT.

Figure III.c : La tension générer en fonction de la résistance avec des différents pourcentages.

FigureIII.7: La puissance récupérer en fonction de la résistance avec des différents pourcentages.

Figure III.8 : Déformation d'un bilame sous forme de poutre soumis à une variation de température : a)bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre.

Figure III.9: Déformation lors du chauffage d'un bilame a extrémités immobiles.

Figure III.10: Bilame encastré d'un côté.

Figure III.11 : La variation de la force en fonction de la température.

Figure III.12 : La variation de la tension en fonction de la résistance.

Figure III.13 : La variation de la puissance en fonction de la résistance.

Figure III.14: La variation de la tension en fonction de la résistance sans AMF et avec AMF et avec différente température.

Figure III.15: La variation de la puissance en fonction de la résistance sans AMF et avec AMF et avec différente température.

Figure III.16 : La variation de la tension à partir du composite PU-PZT sans AMF et avec AMF.

Figure III.17 : La variation de la puissance à partir du composite PU-PZT sans AMF et avec AMF.

➤ **Liste des abréviations et symboles :**

Symboles	Signification
PZT	Titano-zirconate de plomb
PU	Polyuréthane
AMF	Alliage à mémoire de forme
MEMS	Micro electro Mechanical systems
GES	Gaz à effet de serre
STEP	Stations de Transfert d'Énergie par Pompage
SCE	Système de Conversion Éolien
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
PVDF	Fluorure de Polyvinylidene
PE	Polyéthylène
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PVC	Polychlorure de vinyle
PA	Polyamides
PET	Polyéthylène téréphtalate
ϵ_r	Permittivité relative
Y	Modules de Young du matériau en (GPa)
A (mm)	Surface
e (μm)	Épaisseur (μm)
Cm	Capacité mécanique équivalente (F)
C0	Capacité bloquée (F)
A33	Surface en mode 33 (m ²)
ω	Pulsation (Hz)
L	Longueur (m)
I	Largeur(m)
S	Épaisseur(m)
T	Température (°C)
F0	La Force initiale(N)
P	Puissance (watt)
R	Résistance (ohm)
L0	Largeur initiale(m)
Y	Module de Young
S	L'épaisseur du bilame
A1 :alpha1	coefficients de dilatation thermique (CDT)
A2 :alpha2	coefficients de dilatation thermique (CDT)
F	La Force (N)
L	Largeur (m)
K	Constan

Résumé :

Une forte demande vis à vis systèmes intelligents surgit actuellement de nombreux secteurs. En effet les niveaux de connaissance et de savoir-faire technologique permettent maintenant de fabriquer des matériaux intelligents avec les propriétés mécanique et électrique désirées. Rendant ainsi possible la conception de système à des coûts moindres .

L'objectif de ce mémoire est de développer des composites polymères à haute efficacité pour la récupération d'énergie, Dans la première partie de ce travail de thèse concerne à la récupération d'énergie et les sources d'énergie et leurs avantages et inconvénients. La seconde partie sur les sources les conceptions, et les différents secteurs des MEMS. La dernière partie de ce travail consiste à la modélisation et la simulation d'un composite PU-PZT ainsi que l'importance les alliages a mémoire de forme pour obtenir de meilleurs résultats dans le domaine de l'énergie.

Cette mémoire est une étude théorique consiste à la modélisation et la simulation des modèles de récupération d'énergie mécanique ambiante pour un système intelligent d'amplification du dispositif mécanique par les AMF afin d'améliorer la conversion mécano-électrique.

Mots-clés : Récupération d'énergie, piézoélectrique, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), alliage a mémoire de forme (AMF), titano-zirconate de plomb (PZT).

Abstract:

A strong demand for intelligent systems is currently emerging in many sectors. Indeed, the levels of knowledge and technological know-how now make it possible to manufacture intelligent materials with the desired mechanical and electrical properties thus making possible system design at lower costs.

The objective of this dissertation is to develop high-efficiency polymer composites for energy recovery . In the first part of this thesis work concerns energy recovery and energy sources and their advantages and disadvantages. The second part on the sources the designs, and the different sectors of the MEMS. The last part of this work consists in the modelling and simulation of a composite PU-PZT as well as the importance of shape memory alloys to obtain the best results in the field of energy. This memory is a theoretical study consists of modelling and simulation of ambient mechanical energy recovery models for an intelligent system of amplification of the mechanical device by the AMF to improve the mechano-electrical conversion.

Keywords: Energy recovery, piezoelectric, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), shape memory alloy (AMF), lead titanium zirconate (PZT)

المخلص :

يظهر طلب قوي على الأنظمة الذكية في العديد من القطاعات ، وبالفعل ، فإن مستويات المعرفة والدراسة التكنولوجية تجعل من الممكن تصنيع مواد ذكية بالخصائص الميكانيكية والكهربائية المرغوبة . مما يجعل من الممكن تصميم النظام بتكلفة أقل.

الهدف من هذه الأطروحة هو تطوير مركبات بوليمر عالية الكفاءة لحصاد الطاقة ، في الجزء الأول من هذه الأطروحة يتعلق العمل بحصاد الطاقة ومصادر الطاقة ومزاياها وعيوبها. الجزء الثاني عن مصادر وتصاميم وقطاعات النظم الكهروميكانيكية الصغرى. يتكون الجزء الأخير من هذا العمل من النمذجة والمحاكاة لمركب البولي يوريثين و زركونات تيتانيوم الرصاص بالإضافة إلى أهمية سبائك ذاكرة الشكل لتحقيق نتائج أفضل في مجال الطاقة، هذه الأطروحة هي دراسة نظرية تتكون من نمذجة ومحاكاة نماذج استعادة الطاقة الميكانيكية المحيطة لنظام ذكي لتضخيم الجهاز الميكانيكي من قبل السبائك ذات الذاكرة الشكلية لتحسين التحويل الميكانيكي الكهربائي.

الكلمات المفتاحية : حصاد الطاقة ، كهروضغطية ، أنظمة ميكانيكية كهروميكانيكية دقيقة ، سبيكة ذاكرة الشكل ، زركونات تيتانيوم الرصاص .

❖ *Sommaire :*

Introduction générale	1
<i>Chapitre I : la Récupération d'énergie.</i>	
I-1 - Introduction	3
I-2 - L'énergie	3
I-2-1 - Définition	3
I-2-2 - Source d'énergie.....	4
I-3 - L' énergie non renouvelable	4
I-3-1 - Définition	4
I-3-2 - Les sources d'énergie non renouvelable.....	4
a) - Le pétrole.....	4
b) - Le charbon.....	5
c) - Le gaz naturel.....	5
d) - Le nucléaire.....	6
I-3-3 - Les avantages et les inconvénients de l'énergie non renouvelable.....	7
a)- Les avantages de l'énergie non renouvelable.....	7
b)- Les inconvénients de l'énergie non renouvelable.....	7
I-4 - L'énergie renouvelable	7
I-4-1 - Définition.....	7
I-4-2 - Types d'énergies renouvelables.....	7
I-4-2-1 - Energie hydraulique.....	7
I-4-2-2 - Energie géothermie.....	9
I-4-2-3 - Energie biomasse.....	10
I-4-2-4 - L'énergie éolienne.....	11
I-4-2-5 - Energie solair.....	14
I-5 - Les MEMS	17
I-5-1 - Historique.....	17
I-5-2 - Définition.....	17
I-6 - Conclusion	18

Chapitre II : Source des MEMS

II-1 - Introduction	19
II-2 - Les Microsystèmes	19
II-2-1 - Notion de microsystème.....	19
II-2-2 - Historique des Microsystèmes.....	20
II-2-3 - Les Micros Electro Mécanique Systèmes (MEMS).....	21
II-2-4 - Conception des MEMS.....	22
II-2-5 - Les différents secteurs des MEMS.....	22
II-3 - Source des MEMS	23
II-3-1 - Piézoélectrique.....	23
II-3-1- 1 - Découverte de l'effet piézoélectrique.....	23
II-3-1-2 - Définition.....	24
II-3-1-3 - Domaines d'applications des matériaux piézoélectriques.....	26
II-3-1-4 - Les matériaux piézoélectrique.....	26
II-3-1-5 - Les avantages et les inconvénients de piézoélectrique.....	28
II-3-2 - Les matériaux magnétostrictif.....	28
II-3-2-1 - Définition.....	28
II-3-2-2 - Les applications.....	28
a) Capteur magnétostrictif.....	28
b) Les actionneurs.....	29
c) Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques.....	30
II-3-2-3 - Principaux Phénomènes de magnétostuction.....	30
II-3-3- Triboélectrique.....	31
II-3-3-1 - La triboélectricité.....	31
II-3-3-2 - Chargement des matériaux par triboélectrique.....	31
a) Charge par effet triboélectrique.....	31
b) Dispositifs de chargement triboélectrique.....	33
II-4 - Le polymère	38
II-4 -1 - Historique.....	38
II-4 -2 - Définition d'un polymère.....	38

II-4 - 3 - Différents types de polymères.....	38
a) Les monomères.....	38
b) Les polymères.....	39
II-4 -4 - Domaine d'utilisation des polymères	39
II-4-5 - Classification des polymères.....	39
II-5 - Conclusion.....	41

Chapitre III : Modélisation et simulation.

III-1 - Introduction.....	42
III-2 - Piézoélectrique.....	42
III-2-1 - Définition	42
III-2-2 - C'est quoi le PZT et PU.....	43
III-2-2 -1 - Le Titano-Zirconate de Plomb (PZT).....	43
III-2-2 -2 - Le Polyuréthane (PU).....	43
III-2-2 -3 - Les applications du polyuréthane (PU).....	44
III-3 - Les procédure de la modélisation et simulation du PU-PZT.....	44
III-4 - les alliages a mémoire de forme (AMF).....	49
III-4-1 - Historique sur les alliages a mémoire de forme (AMF).....	49
III-4-2 - Les applications de l'AMF.....	50
III-4-3 - Les procédure de la modélisation et de la simulation de l'AMF.....	50
III-4-4 – Composite PU-PZT avec AMF.....	61
III-5 - Conclusion.....	63
Conclusion général.....	64

Introduction générale :

Depuis plusieurs années des pistes de recherches sont exploitées des solutions sont présentées pour trouver d'autres sources de production d'énergie, moins coûteuses et moins polluantes pour l'environnement. On appelle récupération d'énergie la conversion de l'énergie provenant d'une source gratuite en une autre forme utile, notamment en électricité, l'objectif de cette récupération d'énergie est l'alimentation de systèmes autonomes.

Les céramiques piézoélectriques de titano-zirconate de plomb PZT de formulation générale $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ ont été les plus étudiées, elles sont utilisées dans de très nombreuses applications comme générateurs d'impulsion, transducteurs ultrasonores, capteurs, actionneurs, dispositifs de positionnement, moteurs piézoélectriques, etc. Dans des divers domaines, tels que la médecine, l'aéronautique, l'électronique, l'électrotechnique, etc. L'étendue de ces domaines d'applications est due à leurs propriétés diélectriques très intéressantes et à leurs propriétés de couplage électromécanique particulièrement au voisinage de la frontière morphotrope de phase où coexistent les deux phases, rhomboédrique (riche en Zr) et tétragonale (riche en Ti).

La découverte des polyuréthanes PU dans les années trente, leurs domaines d'application n'ont cessé de s'élargir : mousses souples ou rigides, revêtements, élastomères, colles, adhésifs, bains de couches, encres et vernis etc....

En 2000, le marché mondial des produits à base de polyuréthane étaient estimés à 3,1 millions de tonnes. La production la plus importante était celle des enductions et représentait 44% de cette demande globale. Ces enductions (revêtements, peintures, encres et vernis) étaient, jusqu'à il y a quelques dizaines d'années essentiellement constituées de polyuréthanes à base de solvants organiques. Mais le coût élevé de ces polyuréthanes, et surtout les normes environnementales sur les émissions de composés organiques volatils, de plus en plus contraignantes, ont favorisé le développement des dispersions aqueuses de polyuréthane.

Les alliages à mémoire de forme AMF sont des matériaux dont la réputation n'a cessé de croître ces dernières décennies, particulièrement depuis leur classification parmi les matériaux intelligents. Les AMF doivent leurs propriétés à une transformation de phase bien connue des métallurgistes qui est la transformation martensitique. Cette dernière apparaît comme un cisaillement provoquant un changement de structure sans pour autant qu'il y ait déplacement d'atomes. Cette transformation, générée dans le matériau, peut sous l'effet d'une variation de température (ou une contrainte) conduire à des formes mémorisées du matériau à haute ou basse température. Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

* Dans le premier chapitre nous intéresserons au contexte de la récupération d'énergie.

* Le deuxième chapitre aborde les sources des MEMS.

* Le troisième chapitre concerne la modélisation et simulation du composite PU-PZT et AMF.

Ce mémoire se terminera par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus et donnant des perspectives.

Chapitre I : La récupération d'énergie

I-1 - Introduction :

La thématique de la récupération d'énergie est une thématique assez récente dans l'histoire des environnements intelligents: on peut considérer qu'elle a pris réellement son essor après l'an 2000. Ces dernières années de plus en plus de projets ont vu le jour, de nouveaux axes de recherche ont été examinés et de nouvelles avancées sont régulièrement mises en avant. Notre environnement est rempli d'énergie inutilisée. Un avantage des réseaux de capteurs est leur faible consommation qui permet d'envisager de nouveaux moyens de production. Si certaines sources, comme le solaire et l'éolien attirent de plus en plus l'attention grâce à leur utilisation pour la production quotidienne d'électricité, d'autres sont beaucoup plus confidentielles. Nous allons donc dresser un rapide état des lieux des sources existantes ainsi que de l'énergie pouvant en être extraite grâce aux prototypes réalisés pour y puiser. Cela permettra d'avoir une idée du niveau requis pour être compétitif avec notre approche [1]. Le marché des microsystèmes ou Micro Electro Mechanical System (MEMS) connaît depuis plusieurs années un essor commercial important et la tendance n'est pas prête de s'inverser. Portés par des applications de plus en plus diversifiées, innovantes et originales, les microsystèmes prennent une place importante dans n'importe quel objet du quotidien.

I-2 - L'énergie :

I-2-1 - Définition :

Est un secteur économique de première importance, qui comprend la production, le transport, la transformation, la distribution et la commercialisation des diverses sources d'énergie[2]. L'exploitation des sources d'énergie primaire est suivie par sa transformation éventuelle en énergie secondaire : production de produits pétroliers par raffinage, production d'électricité et de chaleur. Cette énergie est ensuite stockée (à l'exception majeure de l'électricité) puis transportée avant d'être distribuée au consommateur final. C'est ce que l'on appelle l'énergie finale.

I-2-1 - Source d'énergie :

On qualifie également l'énergie selon la source d'où elle est extraite ou le moyen par lequel elle est acheminée: les énergies fossiles, l'énergie nucléaire, l'énergie de masse, l'énergie solaire, l'énergie électrique, l'énergie chimique, l'énergie thermique, l'énergie d'origine biomassique

(biomasse sèche, biomasse humide et biocarburants) .Il existe des sources d'énergie qui sont régénérées par des processus naturels dans la mesure où on les exploite sans dépasser les limites de cette capacité de régénération : on les nomme par convention énergies renouvelables.

I-3 - L'énergie non renouvelable :

I-3-1 - Définition :

Une énergie non-renouvelable est une source d'énergie qui ne se renouvelle pas assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme, ou même qui ne se renouvelle pas du tout, par opposition aux énergies renouvelables. Les principales sources d'énergies non-renouvelables sont dérivées des hydrocarbures [3], tels que le pétrole, le gaz naturel et les huiles.

On peut classer les énergies non renouvelables en deux grandes familles :

- ◆ Énergie fossile : On peut citer notamment le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, et la consommation intensive, d'où les risques d'épuisement actuels.
- ◆ Énergie nucléaire : les gisements d'uranium étant limités. Il existe cependant des partisans du caractère renouvelable de l'énergie nucléaire, bien que la théorie n'ait pas encore rejoint la réalité pratique.

I-3-2 - Les sources d'énergie non renouvelable :

Il existe 4 source d'énergies non renouvelable sont : le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le nucléaire.

a) Le pétrole :

On retrouve le pétrole qui permet aux voitures et autres transports de fonctionnement [3] (camions, bateaux, avions...). Cette énergie est massivement utilisée dans le monde (*37% selon une étude menée par Mtaterre.fr*), car elle très énergétique et facile à transporter. Le pétrole est présent partout dans nos vies que ce soit pour l'essence, le gasoil, le fioul, le kérosène, les plastiques, les jouets, les tissus synthétiques, et bien d'autres. Le pétrole résultant d'un mélange d'hydrocarbures et d'autres composés organiques. Il est également très utilisé dans la conception de bitumes, paraffines ou encore lubrifiants. Cependant, cette ressource est très limitée. En effet, on estime un épuisement de cette énergie dans 50 ans, encore peu de temps pour satisfaire nos besoins primaires. Très polluante, sa combustion émet, en plus de cela, beaucoup de GES (gaz à effet de serre).



Figure I.1: Le pétrole.

b) Le charbon :

Le charbon qui est utilisé en grande partie pour fabriquer de l'électricité dans des centrales électriques thermiques (33,5% selon Mtaterre.fr). Résultat de la transformation de biomasse [3], le charbon est composé de soufre, d'oxygène et de carbone. Cette énergie a également un très bon rendement et permet à certains pays de produire de l'électricité, du chauffage, du carburant et un combustible pour le transport. Sa combustion émet cependant beaucoup de GES. C'est d'ailleurs l'énergie fossile la plus émettrice de CO₂.



Figure I.2: Le charbon.

c) Le gaz naturel :

Le gaz obtient la troisième place avec 24,6% d'utilisation mondiale. Le gaz naturel est composé d'hydrocarbure gazeux et ses réserves sont plus importantes que celles du pétrole. C'est l'énergie fossile la moins polluante au monde puisque ses émissions de CO₂ sont réduites. On peut la présenter aujourd'hui comme un bon complément aux énergies renouvelables. Le gaz possède un fort pouvoir énergétique qui le rend intéressant pour le chauffage et la production d'eau chaude. Cependant, il est moins facile à transporter et à utiliser que le pétrole [3].



Figure I.3 : Le gaz naturel.

d) Le nucléaire :

L'énergie nucléaire est l'énergie libérée lors des réactions de fissions ou de fusion des atomes d'uranium. C'est une énergie considérée à tort comme « propre », car même si elle émet peu de CO₂ par rapport aux autres énergies fossiles, sa production et l'extraction d'uranium polluent considérablement, contaminant notamment les terres et les rivières. De plus, si le risque d'accidents de centrales nucléaires est rare, il est bien présent, et les conséquences en sont désastreuses. La radioactivité contamine tous les écosystèmes ; nappes phréatiques, rivières, océans, terres et atmosphère. Les conséquences de l'irradiation sur la santé sont épouvantables : troubles mentaux, troubles de la croissance, malformations, brûlures, leucémie, cancers... et bien sûr la mort.

Enfin, le minerai d'uranium est présent en de trop petites quantités dans le sol pour lui permettre de se renouveler suffisamment rapidement à échelle humaine.



Figure I.4 : Centrale nucléaire [5].

I-3-3 - Les avantages et les inconvénients de l'énergie non renouvelable :

a) - Les avantages de l'énergie non renouvelable :

L'avantage de l'énergie non renouvelable est surtout remarquable au niveau de son utilisation. En effet, elle est plus efficace comparée à l'énergie renouvelable. Les carburants restent, par exemple, les plus efficaces pour alimenter les véhicules. En outre, l'exploitation et l'efficacité de l'énergie non renouvelable ne dépend pas des facteurs climatiques. Prenons, par exemple, le cas de l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable. L'installation de panneau solaire dans une région peu ensoleillée n'aura pas un rendement élevé vu que les rayons de soleil sont limités. Par contre, ce plan climatique n'aura pas un impact sur l'exploitation du pétrole [5].

b) - Les inconvénients de l'énergie non renouvelable :

L'énergie non renouvelable présente quand même certains inconvénients. L'énergie non renouvelable n'est pas écologique. En général, elle demande des transformations particulières qui entraînent des émissions de gaz à effet de serre. L'exploitation de l'énergie non renouvelable favorise ainsi l'accélération à grande vitesse du réchauffement climatique. En outre, les énergies renouvelables sont proposées à prix élevés, pour ne citer que la variation du prix du baril de pétrole. L'État n'accorde pas, d'ailleurs, des aides financières sur l'achat d'une énergie renouvelable [6].

I-4 - L'énergie renouvelable :

I-4-1 - Définition :

L'énergie renouvelable représente l'ensemble des énergies qui sont extraites de sources de nature illimitée car elle ne disparaît pas avec le temps et elles sont renouvelables tels que la lumière du soleil, le vent, l'énergie hydraulique, etc. Ce type d'énergie est souvent disponible dans la nature et à la portée des humains [7].

I-4-2 - Types d'énergies renouvelables :

I-4-2-1 - Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique utilise la force du courant qui passe à travers une centrale afin de faire tourner une turbine qui entraîne à son tour un générateur électrique qui injecte de l'électricité sur le réseau .

Contrairement à l'éolien et au solaire, l'énergie hydroélectrique est relativement peu dépendante des conditions climatiques. Selon les saisons, les débits enregistrés au niveau des

centrales sont toutefois différents. Si l'on parle peu de ce type d'énergie en Belgique, son exploitation étant moins récente que celle du vent et du soleil, elle s'avère pourtant importante à l'échelle mondiale puisqu'elle est l'origine d'un peu plus de 16% de la production d'électricité et d'environ deux tiers de la puissance électrique attribuée au renouvelable pour l'année 2013[8].

La figure en bas exprime le travail des centrales hydrauliques qui transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électrique

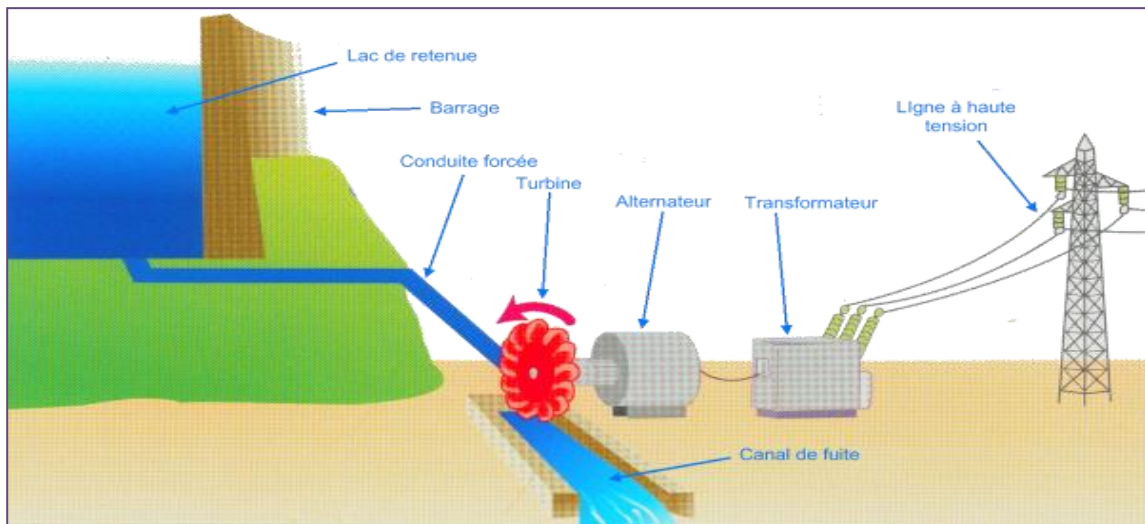


Figure I.5 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [9].

La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques :

- Les centrales dites gravitaires :

Pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation,

- Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P.) :

Aussi connues sous l'appellation centrale hydraulique à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage : pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base (nucléaire) et production d'électricité par turbinage durant la pointe, en substitution ou en complément à celle, plus coûteuse, des équipements de pointe,

- Les usines marémotrices :

Au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (dites aussi hydroliennes) ou du mouvement des vagues. Les centrales gravitaires et celles de transfert d'énergie par pompage peuvent aussi être classées en trois types selon la hauteur de la chute de l'eau : - chute haute (> 200 m)

Chute moyenne (entre 50 et 200 m), - chute basse (< 50 m). Malgré des coûts de réalisation généralement élevés, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour fonctionner longtemps et l'énergie de l'eau est gratuite et renouvelable si elle est bien gérée. Donc le bilan est plutôt positif, et les centrales hydrauliques sont parmi les systèmes de production d'électricité les plus rentables. Les impacts environnementaux varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit des barrages de taille modérée, des courants marins, des vagues, mais ils peuvent devenir importants s'il s'agit de créer des grands barrages. Dans ce dernier cas, la critique est généralement sur la disparition de terres agricoles et de villages, ainsi que la perturbation du déplacement de la faune (pas seulement aquatique) et globalement de l'écosystème environnant.

◆ Les avantages et les inconvénients de centrale l'hydraulique :

a) Les avantages :

- Source d'énergie renouvelable, production d'énergie locale.
- Contrôle des inondations, création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations.

b) Les inconvénients :

- Bloque les passes à poissons.
- Modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température).
- Dégrade la qualité d'eau (accumulation de contaminants).

I-4-2-2 - Energie géothermie :

Une énergie produite grâce à la chaleur de la terre, elle est contenue à l'intérieure de réservoir souterrains de vapeur d'eau chaude et des roches chaudes, est utilisée comme ressource générant de l'électricité, l'eau chaude ou la vapeur extraite des réservoirs géothermiques de la croute de la terre, fait tourner les turbines électriques qui alimentent les générateurs pour produire de l'électricité.

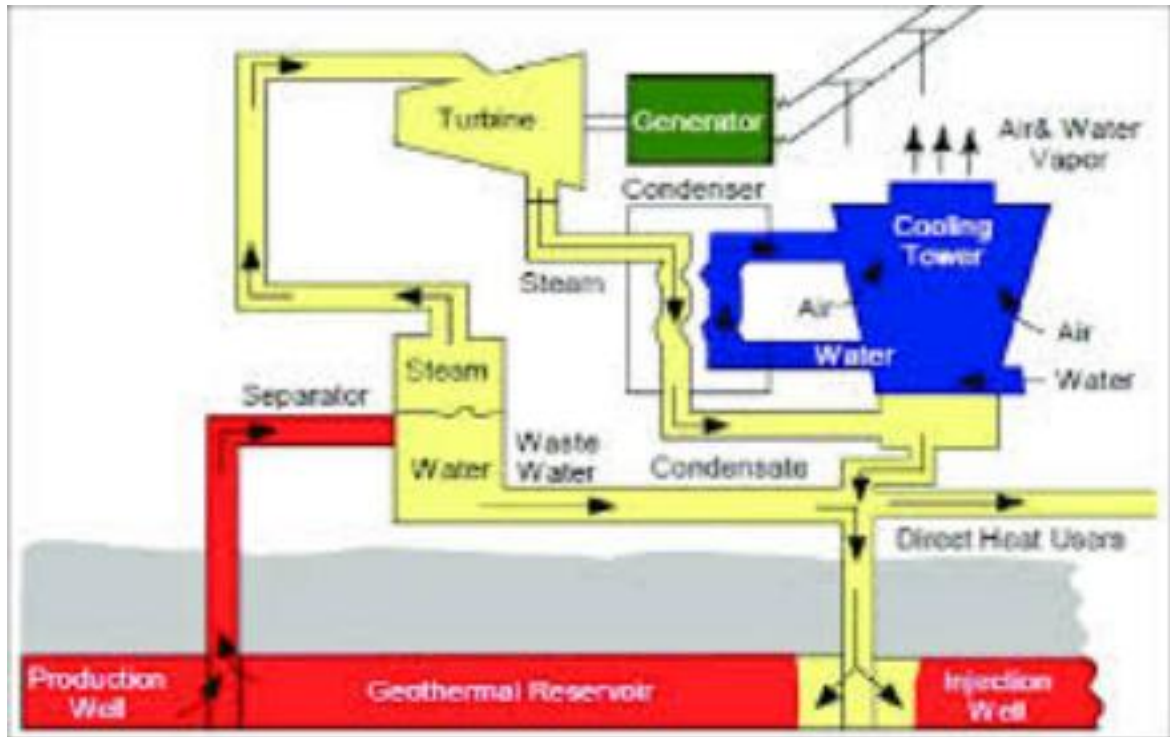


Figure I.6 : Schéma d'une installation de production d'énergie géothermique.

◆ **Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermie :**

a) Les avantages :

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse.

b) Les inconvénients :

Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul. Risques de pollution existants sont rejetés à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol.

I-4-2-3 - Energie biomasse :

Énergie produite grâce aux déchets et grâce à la combustion des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, ou après méthanisation (biogaz), et aussi après de nouvelles transformations chimiques.

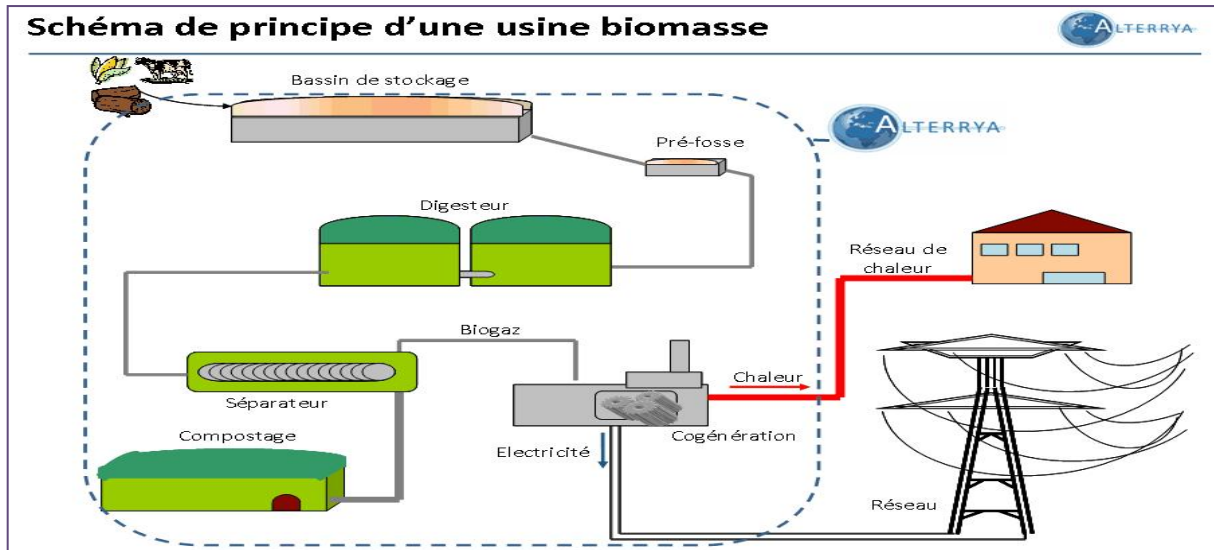


Figure I.7 : Schéma de principe d'une usine biomasse.

◆ **Les avantages et les inconvénients de l'énergie de biomasse :**

a) Les avantages :

- Matière renouvelable si elle est utilisée raisonnablement.
- Production rare de produits toxiques
- Dégagent autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe
- Énergie très rentable.
- Biomasse disponible partout.
- Peut être transformée en différentes sources d'énergie [10].

b) Les inconvénients :

- Déforestation pour avoir du bois
- Besoin de terres arables donc empiètes sur le territoire agricole
- Peut être polluante en émettant du CO et du CO₂ avec de la fumée et du goudron lors de la combustion.
- Peut-être assez coûteux et polluant pour amener la biomasse à l'usine [10].

I-4-2-4 - L'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [11].

Le SCE (Système de Conversion Éolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par

une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.



Figure I.8: Les éoliennes.

◆ Les différents types des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale.

a) Les éoliennes à axe verticale :

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonnais et le rotor de Darrieux. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue.

1 - Les avantages des éoliennes à axe verticale :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

2 - Les inconvénients des éoliennes à axe verticale :

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.

- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

b) Les éoliennes à axe horizontale :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

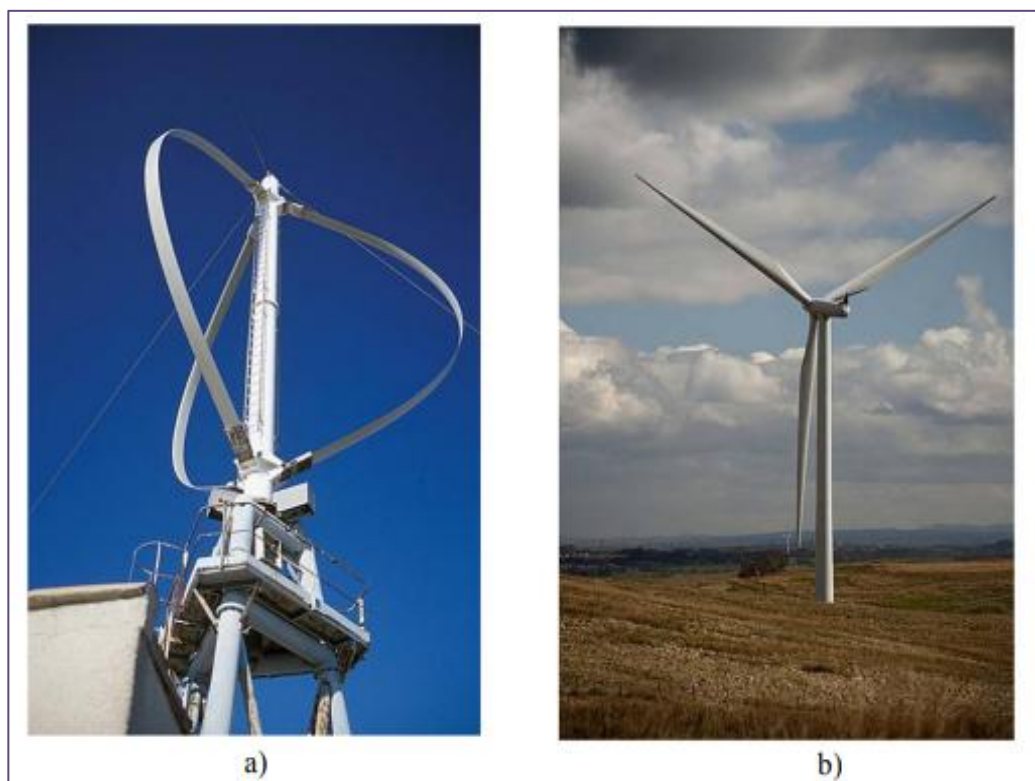


Figure I.9: Éolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b) [12].

◆ Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Les instruments de mesure de vent placés au-dessus de la nacelle conditionnent le fonctionnement de l'éolienne. Grâce aux informations transmises par la girouette qui détermine la direction du vent, le rotor se positionnera pour être continuellement face au vent. Les pales se

mettent en mouvement lorsque l'anémomètre (positionné sur la nacelle) indique une vitesse de vent d'environ 10 km/h et c'est seulement à partir de 12 km/h que l'éolienne peut être couplée au réseau électrique. Le rotor et l'arbre dit « lent » transmettent alors l'énergie mécanique à basse vitesse (entre 5 et 20 tr/min) aux engrenages du multiplicateur, dont l'arbre dit « rapide » tourne environ 100 fois plus vite que l'arbre lent. Certaines éoliennes sont dépourvues de multiplicateur et la génératrice est entraînée directement par l'arbre « lent » lié au rotor. La génératrice transforme l'énergie mécanique captée par les pales en énergie électrique. La puissance électrique produite varie en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Dès que le vent atteint environ 50 km/h à hauteur de nacelle, l'éolienne fournit sa puissance maximale. Cette puissance est dite « nominale ».

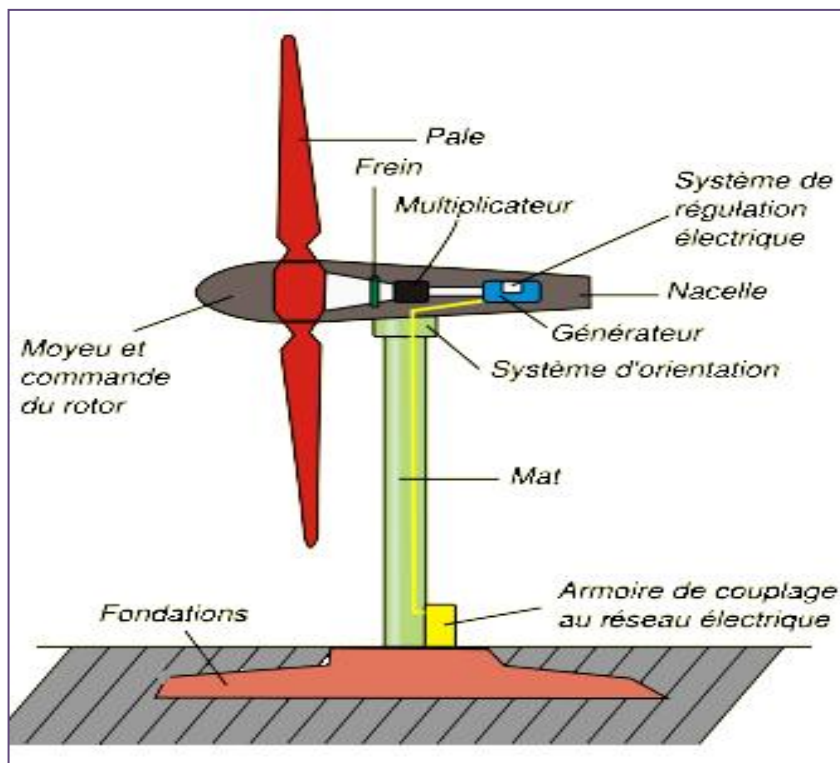


Figure I.10: Éléments constituant une éolienne à axe horizontal [13].

I-4-2-5 - Energie solaire :

Au sein de l'énergie solaire, il faut différencier le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. Le premier génère de l'électricité grâce à la conversion de la lumière du jour. Ce sont les photons, des composants de cette lumière, qui libèrent les électrons des cellules photovoltaïques présentes sur les panneaux solaires. Ces cellules sont constituées de matériaux semi-conducteurs dont le plus communément utilisé est le silicium. Le courant continu ainsi produit est transformé ensuite en courant alternatif grâce à un onduleur. Quant à lui, le solaire

thermique permet la production d'eau chaude grâce à des capteurs solaires [14].

◆ Type d'énergie solaire :

a) *L'énergie solaire thermique :*

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée), s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

Les formes d'utilisation finale de cette énergie sont :

- A basse température (30 à 100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- A moyenne température (100 à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation,...
- A haute température (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques,

Pour atteindre des températures élevées, on utilise des héliostats (miroirs orientables) dans fours solaires (comme à Odeillo en France). Plus la température à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie de transformation sont complexes et le prix élevé [14].

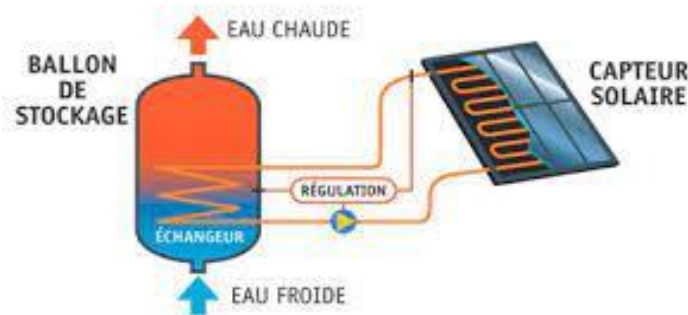


Figure I.11 : Fonctionnement de panneau solaire thermique [15].

b) *L'énergie solaire photovoltaïque :*

L'énergie photovoltaïque est la conversion directe de lumière solaire en électricité. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après son nom on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". L'énergie photovoltaïque est la manière la plus élégante de produire de l'électricité. Elle se produit sans bruit, sans parties mécaniques, et sans pollution. Donc l'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable, elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie de rayonnement solaire grâce

à une cellule photovoltaïque [16].



Figure I.12 : Centrale photovoltaïque [17].

◆ Le rayonnement solaire :

Nombre d'ondes électromagnétiques qui sont envoyées par le soleil sous la forme de faisceaux lumineux, où ces derniers contiennent des ondes qui peuvent être vues et certaines d'autres ne peuvent pas être vues, le spectre visible ayant une couleur allant du rouge au violet [18].

◆ Type de rayonnement solaire :

Les rayons solaires traversant l'atmosphère terrestre sont répartis en :

- ❖ Rayonnement direct : Ce sont des rayons qui tombent directement sans avoir aucune barrière (nuages, bâtiments ...).
- ❖ Rayonnement diffus : ce sont les rayons du soleil réfractés par les nuages.
- ❖ Rayonnement réfléchi : ce sont les rayons résultant de la réflexion de la lumière de solaire par les différents sols [19].

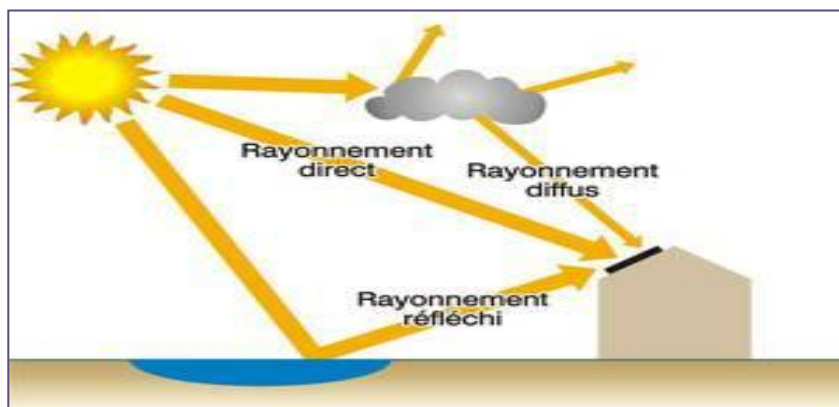


Figure I.13 : Les types de rayonnement solaire.

I-5 - Les MEMS :

I-5-1 - Historique :

Les MEMS 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 techniques plus anciennes et constituent encore une part importante du marché des MEMS . Depuis lors les MEMS ont connu un important développement et restent encore en plein essor.

C'est un domaine de recherche relativement récent qui combine l'utilisation des techniques électroniques, informatiques, chimiques, mécaniques, optiques. Les MEMS sont le plus souvent à base de silicium, mais on utilise également d'autres matériaux suivant l'adéquation de leurs propriétés physiques à certaines applications, comme les métaux, les matériaux piézoélectriques, divers polymères, etc.

Face au développement de ce domaine, on a vu apparaître des termes dérivés pour désigner des MEMS spécialisés :

- Dans le domaine optique on utilise le terme MOEMS (*Micro Opto Electro Mechanical Systems*) ou Optical MEMS ;
- Dans le domaine biologique on utilise bioMEMS.

Onnotera aussi un nouveau terme, NEMS (*Nano Electro Mechanical Systems*), Nanosystèmes en français, désignant des structures semblables aux MEMS mais de taille nanométrique [20].

I-5-2 - Définition :

Un MEMS (système micro-électromécanique) est une machine miniature qui possède des composants mécaniques et électroniques. La dimension physique d'un MEMS peut varier de plusieurs millimètres à moins d'un micromètre, une dimension bien plus petite que la largeur d'un cheveu humain, Le label MEMS est utilisé pour décrire à la fois une catégorie de dispositifs micromécatroniques et les procédés utilisés pour leur fabrication. Certains MEMS n'ont même pas de pièces mécaniques, mais ils sont classés comme MEMS parce qu'ils miniaturisent les structures utilisées dans les machines conventionnelles, comme les ressorts, les canaux, les cavités, les trous et les membranes. Comme certains dispositifs MEMS convertissent un signal mécanique mesuré en un signal électrique ou optique, ils peuvent également être appelés transducteurs. Au Japon, les MEMS sont plus communément appelés micromachines, et dans les pays européens, les MEMS sont plus communément appelés technologie des microsystèmes.

I-6 - Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes méthodes de la récupération d'énergie, les sources d'énergie, les types d'énergie et leur avantage et inconvénient. De nombreux groupes de recherche s'intéressent à la récupération de l'énergie des mouvements dans l'environnement, car même si une faible proportion seulement peut être convertie en énergie électrique. Les avantages de la récupération d'énergie sont faciles à envisager, ou l'énergie utilisée est récupérée et réutilisée au lieu d'être gaspillée, bien sûr cela engendre de grandes économies financières.

Chapitre II : Source des MEMS

II-1 - Introduction :

La technologie “MEMS”, abréviation anglaise de “Micro Electro Mechanical Systems” (systèmes micro-électro-mécaniques), est un sujet de recherche qui a suscité un vif intérêt dans plusieurs laboratoires à travers le monde. En particulier, les MEMS pour les applications RF sont issus de l'évolution des composants électroniques MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) et d'une nécessité croissante de miniaturisation et d'amélioration des performances des systèmes électroniques. En effet, depuis les années 70, les microsystèmes ont été développés pour diverses applications, telles que la métrologie sous forme de capteurs (accéléromètres, capteurs de pression,...) [21]. Au début des années 90, c'est sous l'impulsion des laboratoires de recherche de l'armée américaine que sont apparus les premiers MEMS pour des applications micro-ondes. Les très bonnes caractéristiques de ces structures jusqu'à 50 GHz supplantaient de loin celles des dispositifs à base de semi-conducteurs et ont suscité l'intérêt d'un grand nombre de compagnies et laboratoires. Aujourd'hui, les propriétés électriques et mécaniques des composants micro électromécaniques sont connues et malgré leur immaturité en terme de packaging et fiabilité, leur potentiel pour de nombreuses applications télécoms et militaires ou autre, rend l'étude et le développement de ces dispositifs très importants [22].

II-2 - Les Microsystèmes :

II-2-1 - Notion de microsysteme :

Un microsysteme est avant tout un système de petite taille incluant des capteurs, actionneurs et de l'électronique conçu pour assurer un certain nombre de fonctions, telles que perception de l'environnement (capteur), analyse et traitement des données recueillies, prise de décision, communication avec le monde extérieur, ou action sur l'environnement. Le champ des microsystèmes hybrides couvre l'ensemble des microsystèmes obtenus par assemblage de composants, de circuits et de micro dispositifs divers. En effet la fabrication d'un micro système repose sur les notions fondamentales d'intégration spatiale, de fabrication et d'assemblages collectifs des différents éléments du produit final. Les technologies de fabrication sont plus ou moins toutes dérivées de celles mises au point pour la réalisation de circuits de la micro-électronique. Ainsi, un exemple incontournable est l'accéléromètre AD-XL50 produit par Analog Devices [23]. Ce dernier équipe aujourd'hui la majorité des systèmes d'Airbag de nos voitures. Il est constitué d'un capteur micro-usiné, disposé au milieu de la puce, directement

intégré au sein l'électronique embarqué, permettant ainsi de traiter et de convertir en signaux électriques l'accélération détectée (Figure II.1).

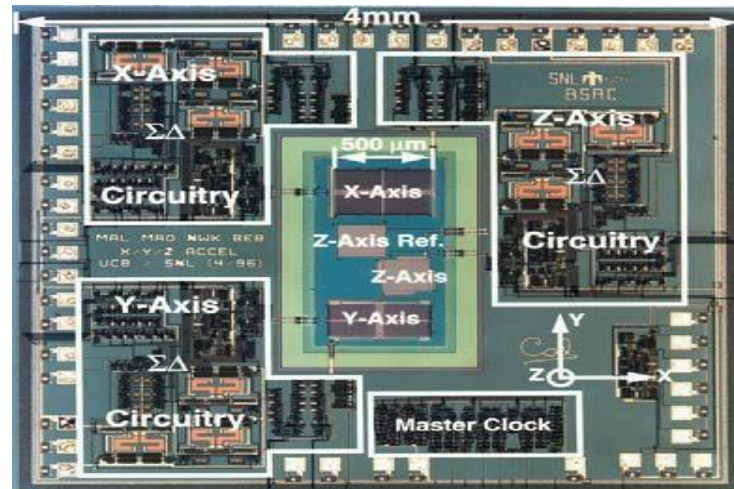


Figure II.1: Exemple d'accéléromètre AD-XL50 (3mm²). [3]

II-2-2 - Historique des Microsystèmes :

Le domaine de recherche en microsystèmes est relativement récent et combine l'utilisation des techniques électroniques, informatiques, chimiques, mécaniques, optiques. Ils sont le plus souvent à base de silicium, mais on utilise également d'autres matériaux suivant l'adéquation de leurs propriétés physiques à certaines applications, comme les métaux, les matériaux piézoélectriques, divers polymères, etc. Face au développement de ce domaine, nous énumérons les dates marquantes de l'histoire des microsystèmes.

Le Docteur Charles S. Smith découvre l'effet piézoélectrique en 1954. Conception de microsystèmes autonomes

En 1958, des jauges de contraintes discrètes sont développées et commercialisées par Kulite Semiconductors Products, Honeywell and Microsystems.

- Fin 1960, des diaphragmes de silicium sont développés pour concevoir des capteurs de pression avec une grande sensibilité.
- Années 1970 : les micromachines se démocratisent, permettant ainsi le développement d'accéléromètres, de têtes d'imprimantes à jet d'encre, etc.
- Années 80-90 : développement de quelques micro-capteurs intégrant la mesure et l'électronique de traitement du signal [24].
- Fin des années 80 : réalisation d'un micromoteur rotatif sur puce de silicium. Ce dispositif a montré la possibilité d'intégrer des actionneurs avec les procédés de la microélectronique.
- Années 90 : émergence des premiers microsystèmes dans l'industrie, sur des marchés tels

- que l'automobile ou l'informatique [25].
- Années 2000 : démocratisation des dispositifs et applications de microsystèmes intégrant des fonctions multiples : mécaniques, fluidiques, optiques et biochimiques .
- Les microsystèmes sont de plus en plus multidisciplinaires. Ils sont parfois appelés MOEMS, Bio-MEMS ou RF-MEMS selon leurs fonctions principales (optiques, biologiques, chimiques ou Radio-Fréquence).

II-2-3 - Les Micros Electro Mécanique Systèmes (MEMS) :

Un microsystème électromécanique est un microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur. Le terme microsystèmes électromécaniques est la version française de l'acronyme anglais MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). MEMS peut être défini comme un objet de petite dimension intégrant une partie électrique (et/ou électronique) et une partie mécanique qui sont en relation fonctionnelle. La partie mécanique est en liaison avec les données issues du monde physique (Figure II. 2). Elle assure la fonction de capteur, récupérateur d'énergie ou d'actionneur via des mouvements ou des déformations. La partie électrique, ou électronique, se charge de la commande ou du traitement de signal. Elle peut être connectée vers d'autres systèmes externes qui peuvent être un circuit électronique, un bus de donnée relié à un système de traitement d'information complexe ou d'autres MEMS [26].

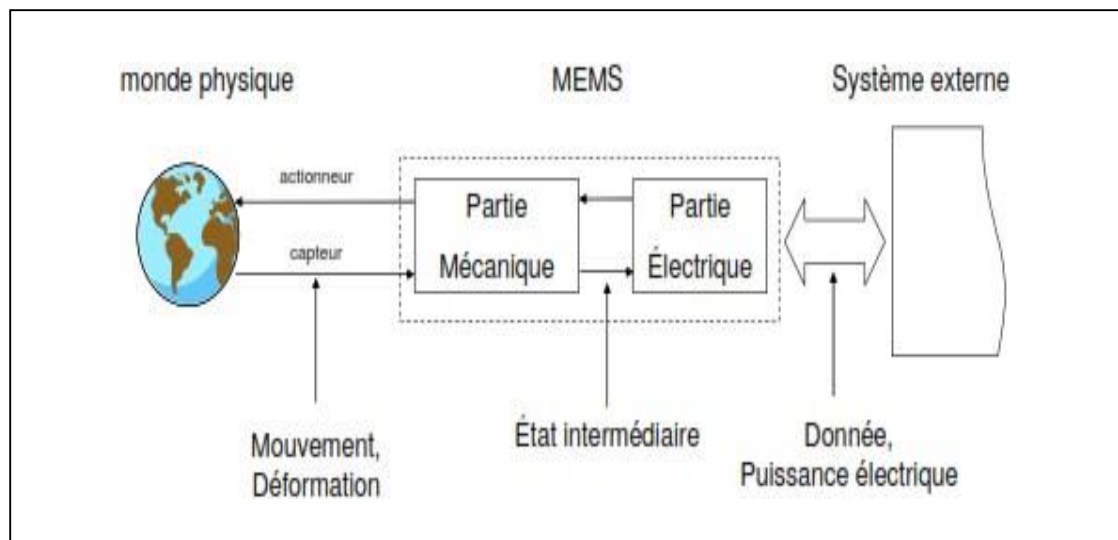


Figure II.2 : MEMS et son environnement.

La définition d'un MEMS n'est aujourd'hui plus liée à l'unique présence d'une partie électrique et mécanique. Sa définition la plus proche pourrait correspondre à un dispositif

miniaturisé qui n'est pas purement électronique (pour faire contraste au circuit intégré, microcontrôleur et microprocesseur). En effet, il y a des MEMS qui ne contiennent pas de partie mécanique en mouvement (ex : capteur de champ magnétique du type « fluxgate »), et il y a ceux qui ne contiennent même pas de partie électrique (système d'engrenage de micromachine), ou même ni l'un ni l'autre (micro mélangeur fluidique, optique intégrée). Dans le cas d'un micro actionneur, le courant circulant dans la partie électrique est converti en mouvement. Pour les micro-générateurs électriques et les micros capteurs, les mouvements ou vibrations de la partie mécanique peuvent fournir des courants électriques. Entre la partie électrique et la partie mécanique, transite un état intermédiaire, qui qualifie aussi l'affiliation du MEMS. Cet état intermédiaire pourrait être [27] :

- Du champ électrique pour les familles électrostatiques et piézoélectriques.
- Du champ magnétique pour les familles magnétiques et magnétostrictifs.
- De l'énergie calorifique pour les familles thermiques.

La combinaison des trois dans le cas des systèmes hybrides.

II-2-4 - Conception des MEMS :

La conception de microsysteme commence, comme celle de tout produit, par la définition des besoins et des fonctions que doit assurer le système à concevoir. Cette phase est alors suivie par la conception physique du composant. Les microsystemes sont constitués d'une grande diversité de composants pouvant être assemblés de différentes façons. Le choix de ces modes d'assemblage se fait durant la phase de conception. Cette phase commence par les spécifications du microsysteme à réaliser jusqu'à la fabrication du prototype [28].

Les microsystemes présentent un fort caractère pluridisciplinaire car ils intègrent différentes technologies liées à l'électronique, la mécanique, l'énergétique, l'automatique, etc. Cette hétérogénéité est une source de complexité. En effet, le couplage des divers domaines implique des difficultés de représentation et de caractérisation et même en conception.

II-2-5 - Les différents secteurs des MEMS :

Les avancées autour de la micro-technologie de réalisations des MEMS (basées sur le principe de la photolithographie) ont engendré une explosion des applications et une segmentation du domaine. On trouve quatre familles associées à leurs cadres applicatifs (Figure II.3) [29].

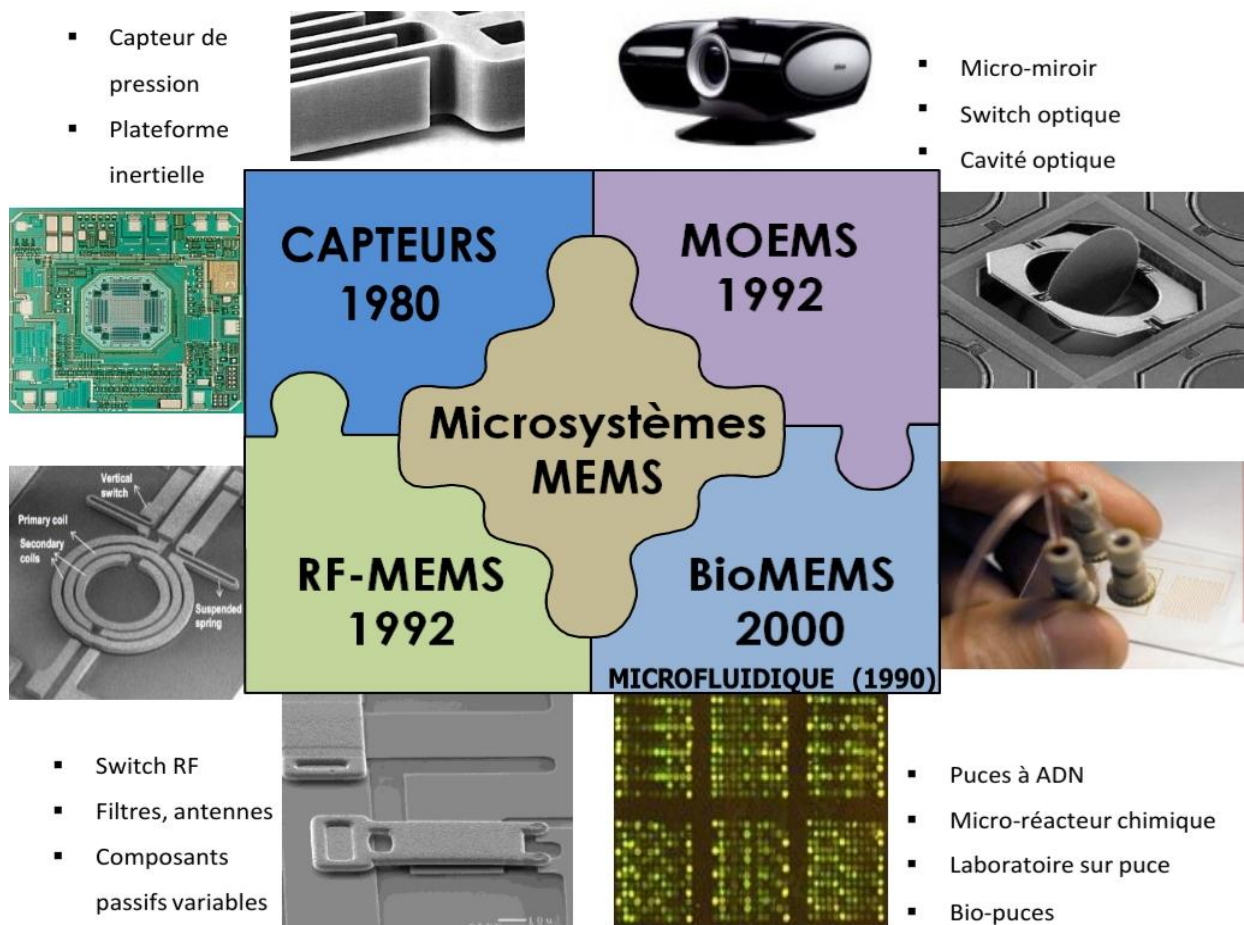


Figure II.3 : Les quatre secteurs des MEMS.

II-3 - Source des MEMS :

II-3-1 - Piézoélectrique :

II-3-1- 1 - Découverte de l'effet piézoélectrique :

La première démonstration de l'effet piézoélectrique direct est due à Pierre et Jacques Curie en 1880 [30]. À cette époque, les deux frères, âgés respectivement de 21 et 25 ans, sont tous deux préparateurs à la faculté des sciences de Paris. Combinant leurs connaissances de la pyroélectricité et de la structure cristalline, ils prédisent et vérifièrent l'existence de la piézoélectricité sur des cristaux de quartz, de tourmaline, de topaze, de sucre et de sel de Rochelle. L'existence de l'effet inverse sera prédite l'année suivante par Gabriel Lippmann sur la base de calculs thermodynamiques et immédiatement vérifiée par les Curie [31]. C'est également en 1881 que Wilhelm Hankel suggère l'utilisation du terme piézoélectricité du grec « piezin » signifiant *presser, appuyer* [32].

La piézoélectricité resta une curiosité de laboratoire pendant une trentaine d'années ; elle donna surtout lieu à des travaux théoriques sur les structures cristallines présentant cette propriété. Ces travaux aboutirent en 1910 à la publication par Woldemar Voigt du *Lehrbuch der Kristallphysik* qui donne les vingt classes cristallines piézoélectriques, et définit rigoureusement les constantes piézoélectriques dans le formalisme de l'analyse tensorielle. D'un point de vue pratique, la piézoélectricité ne fut utilisée que pour réaliser quelques instruments de laboratoire. Les frères Curie firent construire dès 1885, un instrument de laboratoire utilisant ses propriétés : la balance à quartz piézoélectrique. Pierre et Marie Curie l'utiliseront en 1900, pour mesurer la radioactivité des sels d'uranium, le radium et le polonium. Le succès de ces projets suscita un grand intérêt pour la piézoélectricité, relança les recherches et conduisit à travers les années qui suivirent au développement de nouveaux dispositifs pour une large palette d'applications dans la vie quotidienne, l'industrie et la recherche. L'amélioration du phonographe ou le développement du réflectomètre et du transducteur acoustique, largement utilisé pour les mesures de dureté ou de viscosité, en sont des exemples. Pendant cette période, les principaux matériaux utilisés sont le quartz, le sel de Seignette et le dihydrogène phosphate de potassium KH_2PO_4 . Or, s'ils peuvent être utilisés, ces matériaux présentent toutefois des inconvénients qui limitent à la fois les applications possibles et l'élaboration de théories de la piézoélectricité.

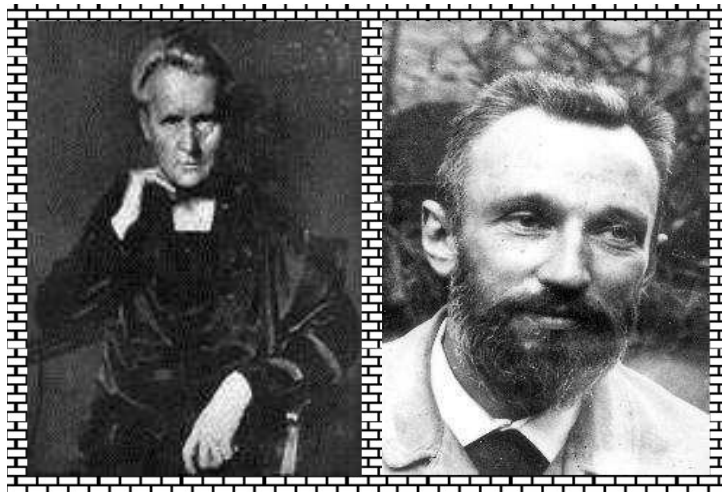


Figure II.4 : Jacques et Pierre Curie, découvreurs de l'effet direct de la piézoélectricité ; mise en évidence de l'effet indirect de la piézoélectricité

II-3-1-2 - Définition :

La piézoélectricité (du grec $\pi\acute{\epsilon}\zeta\epsilon\iota\nu$, *piézein* presser, appuyer) est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et

réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique *direct* ; le second effet piézoélectrique *inverse*. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz. Dans un allume-gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles : c'est une application de l'effet direct. De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs (capteur de pression...) tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nano manipulateur...).

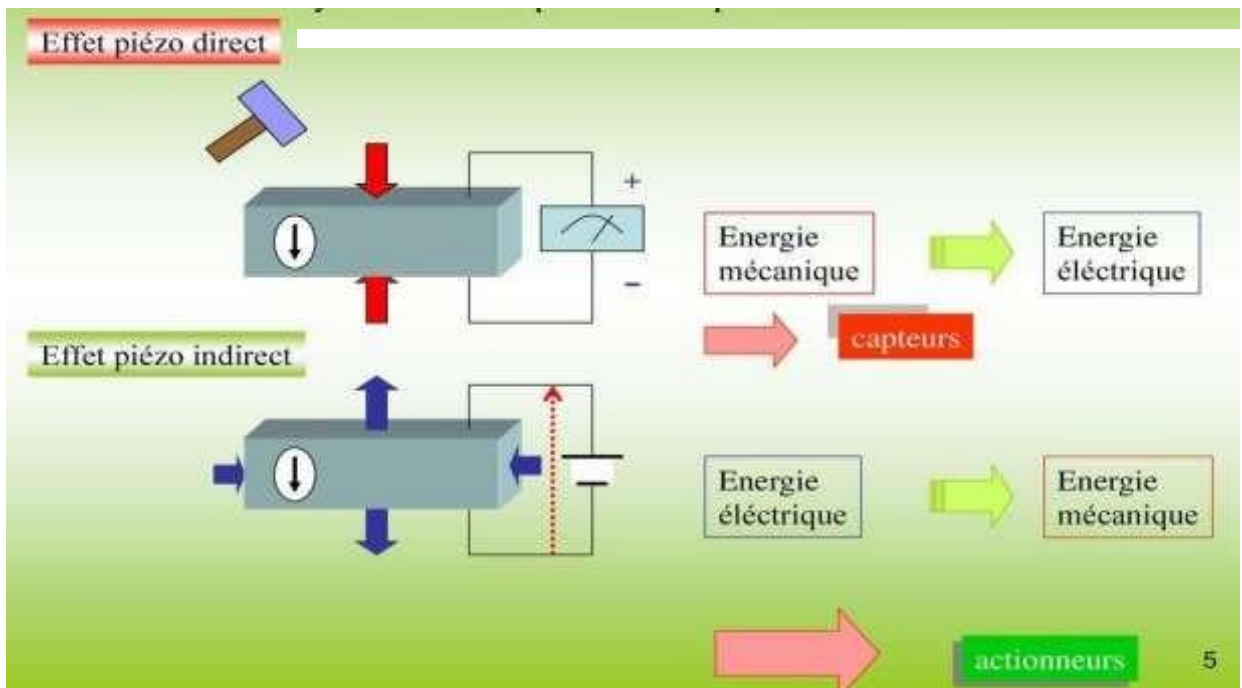


Figure II.5 : Représentation de l'effet direct et inverse.

Le QUARTZ	La TOPAZE	La TOURMALITE	La BERLINITE
			

Figure II.6 : quelques matériaux piézoélectriques.

II-3-1-3 - Domaines d'applications des matériaux piézoélectriques :

Il est possible de distinguer trois grandes classes d'applications des matériaux piézoélectriques selon qu'il s'agisse de l'effet piézoélectrique direct et/ou inverse qui est mis en jeu, Tableau (II.3), [33].

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

Tableau II.1 : Applications des matériaux ferroélectriques en fonction de l'effet.

II-3-1-4 - Les matériaux piézoélectrique :

Tous les matériaux ne possèdent pas les caractéristique indispensables pour être piézoélectriques.

La propriété diélectrique est la première des conditions nécessaires : le matériau possède pas de charges électriques pouvant se déplacer à l'échelle macroscopique, dans le langage courant il est qualifié d'isolant, dans un premier temps, la classification des matériaux piézoélectriques sera donc les lois physiques régissant leur comportement sont également rappelées.

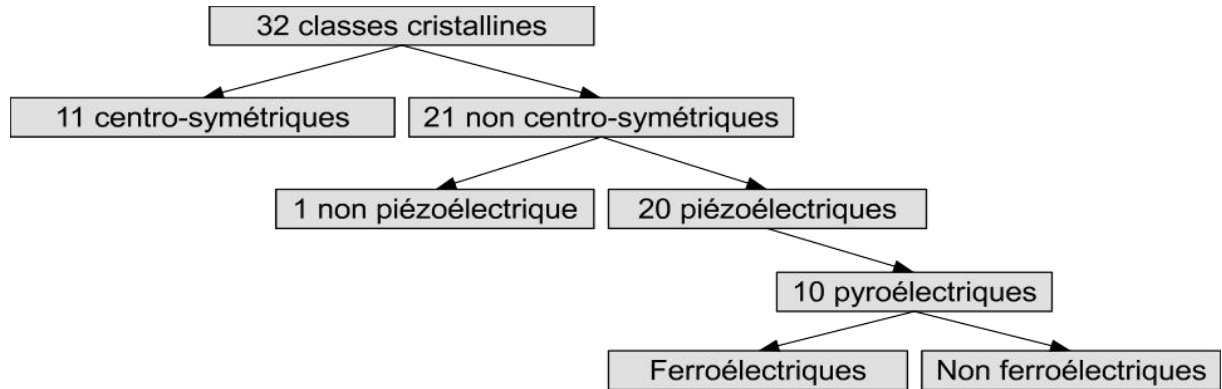


Figure II. 7: Propriétés des classes cristallines [34].

◆ **Types et synthèse des matériaux piézoélectriques:**

Les matériaux piézoélectriques sont synthétisés sous différentes formes en utilisant différentes techniques :

a) Les céramiques : ce sont généralement des solutions solides de structure pérovskite dans un système binaire ou ternaire. Actuellement des raisons environnementales, des recherches intensives sont axées sur l'élaboration des solutions solides sans plomb de structure pérovskite ayant des propriétés comparables à celles de PZT. [35]

b) Les polymères : l'effet piézoélectrique dans le polymère synthétique, Polyvinylidène Difluorure (PVDF) $(-CH_2-CF_2-)_n$ et ses dérivés sont couramment utilisés dans l'industrie [36].

c) Les cristaux : ce sont généralement des oxydes ferroélectriques qui possèdent des structures en domaines. On distinguera alors les monocristaux mono domaines et Poly domaines selon qu'une ou plusieurs directions de polarisation coexistent dans le cristal. Les propriétés d'un monocristal piézoélectrique sont optimisées en jouant sur la composition chimique, l'orientation cristallographique et la structure des domaines ferroélectriques. Les coefficients piézoélectriques les plus élevés sont obtenus pour les cristaux poly domaines de BTNN $(BaTiNaNbO_3)$, $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO_3$, $(PMN_{1-x}PT, x=0,35)$ et $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO_3$ $(PZN_{1-x}PT, x=0,08)$ de symétrie rhomboédrique orientés suivant la direction [001]. [37]

d) Les composites : ce sont des céramiques massives divisées et plongées dans une matrice non piézoélectrique (une résine). Ces matériaux possèdent des performances plus intéressantes, par rapport, à leurs meilleurs coefficients de couplage électromécaniques couplés avec leurs impédances acoustiques plus adaptées permettant une bonne résolution en imagerie médicale. [35]

II-3-1-5 - Les avantages et les inconvénients de piézoélectrique :

a) *Avantage des matériaux piézoélectriques :*

- Densité énergétique importante
- Grand bande passante
- Haute fréquences
- Faible puissance de mise en action

b) *Inconvénients des matériaux piézoélectriques :*

- Tensions limitées
- Equipement auxiliaire nécessaire
- Matériaux fragiles
- Variations de température limitées

II-3-2 - Les matériaux magnétostrictifs :

II-3-2-1 - Définition :

Les alliages magnétostrictifs sont au champ magnétique ce que les piézoélectriques sont au champ électrique. Sous l'effet d'un champ magnétique, un barreau de fer s'allonge tandis qu'il subit une striction dans le sens transversal. Inversement, l'effet Villari correspond à l'aimantation du barreau sous l'effet d'un allongement. Selon la géométrie considérée, il est aussi possible d'exploiter des déformations en flexion ou en torsion. Seuls les alliages de Fer et de Terres rares, tel que le Terfenol-D, permettent d'obtenir des déformations importantes, de l'ordre de 1000 à 2000 ppm, soit 10 à 50 fois supérieures à celles obtenus avec les métaux. Bien que ces déformations soient légèrement plus importantes que celles obtenues avec les piézoélectriques, elles sont plus difficiles à mettre en jeu du fait de la perméabilité relativement faible des matériaux (4 dans le cas du Terfenol-D). Ces alliages pourraient être intéressants dans la réalisation de moteurs à effort élevé et faible vitesse.

II-3-2-2 - Les applications :

a) *Capteur magnétostrictif :*

Les matériaux ferromagnétiques exposent un effet magnétostrictif inverse qui se traduit par la modification de la susceptibilité magnétique en présence de contraintes mécaniques dans le matériau. C'est cet effet inverse que l'on va aussi exploiter dans les capteurs de déplacement. Le transducteur magnétostrictif comporte un solénoïde à l'intérieur duquel se trouve placé un barreau en matériau ferromagnétique, le tout étant enfermé dans un cylindre

assurant la fermeture du circuit magnétique. Une magnétisation statique du matériau est obtenue au moyen d'un aimant permanent solidaire du mouvement à enregistrer.

L'électronique associée génère une impulsion qui va se déplacer dans le guide d'onde constitué par le barreau ferromagnétique et être perturbée par le champ induit par l'aimant qui se déplace. L'analyse de l'onde réfléchiée en bout du barreau va permettre d'identifier la position de l'aimant.

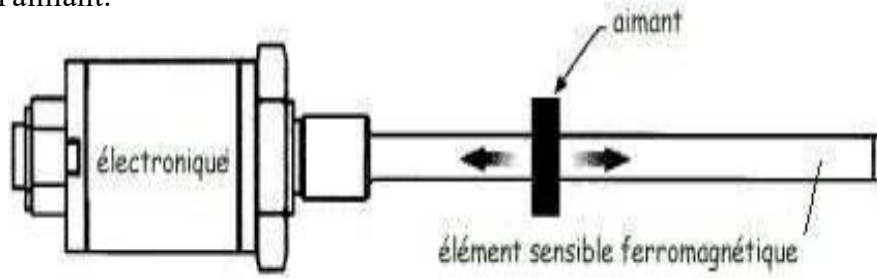


Figure II. 8 : Un capteur magnétostrictif.

Les matériaux ferromagnétiques employés peuvent être le fer, le nickel, ou des alliages aluminium-fer (alfenol) ou nickel-cobalt, bien que le matériau le plus couramment utilisé soit le Terfenol-D, du fait de ses bonnes performances magnétostrictives. Ce type de capteur permet des courses importantes (parfois jusqu'à 2 m) et supporte des pressions élevées. On l'emploie préférentiellement dans les vérins hydrauliques. Les capteurs de position magnétostrictifs offrent tous les avantages des principes magnétostrictifs : mesures effectuées sans contact (aucun contact en effet entre le barreau ferromagnétique et l'aimant permanent), donc sans usure mécanique, reproductibilité maximum, durée d'utilisation maximum, mesure absolue.

b) Les actionneurs :

Un actionneur constitue le composant actif mécaniquement d'une chaîne d'asservissement d'une grandeur contrôlée par le déplacement d'une pièce. Les actionneurs à mouvement longitudinal ou transversal sont le plus souvent à base d'empilements piézoélectriques en PZT. Cependant, les actionneurs magnétostrictifs constitués à partir d'éléments en Terfenol-D présentent pour de basses tensions électriques, sans amplification hydraulique ou mécanique, des grands déplacements (20 à 550 μm) et des forces importantes (500 à 10000 N). Un actionneur magnétostrictif à mouvement longitudinal comporte un barreau de Terfenol-D, un enroulement de commande, parfois un

aimant permanent polarisant et un ressort de précompression (> 5 MPa) de l'élément actif. Cette précompression est nécessaire pour que la magnétostriction soit forte et que le barreau reste en compression durant le fonctionnement. En effet, le Terfenol ne supporte que des contraintes maximales de tension 10 à 25 fois plus faibles que celles de compression. L'amplitude du mouvement généré par un tel actionneur dépend de l'intensité du champ magnétique appliqué, de la réaction de la charge et de la précompression. Par exemple, pour un actionneur de puissance comportant un cylindre de Terfenol-D de diamètre 20 mm et de longueur 500 mm le déplacement atteint au maximum 550 μm avec une charge de 2 kN pour un champ de 75 kA/m et une précompression de 9,5 MPa. Pour une charge de 4 kN et une précontrainte de 25,5 MPa, le déplacement est de 380 μm avec un champ de même intensité. Il est égal à 120 μm pour une force utile de 7 kN avec un champ et une précompression identiques aux valeurs précédentes. Cet actionneur est capable de générer une force utile dynamique de 9 kN environ à 400 Hz pour une fréquence d'un champ appliqué sinusoïdal égale à 200 Hz, la résistivité du Terfenol-D étant voisine de 60 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}$.

c) Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques :

Un résonateur magnétostrictif peut être utilisé comme transducteur émetteur ou récepteur d'ondes élastiques. C'est dans le domaine des projecteurs ultrasonores basse fréquence (500 Hz par exemple) pour applications sous-marines que le Terfenol-D présente des avantages importants par rapport aux céramiques piézoélectriques PZT [$\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$]. La puissance crête ultrasonore que peut émettre un transducteur sans détérioration des performances est limitée par d'une part l'énergie volumique élastique de rupture ou de seuil de non-linéarité élastique du matériau, d'autre part l'énergie volumique magnétique maximale que supporte le matériau sans dépolarisation et non-linéarités magnétiques excessives. Cette puissance émise maximale par unité de volume du matériau actif est 10 fois plus élevée pour le Terfenol que pour les céramiques piézoélectriques PZT [38].

II-3-2-3 - Principaux Phénomènes de magnétostriction :

L'on a coutume de classer les phénomènes de magnétostriction suivant leur aspect extérieur, sans tenir compte de leurs causes profondes. On distingue les effets directs, où l'application d'un champ magnétique (ou la variation de ce champ) produit une modification d'un paramètre mécanique, et les effets inverses, où la variation d'un paramètre ou d'une constante mécanique d'un matériau produit une modification de son

aimantation, que ce matériau soit ou non plongé initialement dans un champ magnétique.

II-3-3 - Triboélectricité :

II-3-3-1 - La triboélectricité :

La triboélectricité (du grec *tribein* qui signifie « frotter » et *ēlektron* qui signifie « ambre » et est la racine du mot électricité) désigne le phénomène électrostatique créé par la mise en contact de deux matériaux de nature différente : une partie des électrons de la surface de contact d'un des deux matériaux est transférée à l'autre et ce transfert subsiste lors de la séparation. L'effet triboélectrique peut être augmenté par apport d'énergie mécanique en frottant les matériaux l'un contre l'autre [39].

Deux corps frottés l'un contre l'autre deviennent chargés électriquement. Dépendant de leurs natures, l'un devient chargé positivement, l'autre négativement [40].

II-3-3-2 - Chargement des matériaux par triboélectricité :

a) Charge par effet triboélectrique :

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. La figure (II.9) présente un dispositif de charge par effet triboélectrique utilisé dans l'évaluation de l'aptitude d'un textile fibreux à se charger par frottement et à atteindre des potentiels de surface plus ou moins importants. Cette évaluation permet de prévenir la manifestation des courants de décharge [41]

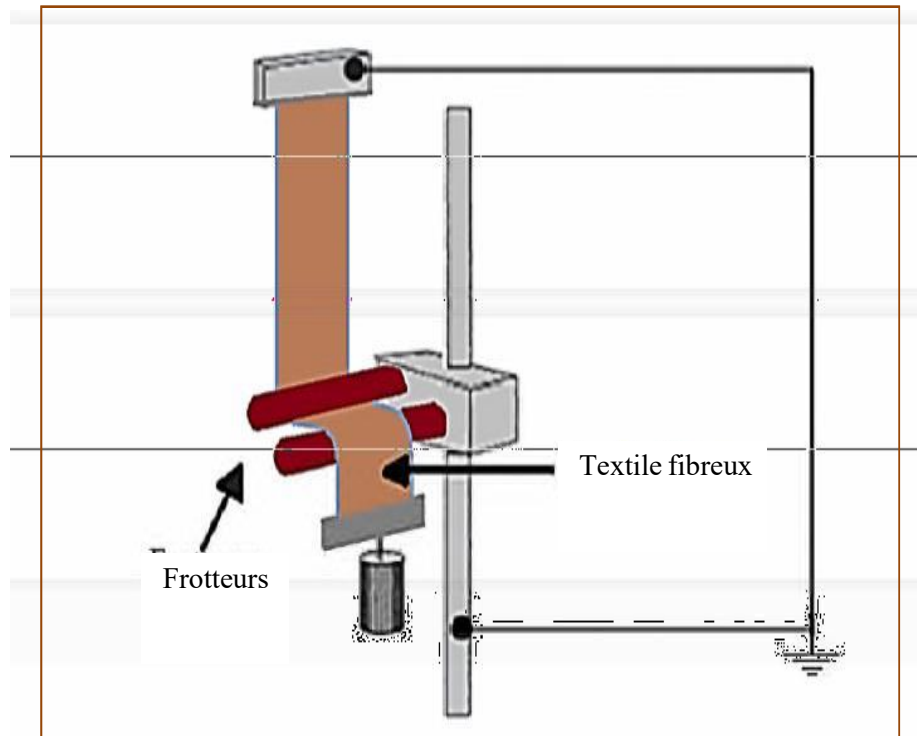


Figure II .9 : Dispositif de charge par effet triboélectrique[41].

La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou séries dites triboélectriques (figure II.10), auxquelles on prête la valeur d'indice : plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car il diffère souvent d'un auteur à l'autre ; en effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable. Cette particularité de l'électricité statique, le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant et est un élément de plus qui peut permettre de comprendre les mécanismes électrostatiques. Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie... En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue [42].

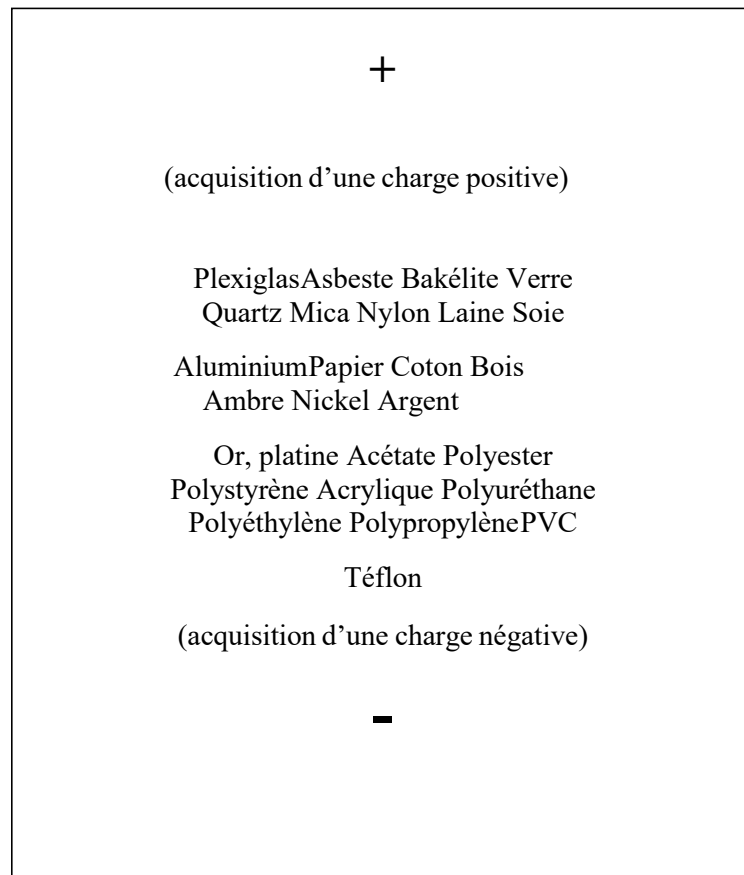


Figure II.10: Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique.

b) Dispositifs de chargement triboélectrique :

- Chargement par ventilateur :

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure II.11.) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube. Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu. Notons ici que le matériau du cylindre joue un rôle important dans ce mécanisme de charge et peut être choisi judicieusement en fonction du mélange à traiter, car le nombre de collisions entre particule-paroi est important à cause de la force centrifuge qui tente de projeter les particules entre les parois du dispositif [43].

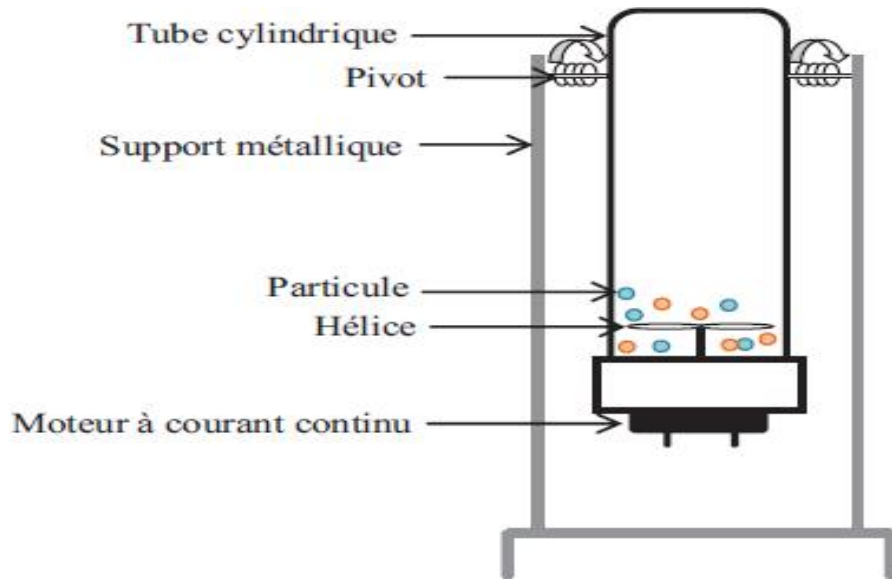


Figure II.11: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur.

- *Chargement par cyclone :*

Le dispositif est un cylindre isolant (figure II.12), y compris un ventilateur dont le rôle est de souffler les particules à charger à l'intérieur du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne. La majorité de la charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi [44].

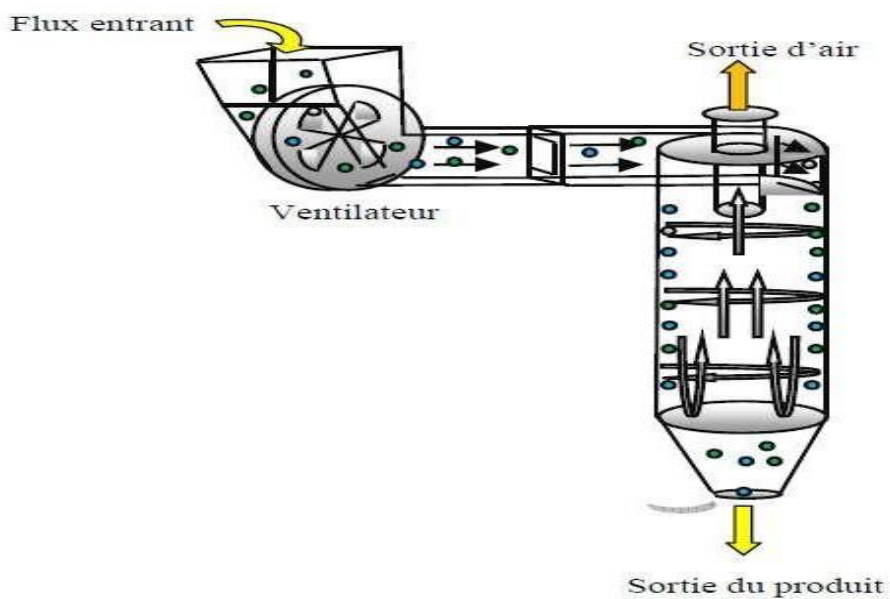


Figure II.12 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone[44].

- Chargement statique :

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure II.13:),y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois [44].

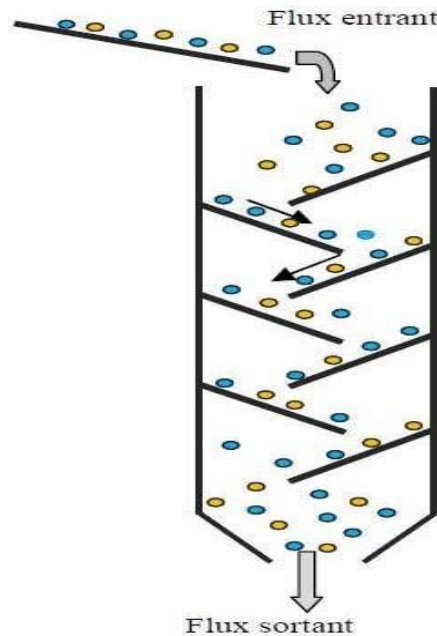


Figure II.13: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique[44].

- Chargement à lit fluidisé :

Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (un disperseur en tamis isolant), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles. C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (figure II.14). On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant.

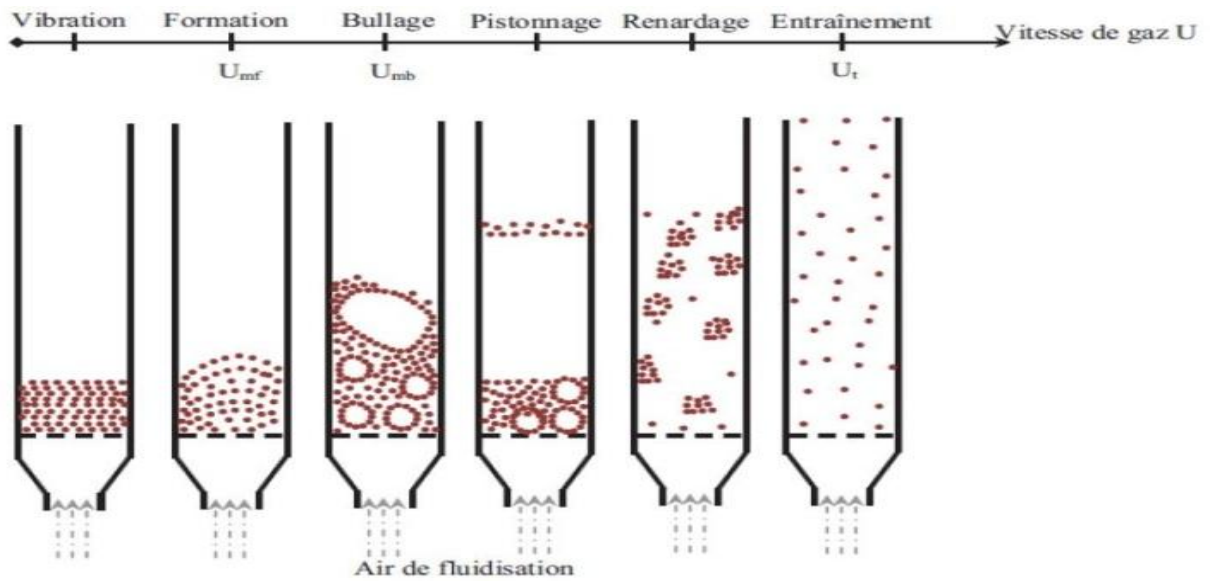


Figure II.14 : Les régimes du lit fluidisent en fonction de la vitesse de fluidisation.

. *Chargement par vibrations :*

Une autre solution pour charger les particules est obtenue par le dispositif à vibrations (Figure II.16). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire selon les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif [43].

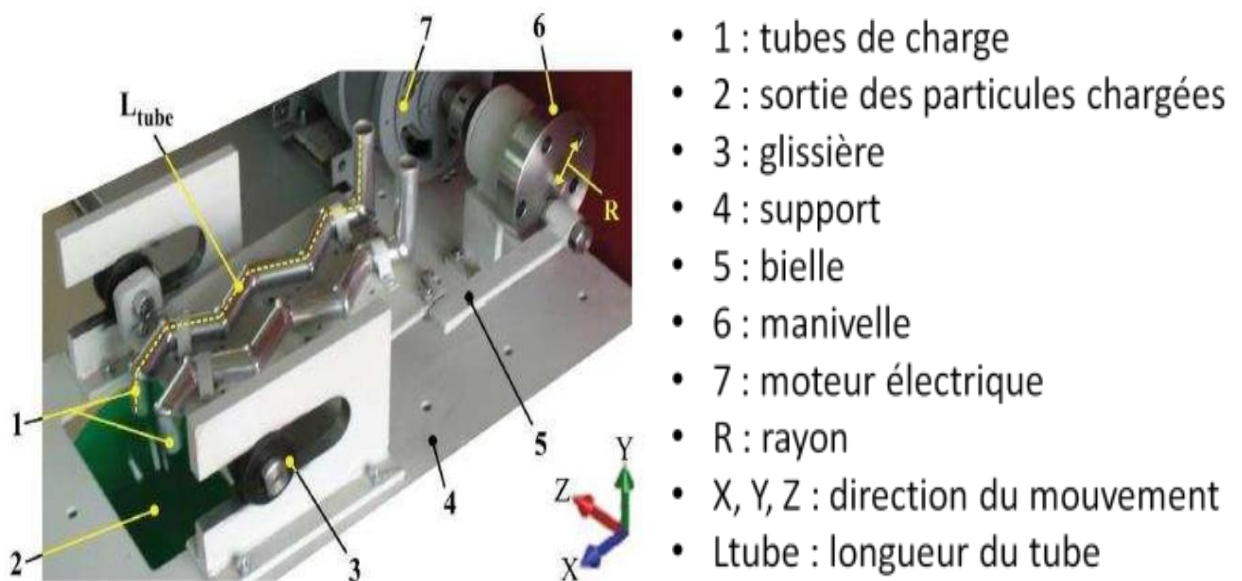


Figure II.15 : Dispositif à vibrations.

- **Chargement tribo-aéro-électrostatique :**

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante comprend deux partie (Figure II.15) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mis les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigés vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [44].

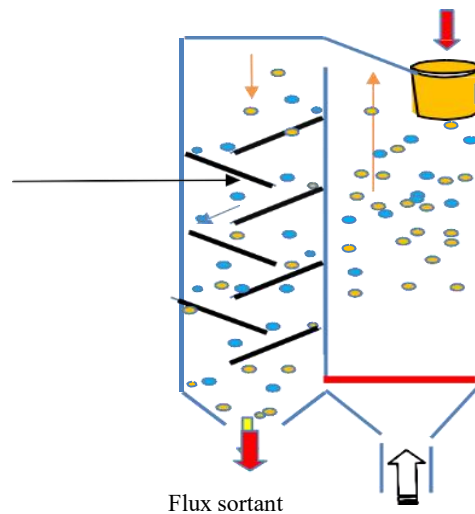


Figure II.116 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique.

La vibration : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.

La formation : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.

Le bullage : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.

Le pistonnage : en excès au-delà d' U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.

Le renardage : les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.

L'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement [44].

- **Chargement à tambour tournant** :

Différents dispositifs ont été imaginés pour améliorer l'effet de la charge et éliminer les agglomérats. En faisant tourner un tambour équipé d'ailettes au niveau de sa surface intérieure (Figure II.17), il pourra fournir non seulement une plus grande probabilité de collisions particule-particule, en raison de l'agitation, mais aussi une plus grande surface de contact pour les collisions particule-paroi par rapport au modèle à surface interne lisse [43].

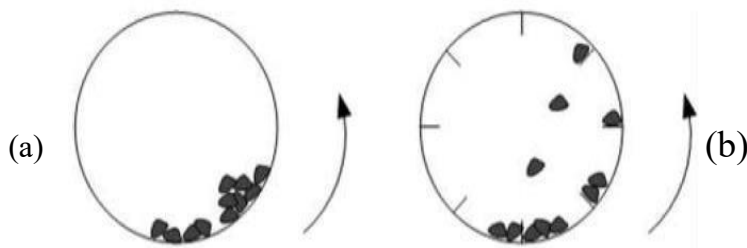


Figure II.17 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par tambour tournant (a)Lisse, (b) à ailettes.

II-4 - Le polymère :

II-4- 1 - Historique :

Le premier polymère entièrement synthétique, la Bakélite, a été synthétisé la première fois en 1909 par L. Baekeland. Il faut attendre 1922 pour que H. Staudinger découvre que les polymères étaient des macromolécules composées d'unités monomériques liées entre elles par des liaisons covalentes. Il existe des polymères naturels comme l'ambre, l'ADN et les protéines .Le développement industriel de la science macromoléculaire a été accéléré par la seconde guerre mondiale et a connu une très forte évolution depuis les années 60. Il existe actuellement plusieurs centaines de polymères différents et leur domaine d'application s'étend de la microélectronique à la médecine en passant par l'aéronautique et spatiale.L'utilisation

des matériaux polymères nous offre de grands avantages. Par exemple dans le cas d'un câble haut tension, ils sont moins polluants et plus économiques par rapport aux papiers imprégnés et surtout leur principal avantage est leur facilité de production. L'objectif de ce chapitre est de donner des généralités sur les polymères et également les définitions des différentes structures de ces derniers.

II-4- 2 - Définition d'un polymère :

Le mot « polymère » vient du grec « poly » signifiant plusieurs et « meros » parties ou unités. En effet , un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomères .Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales(polymères) représente le degré de polymérisation. Si ce degré est élevé, on parle de hauts polymères par contre s'il est faible, le composé est une oligomère, Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple :polyéthylène, poly(acide glycolique)...etc, Une macromolécule est caractérisée par sa masse molaire (m), qui est en rapport avec le degré de polymérisation (x) représentant le nombre d'unités de la répétition dans la macromolécule par la relation simple.

II-4- 3 - Différents types de polymères : Il existe deux types de polymères :

a) Les monomères :

Les monomères sont les unités chimiques de base, ou molécules des matières plastiques. Ils sont construits autour des atomes de carbone (C), et contiennent des atomes d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), chlore (Cl), soufre (S), fluor (F). [45].

b) Les polymères :

Les plastiques désignent une famille de produits constitués de polymères (ou macromolécules) caractérisés par la répétition d'un très grand nombre de fois, de monomères. Cet assemblage crée un „„motif““ appelé motif constitutif.

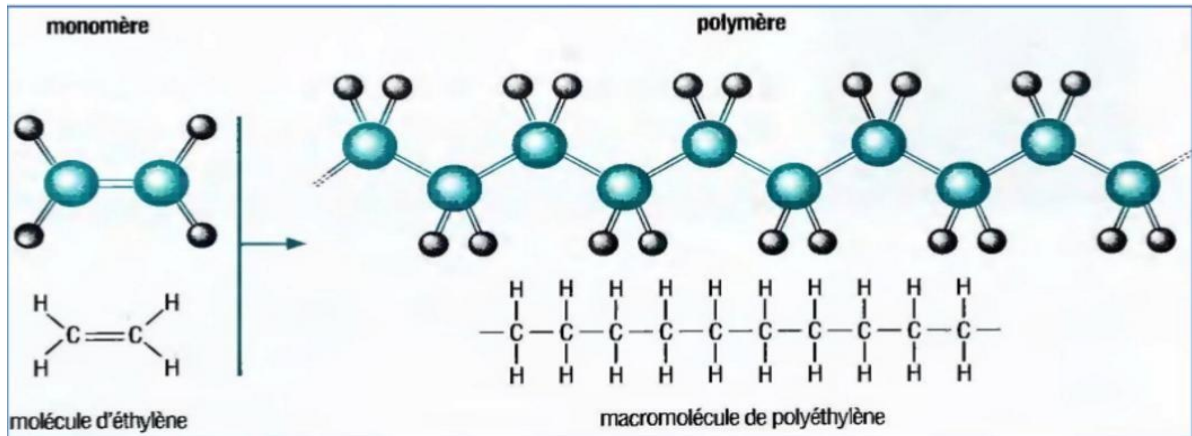


Figure II.18: Représentation d'un polymère (Polyéthylène). [46]

II-4 -4 - Domaine d'utilisation des polymères :

Les polymères ont envahi tous les domaines de notre vie quotidienne. Ils sont la base de plusieurs matériaux et sont utilisés dans différents domaines, tels que : vêtements, fibres textiles naturelles et synthétiques, mousses isolantes, colles, vernis, seaux, vaisselle, cannes à pêche, coques de bateaux ; moyen de transports et en particulier l'automobile (carrosserie habillage intérieur, réservoirs d'essence,...) ; emballage alimentaire (bouteilles, pots de yaourt, ...) ou industriel (flacons de détergents, sachets et sacs, ...) , industrie électrique et électronique (boîtiers, gainage de câbles, façades de téléviseurs) , industrie chimique (tuyauteries, cuves, revêtements) ; bâtiment-travaux publics (peintures, isolation, revêtement de sol, tuyauteries) ; agriculture (arrosage, serres, bâches); hygiène (verres de lunettes, lentilles de contact, prothèses, matériel hospitalier).[47]

II-4-5 - Classification des polymères :

Les polymères peuvent être classés selon divers critères qui ne s'excluent pas les uns des autres. On peut classer les polymères en trois groupes :

- Selon l'origine :

Les polymères naturels : on est entouré de polymères naturels, tels que la cellulose le caoutchouc et les résines;

Les polymères artificiels : dérivés des polymères naturels : nitrate et acétate de cellulose, ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre)

Les polymères synthétiques : produits dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation

- Selon les propriétés :

Une des propriétés mises en cause est l'influence d'une élévation de température. Une autre est le comportement élastique. Il en résulte qu'on distingue trois grandes familles : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

❖ **Les thermoplastiques** : sont malléables et fusibles à températures élevée. Les plus courants sont le polyéthylène, le plexiglas, les textiles de type nylon.

Chauffés, ces plastiques fondent, se vaporisent et brûlent

❖ **Les thermodurcissables** : se solidifient à température élevée et gardent leur forme lorsque celle-ci décroît. Les plus utilisés sont le polyuréthane, les résines phénoliques. Exposé à la chaleur, ces plastiques, ne fondent pas ; ils se décomposent en dégageant des produits volatiles accompagnés de résidus carbonisés

❖ **Les élastomères** : ils comprennent, le caoutchouc naturel, le caoutchouc synthétique et le caoutchouc de silicones. Tous doivent subir dans leur préparation une vulcanisation qui a pour but de diminuer leur plasticité et d'augmenter leur élasticité. Les caoutchoucs synthétiques sont en général plus résistants au vieillissement et plus imperméables aux gaz et à la vapeur d'eau. Ils résistent mieux aux solvants et leur composition est plus constante

- Selon l'importance économique :

Pour les polymères comme pour tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

- Les polymères de grande diffusion, dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Exemples : Polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polychlorure de vinyle (PVC).

- Les polymères à hautes performances, dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés. - les polymères techniques, dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes. Exemples : polyamides (PA), polyéthylène téréphtalate (PET).

II-5 - Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons représenté les sources des MEMS, alors il est possible l'utiliser dans plusieurs domaines et dans différentes applications. Quelques chercheurs disent que les possibilités pour des applications MEMS sont infinies grâce à son adaptabilité avec des autres systèmes.

Chapitre III : Modélisation et simulation.

III-1 - Introduction :

Si aujourd'hui les matériaux piézoélectriques de titano-zirconate de plomb PZT trouvent une large application, c'est grâce à leurs remarquables propriétés diélectriques et à leur couplage électromécanique ainsi qu'à leur bon rapport : Propriétés fonctionnelles, Prix de revient. [48] Les matériaux polyuréthane (PU) ayant une large gamme de propriétés polyvalentes, y compris des valeurs esthétiques agréables, trouvent de nombreuses applications essentielles dans des secteurs importants tels que le confort, l'automobile, la construction de bâtiments, la chaussure, le revêtement, les voyages spatiaux, l'industrie, les produits de consommation, l'emballage, les adhésifs et autres. Contrairement au thermoformage polymères dérivés de leurs monomères, un large éventail de matériaux peut être produit pour répondre aux besoins d'applications spécifiques. Les caractéristiques des alliages à mémoire de forme AMF proviennent du fait qu'ils ont deux phases cristallographiques, appelées par analogie aux aciers phase martensitique et phase austénitique. Le passage d'une phase à une autre se fait soit par changement de température, soit par application d'une contrainte.

III-2 - Piézoélectrique :

III-2-1 - Définition :

Etymologiquement, le préfixe « piezo » provient du grec et signifie presser ou serrer. Le piézoélectrique est la faculté de certains matériaux à se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique, c'est l'effet piézoélectrique direct. Ainsi l'application d'un champ électrique à ces matériaux donne lieu à une déformation, c'est l'effet piézoélectrique inverse. L'effet piézoélectrique ne peut s'observer que dans certains corps non-conducteurs, possédant une anisotropie cristalline, par séparation du barycentre des charges positives et négatives, sous l'effet de la déformation [49].

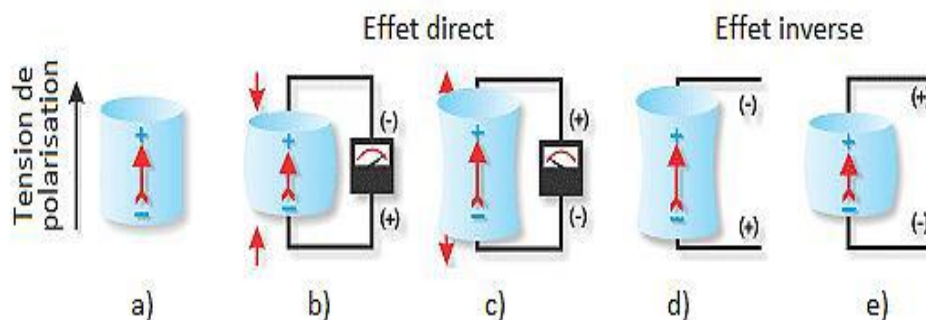


Figure III.1 : La structure globale de piézoélectrique polarisé.

III-2-2 - C'est quoi le PZT et PU :

III-2-2 -1 - Le Titano-Zirconate de Plomb (PZT) :

Les PZT (Titano-Zirconate de Plomb) sont un matériau de la famille de céramiques ferroélectriques qui une fois polarisées possèdent de bonnes caractéristiques piézoélectriques. Les premiers PZT ont été élaborés dès 1954. Les céramiques PZT sont employées dans le domaine des micromanipulateurs de précisions tels que ceux qui sont employés en optique adaptative en astronomie. Il existe aussi bien des céramiques sous des formes massives (plaque, cylindre ou demi-sphère creuse), que sous la forme de film mince ou de gel polymérisé (utilisé dans les MEMS).

La formule chimique du PZT est $Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3$. Sa structure cristalline est de type pérovskite. La densité du PZT varie entre 7500 et 7800 (kg/m^3) [50].

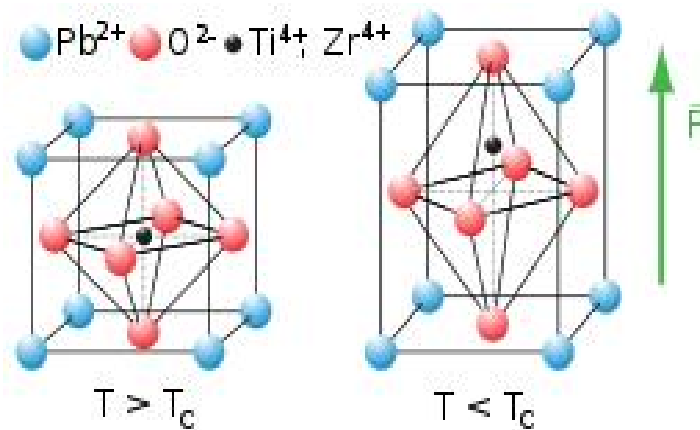


Figure III.2 : Structure du PZT (Titano-Zirconate de plomb).

III-2-2 -2 - Le Polyuréthane (PU) :

PU est l'abréviation du polyuréthane, un polymère antidéchirure, pouvant tout de même être très élastique. Les vêtements d'aspect cuir sont une véritable affirmation de sa personnalité, qui ne sont pas moralement répréhensibles, mais très pratiques et adaptés au quotidien [51].

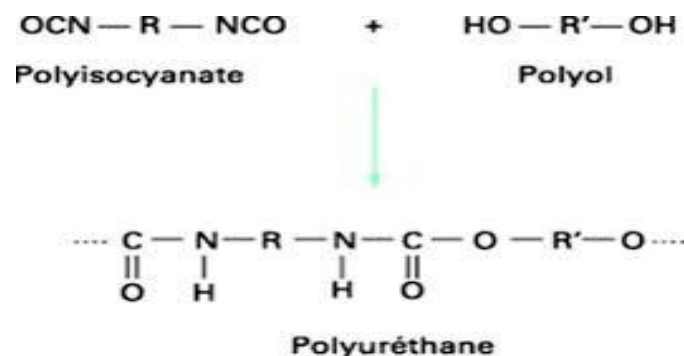


Figure III.3 : Synthèse du polyuréthane.

III-2-2 -3 - Les applications du polyuréthane (PU) :

Ces multiples combinaisons permettent la fabrication de nombreux produits de consommation courante ou à usage industriel. Dans cette multitude d'applications, le polyuréthane se présente sous forme solide ou sous forme de mousse, dont on distingue deux grandes familles, la mousse PU souple et la mousse PU rigide, qui sert en isolation thermique.

[52]

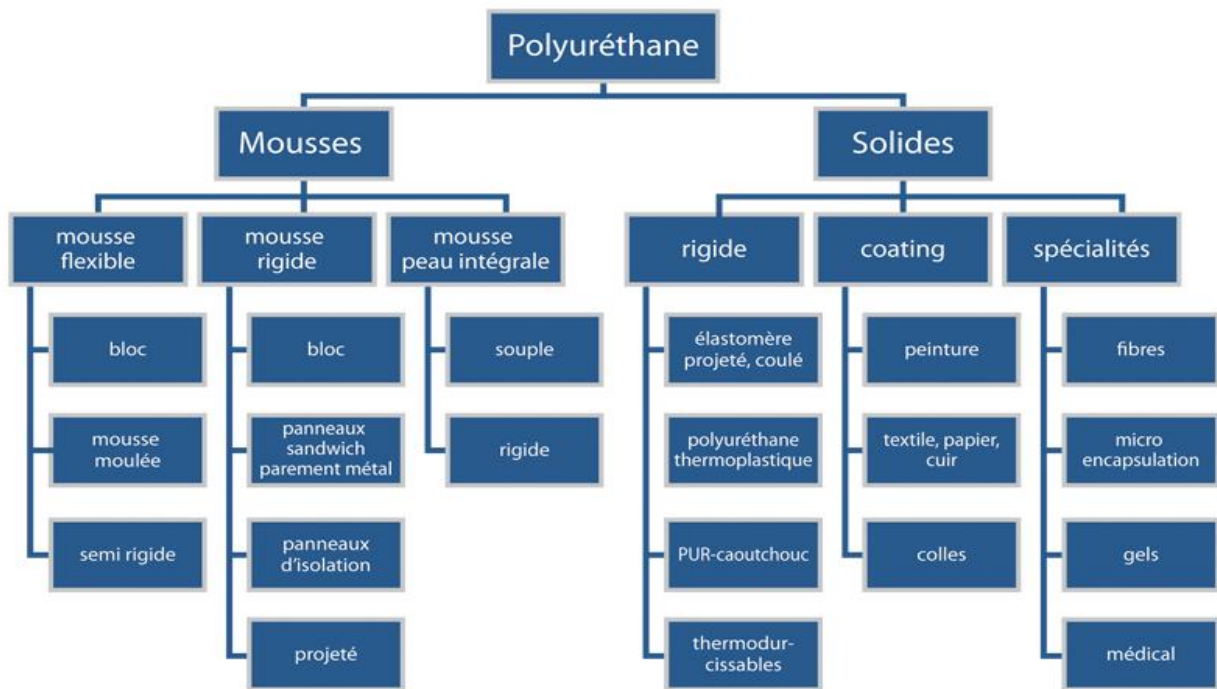


Figure III.4 : Polyuréthane mousse et solide.

III-3 - Les procédure de la modélisation et simulation du PU-PZT :

Le processus de modélisation du courant peut être décrit par les équations constituions d'un couplage électromécanique [53]. L'électrostriction est généralement indiquée comme un couplage quadratique entre la déformation et le champ électrique. On a supposé que le champ électrique est appliqué parallèlement à l'épaisseur (axe 3). Et que la contrainte était appliquée dans le sens orthogonal (axe 1).la direction orthogonale (axe 1) Ainsi, dans ces conditions les équations constitutives d'un matériau électrostrictif peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{E}_3^2 + \mathbf{S}_{11}^E \cdot \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{D}_3 = \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T \cdot \mathbf{E}_3 + 2 \cdot \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{T}_1 \end{cases} \quad (1)$$

De même, le piézoélectrique est décrit à l'aide des équations constitutives qui peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = \mathbf{d}_{31} \cdot \mathbf{E}_3 + \mathbf{S}_{11}^E \cdot \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{D}_3 = \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T \cdot \mathbf{E}_3 + \mathbf{d}_{31} \cdot \mathbf{T}_1 \end{cases} \quad (2)$$

L'expression du déplacement total D3 qui circule à travers comportement électrostrictif piézoélectrique donné par l'équation suivante :

$$\mathbf{D}_3 = \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T + \frac{\mathbf{d}_{31}^2}{\mathbf{S}_{11}^E} + \frac{2 \cdot \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{S}_1}{\mathbf{S}_{11}^E} \right) \cdot \mathbf{E}_3 + \frac{\mathbf{d}_{31} \cdot \mathbf{S}_1}{\mathbf{S}_{11}^E} - \frac{3 \cdot \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{d}_{31} \cdot \mathbf{E}_3^2}{\mathbf{S}_{11}^E} - \frac{2 \cdot \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{E}_3^3}{\mathbf{S}_{11}^E} \quad (3)$$

Le courant induit par la vibration transversale a été mesuré comme suit :

$$\mathbf{I} = \int_A^{+\infty} \frac{\partial \mathbf{D}_3}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} \quad (4)$$

$$\mathbf{I} = \int_A^{+\infty} \left[\left(\boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T + \mathbf{Y} \cdot (\mathbf{d}_{31}^2 + 2 \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{S}_1 - 6 \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{d}_{31} \cdot \mathbf{E}_3 - 6 \mathbf{M}_{31}^2 \cdot \mathbf{E}_3^2) \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{D}_3}{\partial t} + \mathbf{y} \cdot (2 \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{E}_3 + \mathbf{d}_{31} \cdot \mathbf{S}_1) dt \cdot d\mathbf{A} \right] \quad (5)$$

Où A correspond à la surface du polymère et D3 à la densité de flux électrique. Ici, $\partial \mathbf{E}_3 = \partial t$ et $\partial \mathbf{S}_1 = \partial t$ sont les dérivées temporelles du champ électrique et de la déformation, respectivement. Nous utilisons une valeur minimale du champ électrique, car un champ électrique continu (Edc) a été appliqué à l'échantillon de sorte que $\partial \mathbf{E}_3 = \partial t = 0$, le courant de court-circuit dans les composites PU/PZT peut être donné par :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 = (2 \cdot \mathbf{M}_{31} \cdot \mathbf{E}_3 + \mathbf{d}_{31}) \cdot \mathbf{Y} \cdot \int_A^{+\infty} \frac{\partial \mathbf{S}_1}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} \quad (6)$$

Ici, Y est le module d'Young. Ainsi, la puissance récupérer par les composites peut être exprimée par :

$$\mathbf{P}_{rec} = \mathbf{R} \mathbf{I}^2 \quad (7)$$

La modélisation électromécanique qui permet de coupler deux comportements piézoélectriques/électrostrictifs devient une nécessité dans le domaine de la récupération d'énergie vibratoire. Cette approche permet d'améliorer la densité de puissance récupérer par l'état de couplage. On peut ainsi représenter l'impédance électrique d'un composite vibrant à une fréquence donnée par un circuit électrique équivalent. La figure 3 présente la forme la plus couramment adoptée d'un schéma électrique équivalent pour deux comportements, dans lequel R est la charge électrique. Où $R_p(\omega)$ est une résistance représentant les pertes diélectriques. Selon ce schéma, le premier bloc est associé au comportement électrostrictif et le second est associé au comportement piézoélectrique. Ainsi, nous avons ajusté les courants générés par ces deux blocs afin d'obtenir le courant total généré par la conversion électromécanique via le composite, qui est ensuite transféré à la charge électrique.

Il a été démontré dans des travaux précédents [18] qu'il était possible de négliger la résistance de fuite R_p . Le modèle dynamique du courant est donc simplifié par :

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

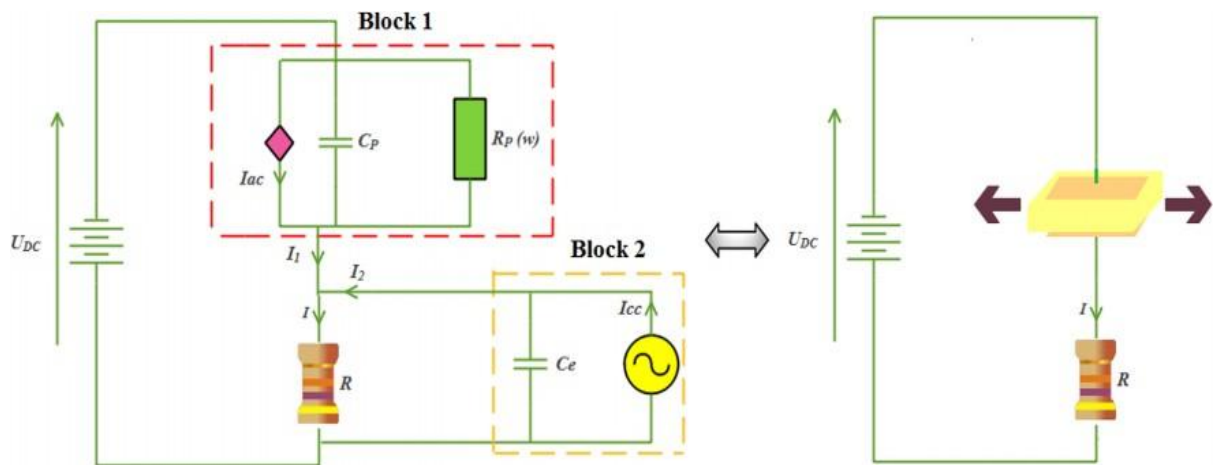


Figure III.5 : Le circuit électrique équivalent du composite PU/PZT.

Où :

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

C_p Est la capacité de la matrice PU, C_e est la capacité de la particule céramique PZT, et où S_1 est la déformation. La tension dynamique sur les composites PU/PZT dans le domaine de fréquence est donnée par :

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

D'après l'équation (10), la puissance récupérer peut être exprimée en fonction de l'amplitude de la déformation S_M :

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

D'après l'équation (11), il existe une résistance de charge optimale à laquelle la puissance de conversion est maximale. La résistance de charge optimale peut être calculée comme suit :

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

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

Par conséquent, pour la charge adaptée, la puissance maximale récupérer peut s'écrire par :

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

A partir de l'équation (14), nous pouvons voir que la puissance maximale ne dépend pas seulement des paramètres intrinsèques du composite mais également de la géométrie du film polymère, des propriétés mécaniques et électriques .En outre, l'ajout de la particule PZT s'est extrêmement intéressant. Comme le montre le tableau 1, l'incorporation de microparticules PZT a permis une augmentation de la constante diélectrique, ce qui a conduit à une amélioration de l'efficacité de la technologie. Une amélioration de la densité de puissance récupérer .Nous nous intéresserons donc à l'évaluation des performances de notre modèle en comparant les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales en fonction de la variation des différents paramètres .mécaniques et du pourcentage de PZT où un bon accord a été trouvé. Pour répondre à cet objectif, nous avons pris en considération les contributions des deux effets d'électrostriction et piézoélectrique dans les puissances électriques récupérer par les composites PU/PZT.

Matériau	ϵ_r	M_{31}	Y(MPa)	A (mm)	e (μm)
PU-33%PZT	23.8	$1.508 \cdot 10^{-18}$	209	640	50
PU-37%PZT	27.03	$1.508 \cdot 10^{-18}$	285.95	640	50
PU-41%PZT	28.75	$1.508 \cdot 10^{-18}$	331.23	640	50

Tableau III-1 : Paramètres théoriques du composite PU-PZT.

Les données théoriques illustrées dans le tableau ci-dessous montrent les paramètres théoriques du composite PU/PZT avec des différentes fractions volumiques, et la simulation de ces paramètres nous a donné les résultats suivants :

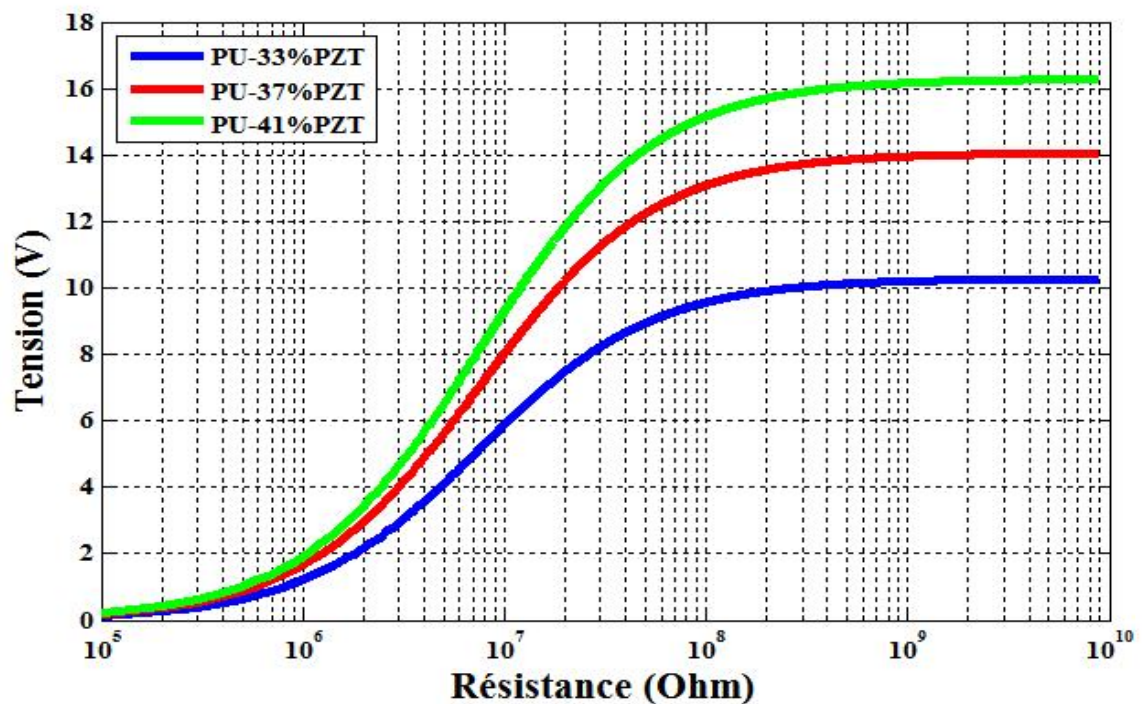


Figure III.6 : La tension générée en fonction de la résistance avec des différents pourcentages.

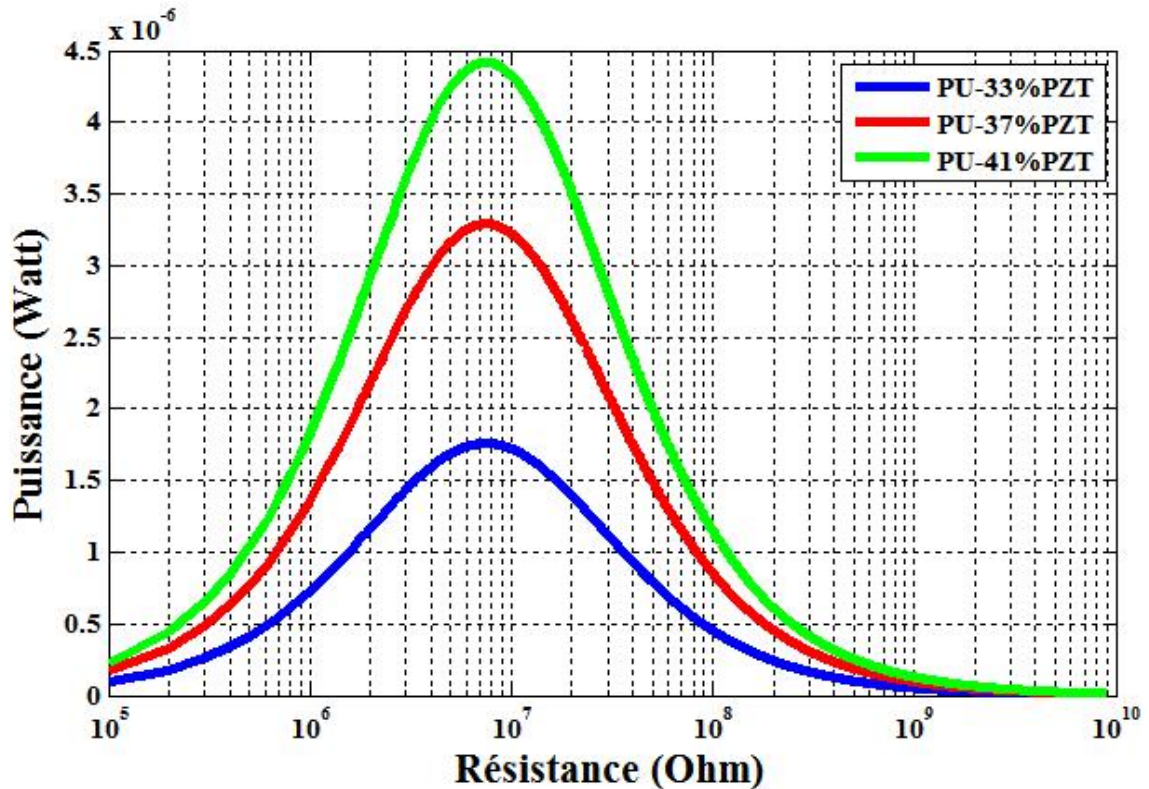


Figure III.7 : La puissance récupérer en fonction de la résistance avec des différents pourcentages.

Commentaire :

Les résultats obtenus à partir du modèle mathématique pour le composite PU-PZT avec $S=0.6\%$ et une fréquence $F=6$ Hz.

- La figure(III.6) qui est la tension générer en fonction de la résistance on constate que la tension augmente avec l'augmentation du pourcentage du PZT sur l'intervalle de la résista supérieure à 10^7 Ohm, lorsque PU-33% attient une valeur de 10.1V, PU-37% attient 14V et PU-41% attient 16.2V.

- La figure(III.7) qui représente de la puissance récupérer en fonction de la résistance on constat l'augmentation de la puissance jusqu'à ce qu'elle attient la valeur maximale 4.45×10^{-6} lorsque on ajoute 41% PZT sur l'intervalle de la résistance supérieure à 10^7 Ohm.

III-4 - les alliages à mémoire de forme (AMF) :

III-4-1 - Historique sur les alliages a mémoire de forme (AMF) :

La plupart des travaux sur les alliages à mémoire de forme (AMF) suppose le système en équilibre thermique à chaque instant. Cependant, il est connu que le phénomène de transformation de phase dans ces matériaux s'accompagne d'une production locale de chaleur

(chaleur latente et contribution irréversible liée à la dissipation intrinsèque). Par conséquent, la validité de l'hypothèse d'équilibre thermique dépend de la vitesse de chargement et des conditions d'échange thermique entre le système et son environnement. Pour mieux prédire la réponse des systèmes AMF, il est ainsi nécessaire de prendre en compte le couplage thermomécanique, en considérant le champ de température comme une variable interne à déterminer, certaines lois de comportement ont été proposées dans ce sens (Anand et Gurtin (2003); Auricchio et Petrini (2004)).

III-4-2 - Les applications de l'AMF :

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

III-4-3 - Les procédure de la modélisation et de la simulation de l'AMF :

L'effet bilame consiste dans la courbure au chauffage d'un empilement composé d'un matériau à haut coefficient de dilatation thermique et d'un matériau à bas coefficient de dilatation thermique. L'étude de référence sur cet effet a été faite par S. Timoshenko, qui a analysé le comportement des bilames pour les thermostats. Un bilame sous forme de poutre, encastré d'un côté et plat à l'état initial (**Figure III.8**) prend une forme d'arc de cercle lorsque la température change. Le rayon de courbure est donné par l'expression suivante [54]:

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

Avec :

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

de Young des deux couches, α_1, α_2 : coefficients de dilatation thermique (CDT).

L'index 2 correspond à La couche à haute dilatation thermique, située en haut sur la **Figure (III.8)**.

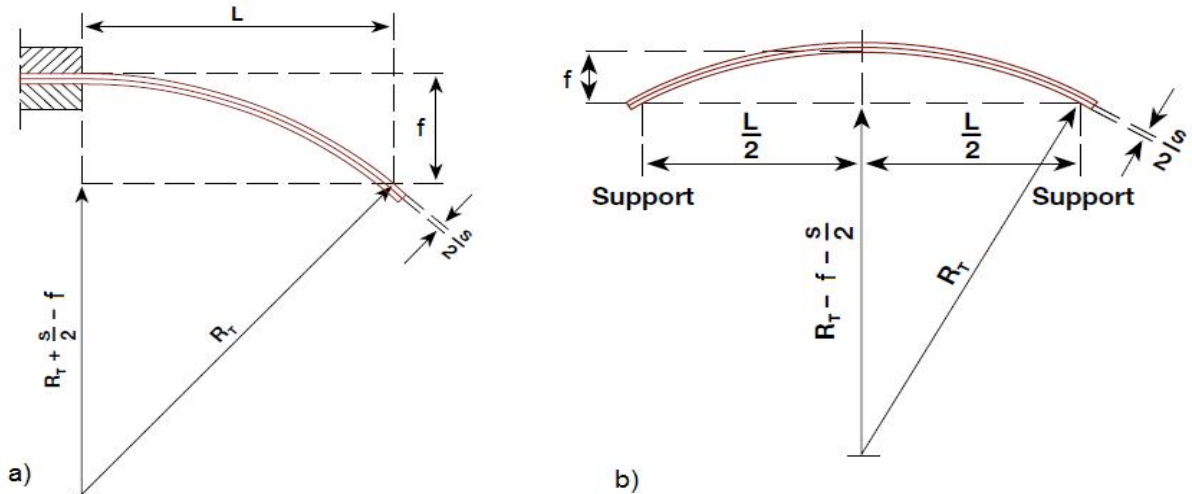


Figure (III.8) : Déformation d'un bilame sous forme de poutre soumise à une variation de température : a) bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre. [54]

Dans le cas où le bilame est plat à la température de référence T_0 , et que les épaisseurs des couches, aussi bien que le modules de Young sont égaux, équation (1) peut être simplifiée vers :

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

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

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

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

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

C'est une expression valable dans le cas où la flèche est inférieure à 10% de la longueur du bilame.

Dans le cas où le déplacement du bilame est bloqué à son bout, il développe une force F calculée selon :

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

Avec :

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

Un autre cas souvent rencontré en pratique est celui d'un bilame libre, ou simplement supporté **Figure (III.8.b)**. Dans ce cas, la flèche se calcule selon :

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

La flèche résultante est inférieure à celle d'une poutre encastree d'un cote de la même longueur. Ceci est dû au fait que le déplacement correspondant est pris au centre, plutôt qu'à une extrémité libre.

Si une force est appliquée au centre du bilame de manière à limiter sa déformation, la flèche devient :

$$f = \frac{k}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{4s} - \frac{(F - F_0)L^3}{4ls^3Y} \quad (7)$$

Avec :

F_0 : force à la température de référence T_0 .

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

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)ls^2}{L} \quad (8)$$

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. Ceci 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 faite dans. Une forme initiale d'arc de sinus est considérée, avec la couche à haut coefficient de dilatation thermique en haut et une flèche f_0 vers le bas **Figure (III.9)**. Lors du chauffage la couche à haute dilatation thermique tire le bilame vers le haut et le met en compression.

Pour une certaine flèche f_1 une position instable est atteinte. Si le bilame est chauffé plus, il flambe et change le sens de sa courbure. A ce stade il va avoir une flèche f_2 , orientée vers le haut. Si on continue à chauffer la structure, la flèche va continuer à augmenter dans le même sens.

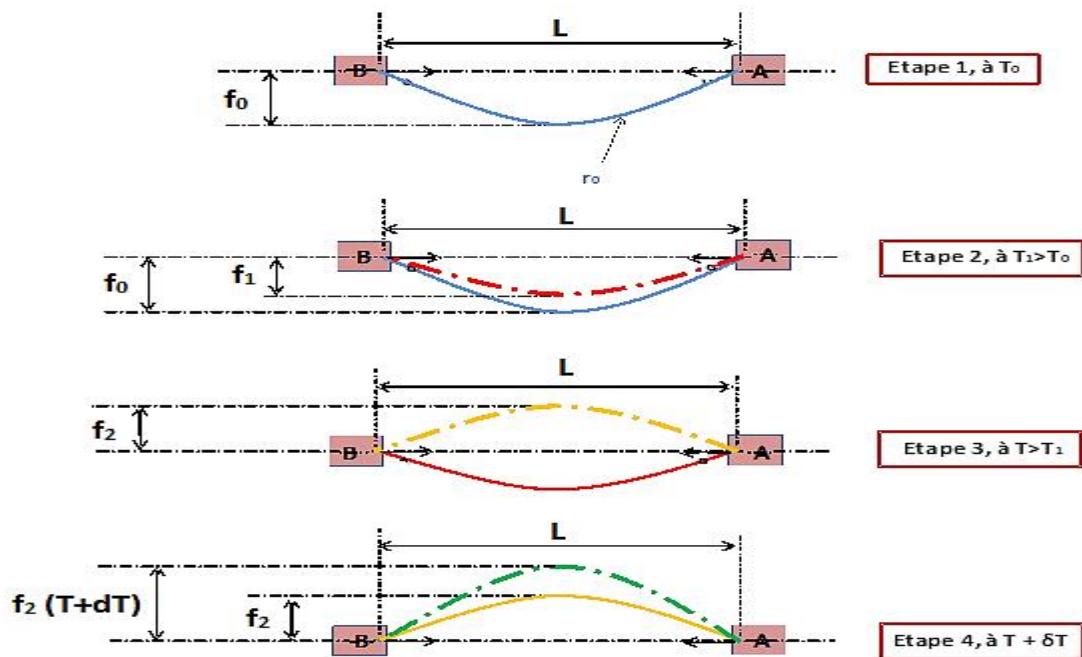


Figure III-9: Déformation lors du chauffage d'un bilame à extrémités immobiles.

La **Figure III-10** montre la démonstration du système non linéaire à base d'un système linéaire qui nous avons exploité sur notre étude pour obtenir le modèle mathématique.

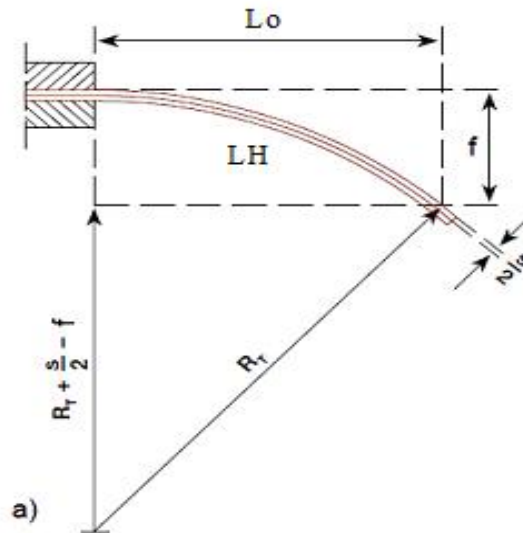


Figure III-10: Bilame encastré d'un côté

$$L_0 = \sin(\theta) * R_T \quad (9)$$

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

Avec :

R_T : rayon de courbure à la température cible T .

$$L_{total} = L_H + dl_1 \quad (11)$$

$$L_H = \arcsin(\theta) * R_T \quad (12)$$

$$L_{total} = \arcsin(\theta) * R_T + dl_1 \quad (13)$$

$$dl_1 = \alpha_1 \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (14)$$

On prendre :

$$\Delta T = T - T_0 \quad (15)$$

Avec :

T_0 : Température initiale.

Le **tableau III-2** Suivent représenté les caractéristique d'un l'alliage de mémoire de forme (AMF) :

Symboles	Paramètres	Valeurs
L0	longueur initial	$20 \cdot 10^{-2}$
Y	modules de Young	$0.03 \cdot 10^9$
S	L'épaisseur du bilame.	$1 \cdot 10^{-3}$
α_1 : alpha 1	coefficients de dilatation thermique (CDT).	$\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-4}$;
α_2 : alpha 2	coefficients de dilatation thermique (CDT).	$\alpha_2 = 170 \cdot 10^{-4}$;
F0	force à la température de référence T0	0.01
Ls	Largeur	$1 \cdot 10^{-2}$
K	Constante	$K = 2.5 \cdot 10^3$
T	Températures	T= [0,300]

Tableau III-2: Les paramètres de simulation d'alliage de mémoire de forme(AMF).

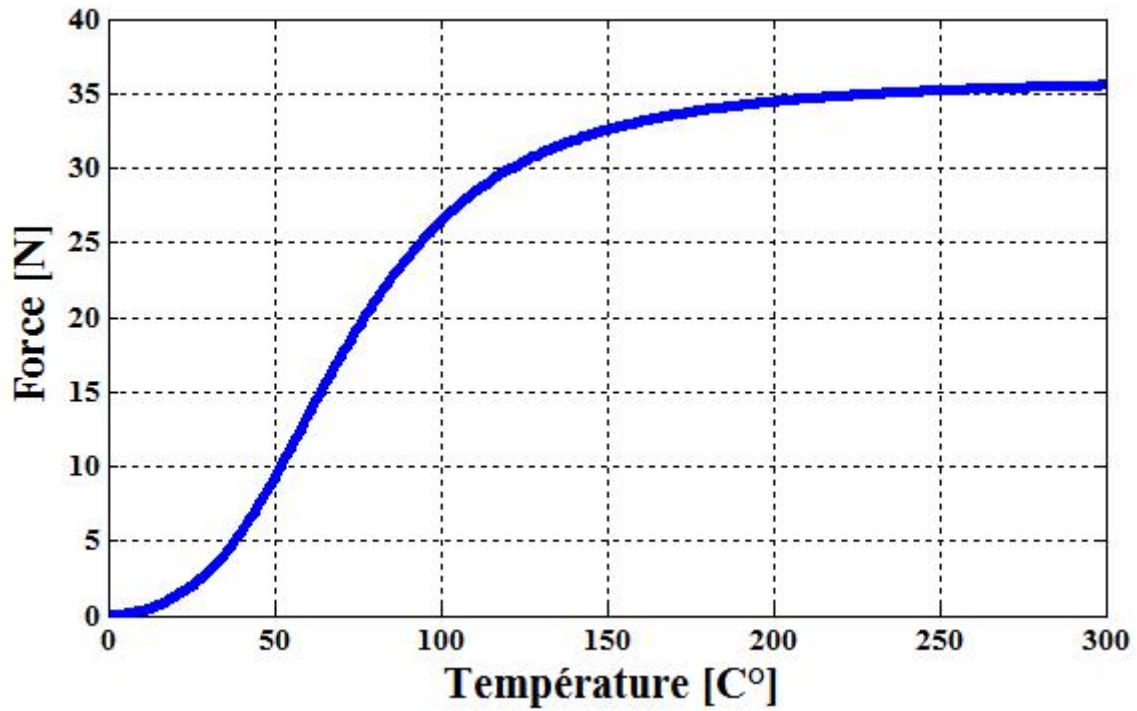


Figure III.11 : La variation de la force en fonction de la température.

- La modalisation et la simulation de système étudie basse sur les équations de la tension et de la puissance qui nous représenté suivent :

- On à simuler ce système avec une force initiale est egale 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 : $Z_m = jL_m \omega + \frac{1}{jC_m \omega} + R_m$ représente l'impédance mécanique.

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

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

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

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.

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

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

Avec :

L_3 : Longueur de bar piézoélectrique.

<i>Caractéristiques du P188</i>	<i>Paramètres du modèle</i>
$g_{33} = 26.10^{-3} Vm / N$	$C_{33} = 14,7 pF$
$Q_m = 80(1^{er} \text{ mode})$	$C_m = 10.1nF$
$S_{33}^D = 9.09.10^{-12} m^2 / N$	$A_{33} = 4,25.10^{-10} C / N$
$N = 19,0.10^{-3}$	$C_0 = 6.64nF$
$L_3 = 1.10^{-2}$	$A_3 = 2.10^{-6}$
$h_{33} = 28,6.10^8$	$L_m = 347.10^{-6}$
$R_m = 16,2$	$B_{33}^S = 3.01$

Tableau III - 3 : Caractéristiques du matériau P188 et paramètres du modèle (mode 33).

Nous avons utilisé la force de La premier polie pour calcule la deuxième force, l'équation de deuxième force sont données par :

$$F2 = (D2/D1) * F1 \quad (23)$$

- D1 : diamètre de petite poulie $D1 = 4 * 10^{-2}$
- D2 : diamètre de grande poulie $D2 = 6 * 10^{-2}$

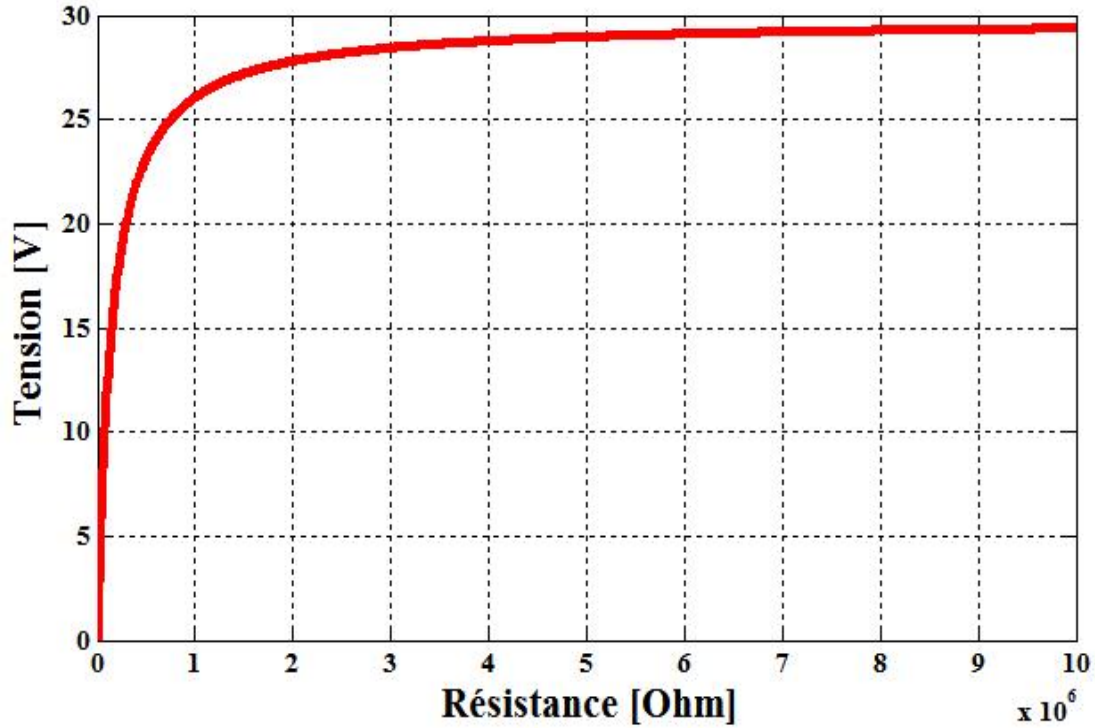


Figure III.12 : La variation de la tension en fonction de la résistance.

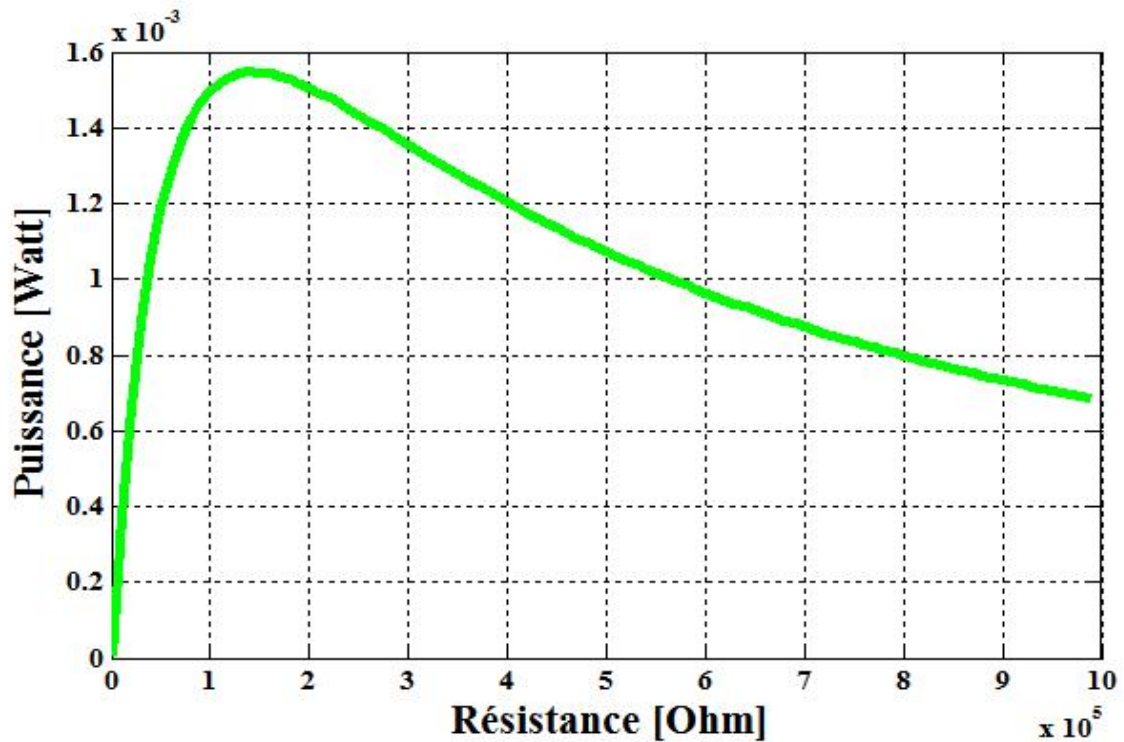


Figure III.13 : La variation de la puissance en fonction de la résistance.

Commentaire :

- La **Figure (III.11)** représente la variation de la force en alliage à mémoire de forme en fonction de température dans un intervalle de [0 à 300 C°], la force prendre valeur maximale de 36 N a T=250 C°.

- La **Figure (III.12)** représente la variation de tension en fonction de résistance, on remarque que la tension a une valeur maximal de $R=7 \cdot 10^5$ qui égale 29V.

- La **Figure (III.13)** représente la variation de la puissance en fonction de la résistance, on remarque que la puissance a une valeur maximale de $1.6 \cdot 10^{-3}$ à $R=1.5 \cdot 10^5$

Quand on applique un nouveau système ,consiste à ajouter l’alliage à mémoire de forme dans un composé polymère on a obtient les résultats suivants :

$$U = \frac{R_L \cdot N \cdot Z_e \cdot (Fi + Famf)}{(R_L + Z_e) \cdot Z_m + (R_{conv})} \quad (24)$$

$$P = \frac{R_L \cdot R_{conv}^2 \cdot (Fi + Famf)^2}{2|(Z_e + R_L) \cdot Z_m + (R_{conv})|^2} \quad (25)$$

- Le tableau suivant montre les valeurs de F amf extraites de la **Figure III.11** à différentes températures:

La Température	15 C°	18 C°	20 C°
F amf	1 N	1.5 N	2 N

Tableau III-3 : les valeurs de F amf en fonction de la température

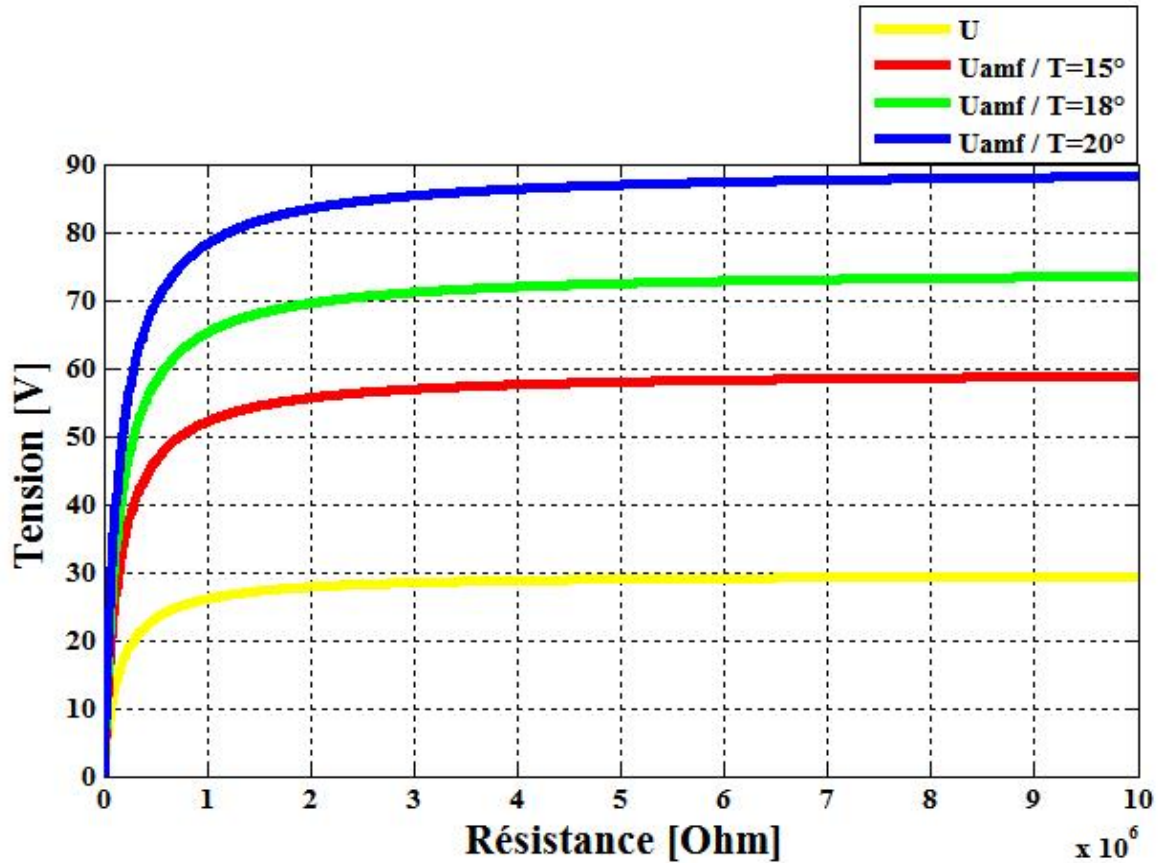


Figure III.14: La variation de la tension en fonction de la résistance sans AMF et avec AMF et avec différente température

Commentaire :

La figure (III.14) montre la variation de la tension en fonction de la résistance sans AMF et avec AMF et avec différente température

- on remarque que la tension a une valeur maximale de 30 V lorsque $R=4 \cdot 10^6$ a une tension sans AMF, et on AMF on remarque dans :
 - $T=15^\circ C$: la tension a une valeur maximale de 59 V lorsque $R=6 \cdot 10^6$
 - $T=18^\circ C$: la tension a une valeur maximale de 72 V lorsque $R=6 \cdot 10^6$
 - $T=20^\circ C$: la tension a une valeur maximale de 88 V lorsque $R=6 \cdot 10^6$
- en présence l'AMF la tension augmente d'une grande façon [$U_{amf}(T=20^\circ C) > U_{amf}(T=18^\circ C) > U_{amf}(T=15^\circ C) > U$]

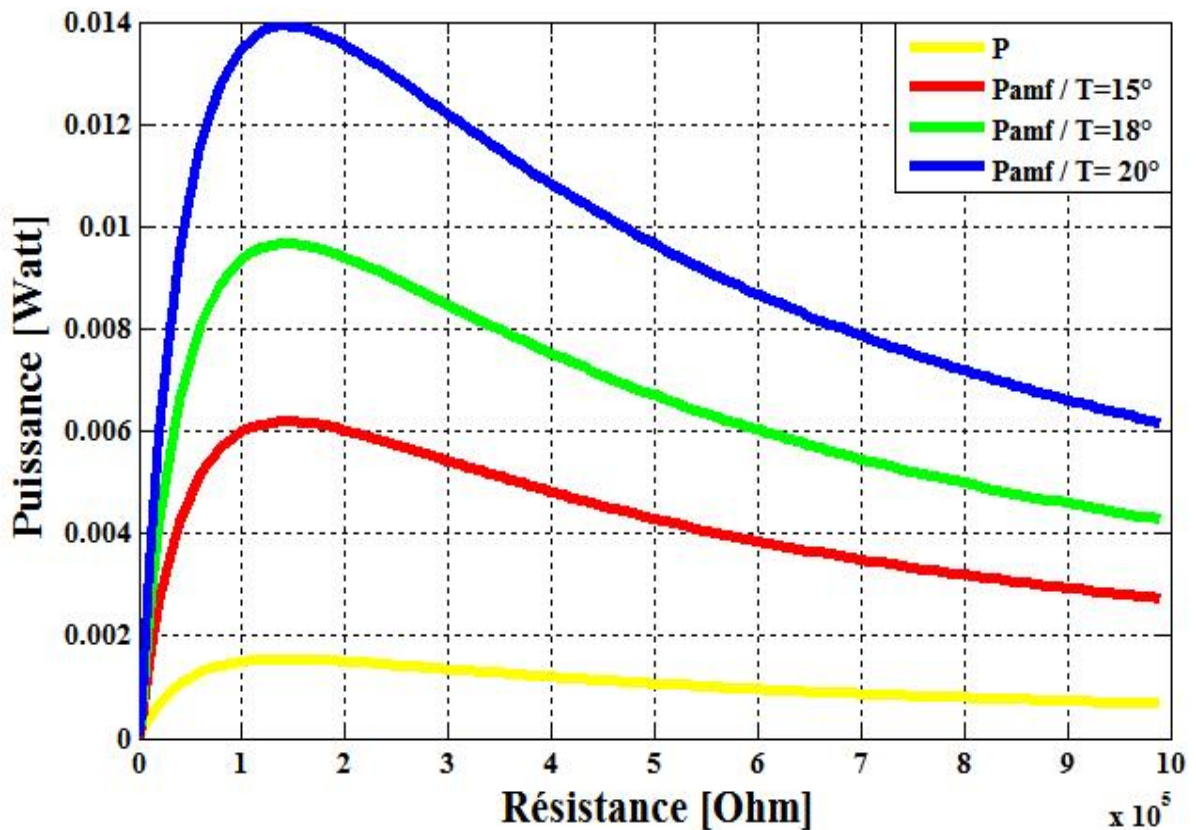


Figure III.15: La variation de la puissance en fonction de la résistance sans AMF et avec AMF et avec différente température

Commentaire :

La figure (III.15) montrent la variation de la puissance en fonction de la résistance sans AMF et avec AMF et avec différente température

- on remarque que la puissance a une valeur maximal de 0.015 Watt lorsque $R = 1.5 \cdot 10^5$ a une puissance sans AMF, et on AMF on remarque dans :
 - $T = 15^\circ C$: la puissance a une valeur maximal de 0.006 W lorsque $R = 1.5 \cdot 10^5$
 - $T = 18^\circ C$: la puissance a une valeur maximal de 0.01 W lorsque $R = 1.5 \cdot 10^5$
 - $T = 20^\circ C$: la puissance a une valeur maximal de 0.014 W lorsque $R = 1.5 \cdot 10^5$
 en présence l'AMF la puissance augmente d'une grande façon [$P_{amf}(T=20^\circ C) > P_{amf}(T=18^\circ C) > P_{amf}(T=15^\circ C) > P$]

III-4-4 – Composite PU-PZT avec AMF :

On a ajouté un alliage à mémoire de forme avec PU-33%PZT pour avoir un nouveau résultat :

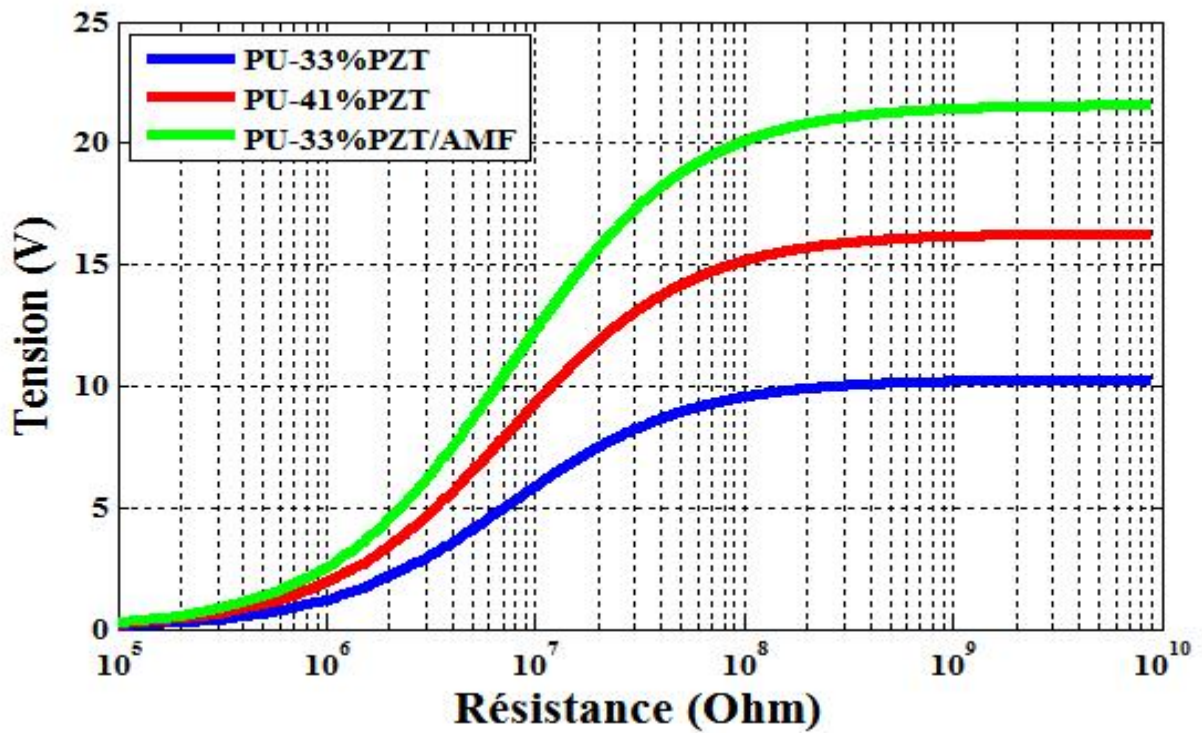


Figure III.16 : La variation de la tension à partir du composite PU-PZT sans AMF et avec AMF

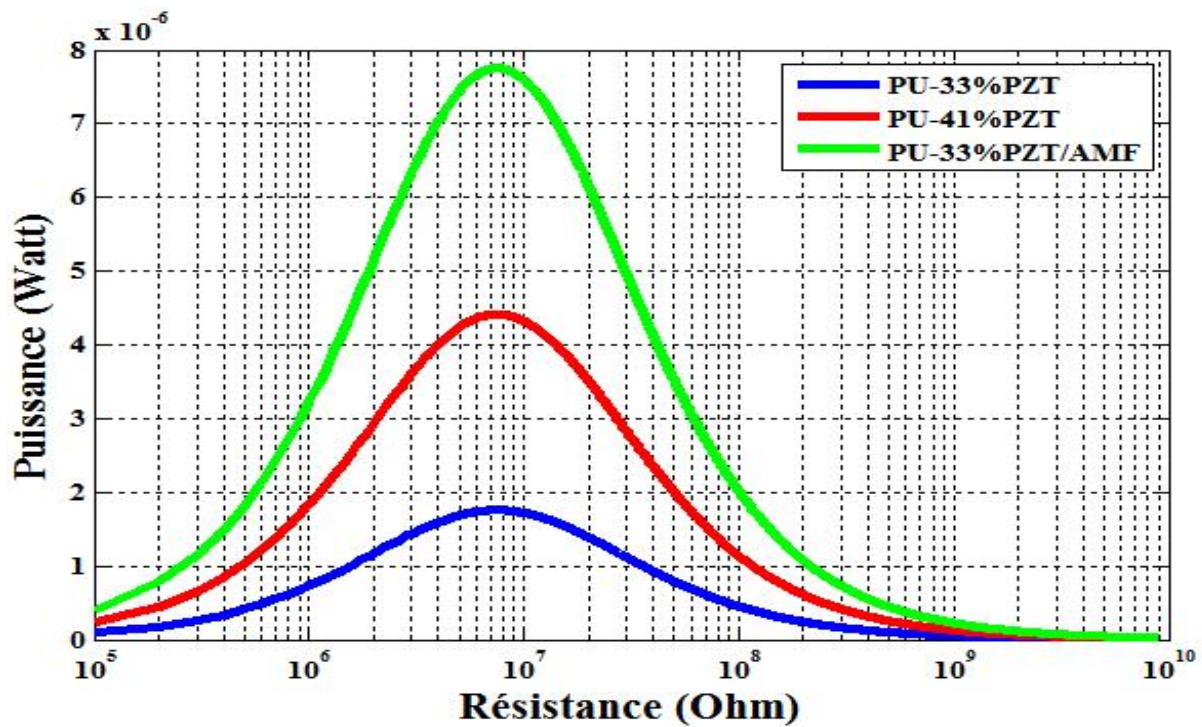


Figure III.17 : La variation de la puissance à partir du composite PU-PZT sans AMF et avec AMF

Commentaire :

- La figure (III.16) représente La comparaison de la tension générer à partir de deux déférents composite avec deux pourcentage PU-PZT 33% et PU-PZT 41% sans AMF et avec AMF (PU-PZT 33%/AMF) , on remarque que la tension à égale 10.1V pour PU-PZT 33% et 16.2V pour PU-PZT 41% sans AMF, et lorsque on ajoute AMF au PU-PZT 33% on remarque que la tension de ce composite est supérieure à la tension d'un composé PU-PZT 41% où est égale 22.3 V [$U(\text{PU-PZT } 33\%/AMF) > U(\text{PU-PZT } 41\%)$].

- La figure(III.17)) représente La comparaison de la puissance récupérer à partir de deux déférents composite avec deux pourcentage PU-PZT 33% et PU-PZT 41% sans AMF et avec AMF (PU-PZT 33%/AMF) , on remarque que la puissance à égale $1.9 \cdot 10^{-6}$ Watt pour PU-PZT 33% et $4.25 \cdot 10^{-6}$ pour PU-PZT 41% sans AMF, et lorsque on ajoute AMF au PU-PZT 33% on remarque que la puissance de ce composite est supérieure à la puissance d'un composé PU-PZT 41% où est égale $7.75 \cdot 10^{-6}$ Watt [$P(\text{PU-PZT } 33\%/AMF) > P(\text{PU-PZT } 41\%)$].

III-5 -Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons développé des composites à base du polymère PU charger de grains de céramique de PZT. Le module de Young du composite est évidemment beaucoup plus faible que celui du PZT propre, mais également plus grand que celui du polymère. Pour cette raison nous n'avons pas dépassé un pourcentage de 41% de PZT dans la matrice, ce qui a permis de garder la flexibilité du matériau. Alors, le composite à base de polyuréthane chargé de 41% de PZT donne les meilleures puissances récupérées pour nos matériaux. Finalement, on a ajouté l'alliage a mémoire de forme AMF pour donne une performance élève pour toute les applications et l'utilisation et cela nous a donné de meilleurs résultats pour la variation de la puissance et la tension où nous avons remarqué que l'ajout d'un petit pourcentage de l'AMF a obtenu une valeur de puissance et tension plus élevée que les résultats précédents.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans cette mémoire est l'étude et la simulation d'un nouveau matériau composite piézoélectrique et combiner les caractéristiques piézoélectrique et élastique afin de pouvoir adapter un composite à des applications qui nécessitent une petite déformation.

Cette étude est basée sur la modélisation et la simulation d'un nouveau matériau composite piézoélectrique faite par logiciel Matlab .

La récupération d'énergie représente un enjeu important dans le développement et l'intégration de microsysteme toujours plus performant ayant de plus en plus d'autonomie.

Le développement en technologies confère aux microsystemes MEMS des avantages fondamentaux comme la miniaturisation, le coût réduit par les procédés de fabrication collective, des performances et fonctionnalités nouvelles, et ainsi l'économies d'énergie.

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.

Référence bibliographique :

- [1] Mounir Meddad : (Etude de l'énergie renouvelable dans l'environnement humain pour alimenter les systèmes électroniques portables), thèse de doctorat université Sétif 2012.
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_\(%C3%A9conomie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_(%C3%A9conomie))
- [3] <https://ekwateur.fr/differentes-energies-fossiles/>
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire_de_Nogent.
- [5] <https://www.supernergy.fr/quels-sont-les-avantages-et-les-inconvenients-de-l-energie-non-renouvelable/>
- [6] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>.
- [7] Renewables 2014. Global Status Report, op. cit., p. 15..
- [8] Hydro power, Alternative Energy News, 2010, [réf de janvier 2013], disponible sur: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/>.
- [9]: <https://sites.google.com/site/3blesenergies/la-centrale-biomasse>
- [10] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [11] Wind Works, Photos of wind turbines around the world, [réf. de décembre 2012], disponible sur: <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=5>
- [12] MELLOUL, A: Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, 2011
- [13] GUESSABI ACHREF ET BEDHANE YASSER ' Contribution à l'étude de la conversion d'énergie Photovoltaïque –triboélectrique', Mémoire de master université de BBA 2021.
- [14]<https://www.google.com/search?q=+sch%C3%A9ma+fonctionnement+de+energie+solaire+thermique>
- [15] BIDI Manel 'Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures ', Mémoire de master université de M'sila 2019.
- [16]https://www.google.com/search?q=centrale+photovolta%C3%AFque&rlz=1C1XXVF_frDZ980DZ980&sxsrf=APq-WBsOfOE27GBj8_mC8jkjihqQ2CC4Ug:1644208574203&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjvu4Gg4uz1AhXoi_0HHTxaDOgQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1024&bih=657&dpr=1#imgrc=A1wCDM7KM2X9_M
- [17] ZERROUKI.Z et BEREKSI REGUIG.R, 2017, « Dimensionnement d'un système

Référence bibliographique

- photovoltaïque autonome », Mémoire de Master, UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM, P1.
- [18] Belkbir.K et chaabi Siham, 2017, « conception et réalisation d'un suiveur de soleil à base d'une carte Arduino UNO», Mémoire de Master, université Mammeri de Tizi- Ouzou, P5.
- [19]https://fr.wikipedia.org/wiki/Microsyst%C3%A8me_%C3%A9lectrom%C3%A9canique#:~:text=Les%20MEMS%20ont%20%C3%A9t%C3%A9%20d%C3%A9velopp%C3%A9s,importante%20du%20march%C3%A9%20des%20MEMS.
- [20]<https://actualiteinformatique.fr/internet-of-things-iot/definition-mems-systemes-micro-electromecaniques>.
- [21] Denis MERCIER, "Conception, modélisation, fabrication et caractérisation de composants MEMS RF "le 10 décembre 2003.
- [22] Pierre Puget, Philippe Nerin, "Les microsystèmes : technologies et traitement de l'information", 15-19 SEPTEMBRE 1997.
- [23] GAURAV NAIR, "DYNAMIC SIMULATION AND DESIGN OF RF-MEMS SWITCHES MADE OF STEEL", A PROJECT REPORT BY Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Science, 2012.
- [24] G. Matthei, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Artech house books, 1980, pp. 432 – 433.
- [25] Mohamed_Kazem El Khatib, « Fonctions de commutation à base de micro commutateurs MEMS RF appliquées à la conception de matrices de commutation », Université de Limoges, Années 2008.
- [26] Gatien FLEURY, « Etude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, le 21 décembre 2006.
- [27] Arnaud De Grave, « Conception intégrée de micro système électromécanique », thèse en Institut national polytechnique de Grenoble, le 8 septembre 2004.
- [28] Voir site : <http://www.amkor.com/enablingtechnologies/MEMS/index.cfm>
- [29]<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/5616/5616-les-technologies-mems-ens.pdf>.
- [30] L. Eyraud, « *Diélectriques solides anisotropes et ferroélectriques* », Paris : Gauthier-Villars, (1967) VIII-183.
- [31] P. Curie, J. Curie, « *Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémicédroès à faces inclinées* », Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences Paris, Tome 91 (1880) 294 - 295.
- [32] F. Pockels, « *Pyro- und piezoelektrizität, Elektrizität und Magnetismus I (Handbuch der*

Référence bibliographique

Physik vol 4)» ,Leipzig, Dr A Winkelmann, 1905, p. 766–93.

[33] **Z. Sadoune.** " Modélisation et simulation des matériaux composites Piézoélectriques Cas du SiO₂ ". Thèse de doctorat, Université Mohammed V Faculté des Sciences Rabat, 2013.

[34] M. Brissaud, *Matériaux piézoélectriques*. Presses Polytechniques et Universtaires Romande, 1ère ed., 2007.

[35] A. Aydi, « Élaboration et caractérisations diélectriques de céramiques ferroélectriques et/ou relaxeur de formule M₂SnO₃ -NaNbO₃ (M = Ba, Ca)», thèse, Université Bordeaux 1.

[36] S.B. Lang and S. Muensit, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 85, 125-134, (2006).

[37] S-E. Park and T. R. ShROUT, *J. Appl. Phys.* vol. 82, 1804-1811, (1997).

[38] B. Clephas, **Adaptronics and smart structures**, Hartmut Janocha editor, Springer-Verlag, chap. 6.2 : piezoelectric actuator, 1999.

[39] "Triboélectricité", <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tribo%C3%A9lectricit%C3%A9>

[40] "Électrisation par frottement: triboélectricité", <http://scientificsentence.net/Equations/Electricite/index.php?key=yes&Integer=triboelectricite>

[41] KETIR Amar, MAY Bouzid, " Paramètres influent sur le dépôt de charge électrique par effet couronne sur une surface d'un diélectrique", Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2015

[42] HAMMI Tarik, " Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles", Thèse de Doctorat, Université de Lille, Avril 2005 .

[43] MESSAL Sara, " Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2016.

[44] REZOUG Mohammed, " Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes", Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel- Abbès, 2015.

[45] G.Jarrousse, " Adhésion des polymères semi-cristallins entre leur température de transition vitreuse et leur température de fusion", Thèse de doctorat de l'université Paris VI, (2004) .

[46] F.Ghanem," Procédés d'obtention des matériaux plastiques et composites", <https://fr.slideshare.net/ahmedmanai900/copier-cours-plasturgie-version-00-44502178>.

[47] A-f. Gourgues-Lorenzo et J-M.Haudin. *Matériaux pour l'ingénieur* ; 2006.

[48] <http://thesis.univ-biskra.dz/2440/2/introduction%20g%C3%A9n%C3%A9rale.pdf>

Référence bibliographique

- [49] BENDINE KOUIDER (Contrôle actif de vibration par les Matériaux piézoélectriques) thèse de doctorat université de SIDI BEL ABBES 2012.
- [50] <https://www.techno-science.net/definition/4622.html>
- [51] <https://snpu.fr/quest-ce-que-le-polyurethane-ou-une-mousse-pu>
- [52] <https://snpu.fr/quest-ce-que-le-polyurethane-ou-une-mousse-pu/>
- [53] NEGHMOUCHI Zohra et REBAH Yousera (Etude d'un composite a base PU Application micro générateur) thèse de master université de Bordj Bou Arrereidj 2021
- [54] Medjane Elaid et Saoud Ibrahim (L'optimisation des structures intelligente pour la récupération d'énergie vibratoire) thèses de master université de Bordj ou Arreridj 2019.