

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté du Génie Électrique et Informatique

Département Génie Biomédical

Mémoire de fin d'études

Master Académique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Biomédical

Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Présenté par :

BEKDOUCHE Thinhinane

AMEUR Hakima

Thème :

**Conception et optimisation d'un système de
récupération d'énergie piézoélectrique pour les
applications en biomédecine**

Mémoire soutenu publiquement le 30/06/2024. Devant le jury composé de :

Mr. CHELLI Takfarinas	MAA,	UMMTO,	Président.
Mr. NAI OUSLIMANE Ahmed	MCB,	UMMTO,	Encadrant.
Mr. BACHIR M'hamed saadi	MCB,	UMMTO,	Examineur.

Promotion : 2023-2024



Remerciements

D'abord, tout ce que nous avons comme bien fait provient d'Allah.


Deuxièmement nous remercions notre encadreur **Mr. NAIT OUSLIMANE** Ahmed pour son encadrement, sa disponibilité, ses encouragements durant toute la période de la préparation de ce mémoire.

Nous remercions s'adresse à **Mr. CHELLI Takfarinas** pour son aide pratique, ses encouragements et sa disponibilité.

Nous remercions également le département de génie biomédical de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Nous tenons à remercier les membres du jury **Mr. CHELLI Takfarinas** et **Mr. M'HAMED SAADI Bachir** pour leur présence et leur temps qu'ils ont bien voulu consacrer pour l'évaluation de ce travail.

Finalement, nos parents méritent plus qu'un merci.





Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce mémoire : A mes chers parents

«Mon père »

Qui m'a appris que le monde est un combat et que son arme est la connaissance et le savoir.

«Ma mère »

Pour toi maman aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices, durant mon enfance jusqu'à aujourd'hui. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consenti pour mon éducation et ma formation.

«Mon cher frère Arezki».

Qui m'a soutenu dans l'adversité et qui m'a tendu la main inlassablement lorsque j'étais faible, que Dieu t'accorde un côté inébranlable.

« A mes chères sœurs »

Célia et Amira qui m'ont toujours encouragé.

Je dédie également ce travail à mes grande parents, mes tantes, mes oncles, mes cousins et cousines et à tous les membres de ma famille petits et grands.

Un dédicace de cœur pour ma grand-mère Dehbia et mon oncle Bêlaid que Dieux les garde dans le grand paradis.

A tous mes amis (es) : Lina, Hamza, Djaffar, Kenza, Saadi, Faroudja , Fatiha, Ikram, Lyes , Yamina, Hassane, Mohamed , Walid, Nor Elhoda, Yacine.

A ma copine et binôme Ameer Hakima qui a partagé avec moi ce travail.

A tous ceux ou celles qui me sont chers et qui j'ai omis involontairement à citer

BEKDOUCHE Thinhinane





Dédicace

Je dédie ce modeste Mémoire de Master et cette étape importante de ma vie
entière

A ma très chère maman.

Pour sa patience, son soutien, ses sacrifices, et ses encouragements Pour celle
qui m'a entourée pour que rien n'entrave le déroulement de mes études. Pour toi

« Maman »

Ce que je vous dédie est incomparable devant vos sacrifices.

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

A mon père.

Au meilleur des pères, tu as été bien plus qu'un héros. Ta présence continue de
briller dans nos cœurs, éclairant notre chemin avec amour et sagesse. Tu nous
manques chaque jour, mais ton héritage de force et de gentillesse demeure
vivant en nous. »

Que cette dédicace soit un symbole de

Ma reconnaissance éternelle envers toi.

A mes chers frères, Sœurs, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis, et mes collègues.

AMEUR Hakima



Tables des matières

Tables des matières	I
Liste des abréviations	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Etat de l'art de récupération d'énergie piézoélectrique.

I.1. Introduction.....	3
I.2. Les sources de récupération d'énergie.....	3
I.3. Historique de la piézoélectricité.....	4
I.4. Définition de la piézo-électricité.....	6
I.5. Importance et potentiel de la technologie piézoélectrique.....	6
I.6. Les applications de la piézoélectricité	8
I.6.1. Transducteurs acoustique	8
I.6.2. Résonateur piézoélectrique à quart	9
I.6.3. Actionneurs et moteurs piézoélectrique	10
I.6.4. Générateurs et transformateurs	12
I.7. Les applications de la piézoélectricité dans le domaine biomédical.....	15
I.7.1. Accéléromètre piézoélectrique.....	15
I.7.2. Echographie.....	18
I.7.3. Micro-pompes piézoélectrique.....	18
I.8. Conclusion	20

Chapitre II : Conception et modélisation du dispositif.

II.1. Introduction	21
II.2. Les différents types de matériaux piézo-électriques.....	21
II.2.1. Les matériaux piézo-électrique naturels	21
II.2.2. Les matériaux piézoélectriques artificiels.....	21
II.3. Avantages et inconvénients des matériaux piézoélectriques	23
II.4. Les caractéristiques des matériaux piézo-électriques.....	24

II.5. Choix des matériaux et des configurations piézoélectriques	24
II.5.1. L'oxyde de Zinc (ZnO)	25
II.5.2. Nitrure d'aluminium (AlN)	25
II.5.3. Zirconate Titanate de Plomb (PZT)	25
II.6. Modélisation du générateur piézoélectrique	26
II.6.1. Architecture du générateur piézoélectrique	27
II.7. Circuit de récupération d'énergie	28
II.7.1. Redresseur	29
II.7.2. Définition de filtre	31
II.7.3. Les hacheur commandable : Étude et analyse	33
II.7.4. Commande hacheur	35
II.8 Conclusion	37

Chapitre III : Simulation et Caractérisation expérimentale.

III.1. Introduction	38
III.2. Logiciel de simulation Proteus	38
III.3. Compilateur de programmation MicroC for Pic	39
III.4. Les étapes à suivre pour la simulation de notre application	39
III.5. 1 ^{ère} Application	40
III.5.1. Source de tension alternative	40
III.5.2. Redressement monophasé double alternance	40
III.5.3. Filtrage	43
III.5.4. Etude et analyse du hacheur commandable	45
III.6. 2 ^{ème} application	51
III.6.1. Montage du dispositif de récupération d'énergie électrique	51
III.6.2. Résultats de simulation sous Isis_Proteus et interprétations	54
III.7. Caractérisation expérimentale	57
III.7.1. Introduction	57
III.7.2. Matériels utilisées	57
III.7.3. Les caractéristiques du disque piézoélectrique	57
III.7.4. Montage réalisé du récupérateur d'énergie piézoélectrique	58

III.7.5. Schéma électronique.....	59
III.7.6. Résultats et interprétations	60
Conclusion générale	61
Bibliographie	
Annexes	
Résumé	

Abréviations

AlN : Nitrure d'aluminium.

BAW : Bulk Acoustic Waves.

CA : Courant alternatif.

CC : Courant continu.

DMA : Dispositif mécanique d'application.

F_c : Fréquence de coupure.

MEMS : Micro-Electro-Mechanical-Systems.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

PVDF : Polyfluorure de vinyldène.

PWM : Pulse Width Modulation.

PZT : Piézoélectrique.

PZT : Titano-Zirconate de Plomb.

SAW : Surface Acoustic Waves.

Si : Silicium.

SR : Système de récupération.

ZnO : Oxyde de Zinc.

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art de récupération d'énergie piézoélectrique

Figure I.1 : Les principales sources de récupération d'énergie.....	4
Figure I.2 : Illustration des effets piézoélectriques directs (a) et inverse (b)	6
Figure I.3 : Résonateur à quartz	9
Figure I.4 : Micro-pompe à un actionneur piézoélectrique	11
Figure I.5 : Mécanisme de la piézoélectricité directe utilisé dans les briquets.....	13
Figure I.6 : Principe d'un transformateur piézoélectrique	14
Figure I.7 : Conversion électromécanique du matériau piézoélectrique.....	15
Figure I.8 : Accéléromètre piézoélectrique.....	16
Figure I.9 : Effet piézoélectrique, calculs de base	17
Figure I.10 : Principe d'un accéléromètre piézoélectrique	17
Figure I.11 : Principe de déroulement de l'échographie.....	18
Figure I.12 : Principe du fonctionnement d'une micro-pompe piézoélectrique.....	19

Chapitre II : Conception et modélisation du dispositif

Figure II.1 : Microstructure de céramique.....	22
Figure II.2 : Le modèle général du capteur PVDF, comprenant : (a) la structure et (b) les directions de sensibilité du capteur	23
Figure II.3 : a) Modèle mécanique	27
Figure II.4 : b) Circuit équivalent.....	27
Figure II.5 : Schéma fonctionnel d'un générateur piézoélectrique.....	28
Figure II.9 : Convertisseur alternatif-continue	29
Figure II.7 : Symbole de diode	29
Figure II.8 : Les filtres	32
Figure II.9 : Symbole d'un hacheur.....	33
Figure II.10 : Schéma d'un hacheur.....	33

Figure II.11 : Schéma d'un hacheur série	34
Figure II.12 : Modulation de largeur d'impulsion	36

Chapitre III : Simulation et Caractérisation expérimentale

Figure III.1 : Schéma explicatif de notre simulation	39
Figure III.2 : Source alternative et oscilloscope sous Isis-Proteus	40
Figure III.3 : Résultats, courant alternatif	40
Figure III.4 : Schéma de simulation de redressement	41
Figure III.5 : Résultat de simulation	43
Figure III.6 : Schéma électronique du pont à diodes avec filtre passe haut	44
Figure III.7 : Résultat de simulation	44
Figure III.8 : Allure de la tension de sortie du hacheur	46
Figure III.9 : Fonctionnement du Hacheur série	47
Figure III.10 : Schéma de simulation	49
Figure III.11 : Résultat de simulation de PWM	50
Figure III.12 : Schéma de simulation	53
Figure III.13 : Résultat de simulation	54
Figure III.14 : Résultat de simulation $ra=1$	54
Figure III.15 : Résultat de simulation $ra=4$	55
Figure III.16 : Résultat de simulation $ra=8$	55
Figure III.17 : Résultat de simulation $ra=12$	56
Figure III.18 : Résultat de simulation max	56
Figure III.19 : Capteur piézoélectrique	58
Figure III.20 : Principe d'un générateur piézoélectrique	58
Figure III.21 : Schéma de récupération d'énergie piézoélectrique	59
Figure III.22 : Résultat sous l'oscilloscope	60

Liste des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art de récupération d'énergie piézoélectrique

Tableau I.1 : Mode de vibrations des résonateurs à quartz..... 9

Chapitre II: Conception et modélisation du dispositif

Tableau II.1 : Caractéristiques piézoélectriques de quelques matériaux..... 24

Tableau II.2 : Les avantages et les inconvénients des matériaux piézoélectriques 26

Chapitre III : Simulation et Caractérisation expérimentale

Tableau III.1 : Valeurs des composants utilisés 49



Introduction générale

Introduction générale

L'alimentation électrique représente un défi majeur pour de nombreux systèmes électroniques portables ou implantés, en particulier dans le domaine biomédical. Les dispositifs biomédicaux modernes nécessitent des sources d'énergie fiables et durables pour fonctionner de manière optimale. Ce mémoire s'inscrit dans le contexte de la récupération d'énergie à partir de sources ambiantes. L'objectif de cette récupération d'énergie est l'alimentation des systèmes autonomes.

Il existe différentes sources d'énergie pouvant être récupérées telles que la lumière, les variations de température et les vibrations mécaniques. Parmi ces sources d'énergie exploitable, notre travail se concentre sur la récupération d'énergie vibratoire mécanique. Cette technologie consiste à récupérer et à convertir l'énergie vibratoire ambiante en énergie électrique. La récupération d'énergie vibratoire est réalisable à l'aide de plusieurs méthodes de transduction, notamment électromagnétique, électrostatique et piézoélectrique. Par les nombreux avantages qu'elle offre, nous nous focalisons dans ce mémoire sur le troisième principe : la piézoélectricité.

La réalisation de ce mémoire est faite en trois chapitres,

Le premier chapitre est consacré à la présentation des sources de récupération d'énergie précisément la piézoélectricité d'où nous établirons l'état de l'art de cette technologie, explorant ses principes fondamentaux, ses applications courantes, et les avancées technologiques récentes.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation des matériaux piézoélectriques, nous explorerons les différents matériaux et montrons leur choix, et on expliquant les étapes de réalisation d'un circuit de récupération d'énergie, basé sur l'architecture de générateur piézoélectrique. Nous introduirons également le concepts de redressement monophasé double alternance, en discutant des différents types de redresseurs, des filtres et des hacheurs, ainsi que de la commande PWM, qui sont essentiels pour optimiser la conversion de l'énergie.

Le dernier chapitre aborde la partie pratique de notre projet, détaillant les étapes nécessaires pour réaliser un système de récupération d'énergie à partir d'un générateur piézoélectrique. Nous y décrivons le processus de redressement, de filtrage, de hachage, ainsi que la commande du hacheur pour charger une batterie. Les résultats expérimentaux sont présentés et analysés.

Ce mémoire s'achèvera par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus, les objectifs de notre travail ainsi que les perspectives proposées pour améliorer les Pratiques futures.

A decorative border in a light blue color, resembling a scroll. It has a vertical strip on the left side that is wider at the top and bottom, with rounded ends. The top and bottom horizontal lines are also wider at the ends, with rounded corners. The right side of the border is a simple vertical line with rounded corners at the top and bottom.

Chapitre I :

**Etat de l'art de récupération
d'énergie piézoélectrique**

I.1. Introduction

Au fil des dernières années, la recherche sur la récupération d'énergie piézo-électrique est devenue un domaine très intéressant. Grâce à cette technologie, il est possible de convertir une source d'énergie (mécanique, thermique, photonique,...) en énergie électrique permettant d'alimenter certains dispositifs. Elle s'étale sur des dispositifs allant d'une échelle industrielle à une échelle miniature. Nous sommes particulièrement intéressés par cette partie MEMS dans ce travail, car il sera question de modéliser et simuler un dispositif miniature permettant de générer des puissances importantes. Avant de passer à la conception de ce type de dispositif, nous allons commencer dans ce chapitre par donner quelques notions sur la récupération d'énergie, nous présenterons ensuite une technique de transduction (piézo-électrique) permettant la récupération d'énergie. Nous donnerons ensuite des notions de la piézoélectricité car c'est cette technique de transduction qui sera retenue par la suite dans notre étude [1].

I.2. Les sources de récupération d'énergie

Depuis des siècles, la récupération d'énergie est présente sous la forme de moulins à vent et à eau, ainsi que des systèmes d'énergie solaire passive, etc...

Grâce aux avancées de la microélectronique et à l'évolution de la récupération d'énergie, il est désormais possible de charger les batteries de manière autonome, ce qui entraîne l'apparition des dispositifs autoalimentés. Ces générateurs ne peuvent pas convertir entièrement l'énergie mécanique récupérée en énergie électrique en raison des pertes énergétiques. C'est pour cela il est essentiel d'utiliser un convertisseur d'énergie approprié pour chaque source de récupération afin de transformer l'énergie d'entrée en énergie utile et de la forme souhaitée.

Ces sources peuvent être classées en quatre catégories:

- **Source de température :** Dans ce cas, la source d'énergie à convertir est la chaleur ou une variation de température. Les micros générateurs conçus à cet effet ont un rendement faible qui ne dépasse pas le 10% [2].
- **Source de rayonnement :** Il existe divers types de rayonnement pouvant être utilisés pour la conversion électrique. Les rayonnements solaires, nucléaires et les rayonnements radiofréquences sont des exemples les plus développés depuis quelques années.

- **Source d'énergie cinétique** : Les exemples les plus connus sont l'énergie hydroélectrique et l'énergie éolienne, qui permettent de récupérer respectivement l'énergie de l'eau et l'énergie du vent. Dans le cas de grandes éoliennes par exemple, la puissance maximale générée peut être très importante, de l'ordre de 2MW. Cette énergie récupérée peut ensuite être réinjectée sur le réseau électrique [3].
- **Source d'énergie mécanique**: nous pouvons citer trois types des ressources mécaniques comme les activités domestiques et industrielles, ainsi que les activités du corps humain qui pouvant être naturels comme la chaleur du corps, la respiration, les battements du cœur et autres volontaires (pédaler, tourner une manivelle, la marche...) [2].

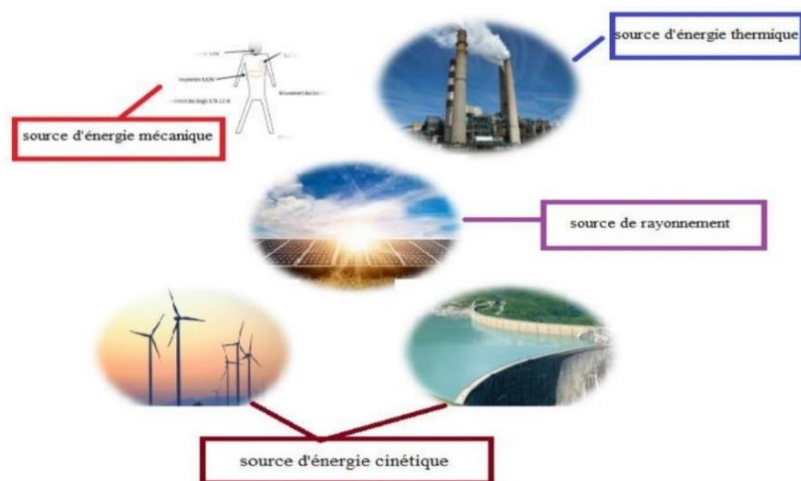


Figure I.1: Les principales sources de récupération d'énergie [3].

I.3. Historique de la piézoélectricité

L'effet piézoélectrique direct est connu depuis l'antiquité. Il y a en effet trois mille ans que les Indiens de Ceylan connaissent les propriétés des sels de tourmaline. D'après une étude sur l'histoire de la piézoélectricité réalisée par Ballato en 1996 [4].

C'est Coulomb qui a démontré le premier que l'électricité peut être produite par l'application d'une pression. Mais la découverte de la piézoélectricité reste toujours attribuée aux frères Curie.

- ❖ Découverte des frères Curie (1880) : Pierre et Jacques Curie (Physiciens français), découvrent la piézoélectricité en observant que certaines substances, principalement les cristaux comme le quartz, génèrent une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Ils énoncent le principe de la piézoélectricité. Ils y apportèrent à

la fois la preuve expérimentale du phénomène et une théorie élaborée. Ils établirent la relation de linéarité entre la contrainte exercée et les charges électriques mesurées et énoncèrent les règles de symétrie auxquelles doit satisfaire un matériau pour présenter un effet piézoélectrique [5].

- ❖ Développements préliminaires (début du 20^e siècle) : Gabriel Lippmann (Physicien français) et Woldemar Voigt (Physicien allemand), développent des théories pour expliquer le phénomène piézoélectrique. Lippmann introduit le terme « piézoélectricité » en 1881 [6]
- ❖ Applications pendant la Première Guerre mondiale par Paul Langevin (Physicien français) : La piézoélectricité est utilisée dans les sonars pour la détection sous-marine, offrant un avantage stratégique pendant la guerre [7].
- ❖ Seconde Guerre mondiale : La technologie piézoélectrique est intégrée dans des détecteurs acoustiques et des générateurs de fréquences pour les applications militaires.
- ❖ Boom industriel (années 1950-1960) : La piézoélectricité connaît une expansion significative. Des matériaux piézoélectriques synthétiques sont développés, élargissant les applications dans les capteurs, les transducteurs et les dispositifs piézoélectriques.
- ❖ Électronique grand public (années 1970) : La piézoélectricité devient omniprésente dans les dispositifs électroniques grand public, tels que les buzzeurs Piézoélectriques.
- ❖ Avancées contemporaines (années 1980 à aujourd'hui) : La piézoélectricité est utilisée dans l'échographie médicale, les capteurs automobiles (airbags), et elle joue un rôle clé dans l'industrie des semi-conducteurs [8].
- ❖ Recherche actuelle : L'objectif de la recherche est d'améliorer les performances des matériaux piézo-électrique, de miniaturisée les applications pour l'électronique portable et de développer des générateurs piézo-électrique pour la récupération d'énergie.

L'étude ces étapes, vous permettra de saisir l'évolution de la piézoélectricité, depuis sa découverte initiale à son impact actuel sur différents domaines technologiques et industriels.

I.4. Définition de la piézo-électricité

Le mot « piézo » signifie "appuyer" ou "presser".

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux cristallins à produire une charge électrique proportionnelle à la contrainte mécanique qui les déforme, cet effet appelé « effet piézoélectrique direct », et ce phénomène est réversible quand l'application d'un champ électrique externe provoque une déformation mécanique du matériau [5].

La première démonstration de l'effet piézoélectrique direct et indirect était en 1880-1881 par les frères Pierre et Jacques Curie, ils ont montré que le quartz soumis à une tension électrique vibre à une fréquence très stable et bien définie c'est l'effet piézoélectrique indirect c'est pour cette propriété que le quartz est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges en appliquant au quartz une tension provenant d'une pile celui-ci vibre et permet la mesure du temps la piézoélectricité directe est utilisée dans les briquets pour créer une charge électrique qui donne feu au gaz [5].

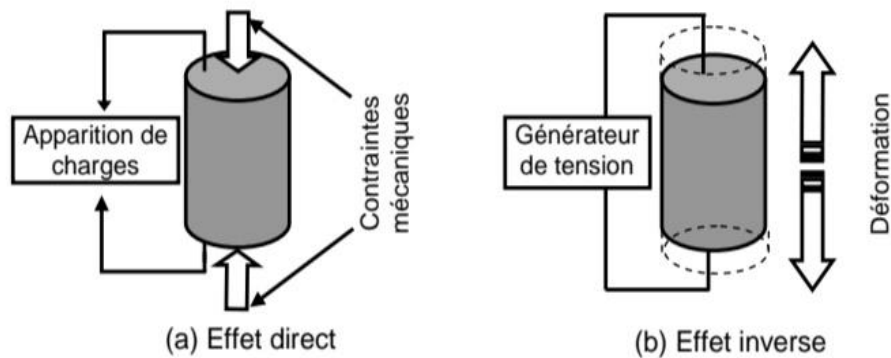


Figure I.2 : Illustration des effets piézoélectriques directs (a) et inverse (b) [9].

I.5. Avantages et inconvénients de la technologie piézoélectrique

A. Avantages de la technologie piézoélectrique

La piézoélectricité présente plusieurs avantages, notamment son utilisation dans la génération d'énergie renouvelable à partir de vibrations mécaniques, sa capacité à convertir des signaux acoustiques en signaux électriques, et son application dans les capteurs sensibles aux variations de pression.

- **Génération d'énergie renouvelable** : Grâce à sa capacité à transformer les vibrations mécaniques en électricité, il est possible de générer des sources d'énergie renouvelable, notamment dans les capteurs autonome, les dispositifs portables ...
- **Sensibilité et réactivité** : Les capteurs piézoélectriques présentent une grande sensibilité et précision, une réponse rapide, ce qui les rend très utiles dans des domaines industrielle et la recherche scientifique.
- **Applications médicales** : La piézoélectricité est utilisée dans les transducteurs ultrasonores pour l'imagerie médicale, offrant une méthode non invasive pour visualiser des structures internes du corps.
- **Fiabilité et durabilité** : Les appareils piézo-électriques sont souvent privilégiés en raison de leur solidité, de leur faible maintenance et de leur longévité, ce qui les rend adaptés à différents applications industrielles.
- **Adaptabilité des matériaux** : Différents types de matériaux piézoélectriques, tels que cristaux, céramiques et polymères, peuvent être adaptés à des applications spécifiques en fonction des besoins.
- **Sans émissions nocives** : La piézoélectricité est une alternative écologique qui ne nécessite pas l'emploi de substance nocive ou de carburants [10].

Ces avantages font de la piézoélectricité une technologie polyvalente qui trouve de nombreuses applications dans différents secteurs industriels et scientifiques.

B. Inconvénients

Il est important de noter que malgré ces avantages, la technologie piézoélectrique présente également de nombreux inconvénients dans certaines applications

Les principaux inconvénients de la technologie piézoélectrique comprennent :

- **Sensibilité aux températures extrêmes** : Les dispositifs piézoélectriques peuvent être sensibles aux variations de température, ce qui peut altérer leur performance dans des environnements extrêmes.
- **Réponse fréquentielle limitée** : Certains dispositifs piézoélectriques ont une plage de fréquences restreinte, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications nécessitant des fréquences spécifiques.

- **Fragilité des matériaux piézoélectriques** : Les matériaux piézoélectriques peuvent être fragiles et sujets à la fatigue, ce qui pourrait réduire leur durée de vie opérationnelle, notamment dans des conditions de charge répétitive .
- **Nécessité d'une conception précise** : La conception des dispositifs piézoélectriques doit être minutieuse pour optimiser leur rendement énergétique, ce qui peut augmenter la complexité du processus de conception [11].

I.6. Les applications de la piézoélectricité

I.6.1. Transducteurs acoustiques

Le transducteur, dans le sens propre du terme, représente le convertisseur entre deux domaines d'énergie reçue sous une forme donnée (par exemple : mécanique, thermique...) en énergie utilisable sous une forme différente (par exemple : acoustique, électrique...), en question sans aucune électronique ou traitement de signal.

Dans le cas de transducteurs électroacoustiques et électromécaniques, c'est l'énergie électrique (signal) qui est transformée en énergie acoustique (onde sonore) ou mécanique et vice-versa [12].

On peut produire une onde acoustique de surface ou de volume dans un matériau piézoélectrique grâce à l'effet piézoélectrique indirect.

En cas de phase ou d'opposition de phase entre les ondes réfléchies et l'onde incidente, l'impédance du matériau atteint respectivement un niveau minimum ou maximum, ce qui génère une résonance ou une antirésonance.

Ce principe est utilisé pour réaliser des filtres acoustiques à ondes de surface, Surface Acoustic Waves filters (SAW filters) ou de volume Bulk Acoustic Waves filters (BAW filters) réalisés des filtres à plus haute fréquence, notamment utilisés dans plusieurs domaines :

- Dans les gammes de fréquences audibles, on réalise des microphones piézoélectriques (et en particulier des microphones de contact) et des haut-parleurs, notamment dans les téléphones portables.
- Dans les sonars, utilisés dans la marine, mais aussi dans l'automobile, pour la détection d'obstacles [18].

Le marché SAW représentait 997,7 millions d'euros en 2010, 1,1 milliard d'euros en 2011 et devrait atteindre 1,8 milliard de dollars en 2018. Deux peignes métalliques sont déposés sur une couche piézoélectrique permettant d'émettre et recevoir une onde acoustique en surface du dispositif. Il s'agit d'une technologie bas coût et permettant de réaliser des filtres jusqu'à une fréquence de 2 GHz environ [13].

I.6.2. Résonateur piézoélectrique à quartz

Un résonateur est un appareil qui est maintenu en vibration à une fréquence bien définie (appelée fréquence propre ou de résonance) parmi ses différentes fréquences de résonance possibles et sert de base de temps dans les systèmes électroniques. Dans un exemple, il est composé d'un morceau de quartz bien dimensionné et orienté en fonction de l'utilisation prévue. La fréquence de résonance, qui est inversement proportionnelle à l'épaisseur du résonateur, sera déterminée par ses dimensions et sa coupe. Les électrodes de ce quartz sont généralement en or, parfois en argent ou en aluminium. La taille et la matière de ces électrodes va également avoir une influence sur les propriétés du résonateur par un effet de « mass loading » (effet de la masse des électrodes sur la fréquence de résonance [14].

- Résonateurs BAW à quartz : BAW : Bulk Acoustic Wave.

Le matériau piézoélectrique le plus utilisé en configuration BAW est le Quartz. Le résonateur est constitué d'un cristal de quartz, taillé suivant un axe cristallographique particulier et placé entre deux fines électrodes métalliques (Figure I.3).

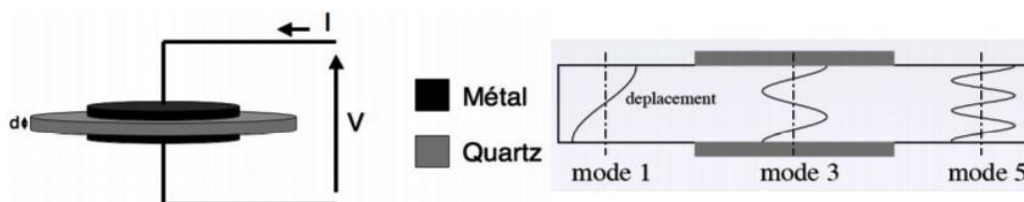


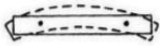
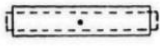
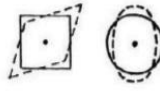

Figure I.3 : Résonateur à quartz [15].

Une onde acoustique se propage en fonction de l'épaisseur de la capuche piézoélectrique lorsque l'application d'une tension alternative entre les électrodes est effectuée. L'onde se réfléchit sur les interfaces matériaux air, qui sont des miroirs acoustiques naturels. En conséquence, l'énergie acoustique reste confinée dans le résonateur. Ce système détient une fréquence très précise appelée « fréquence de résonance », qui permet aux différentes réflexions

Chapitre I : Etat de l'art de récupération d'énergie piézoélectrique

présentes aux interfaces de se recombinaient de manière positive et de produire une onde stationnaire. Le mode de vibration du résonateur est déterminé par la polarisation de cette onde (Tableau I.1) [15].

Tableau I.1 : Mode de vibrations des résonateurs à quartz [15].

Axe de taille	Mode de vibration	Déformée	Gamme de fréquence
XY,NT	Flexion		1 à 100 kHz
X, X+5°	Élongation		50 à 200 kHz
CT,DT	Cisaillement de surface		150 à 800 kHz
AT, BT, FC, SC	Cisaillement d'épaisseur		1 à 300 kHz

La fréquence de résonance est donnée par la relation $f(\text{résonance}) = V(\text{acoustique})/2d$ pour un mode d'élongation d'épaisseur. Elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche piézoélectrique d et dépend de la vitesse de propagation V acoustique des ondes mécaniques dans ce matériau. Ainsi, une diminution de l'épaisseur de la couche piézoélectrique entraîne une augmentation de la fréquence. Une épaisseur de quelques micromètres est nécessaire pour atteindre des fréquences de l'ordre du GHz. Il devient alors extrêmement difficile de tailler un cristal massif. De plus, l'importance de l'épaisseur des électrodes, qui était jusqu'à présent considérée comme minime par rapport à celle du quartz, commence à devenir importante dans le calcul de la fréquence de résonance. Les techniques microélectroniques telles que la pulvérisation cathodique DC ou l'ablation laser peuvent être utilisées pour déposer des matériaux céramiques piézoélectriques (AlN, ZnO, PZT) en couches minces (100nm à 1µm) et donc de résoudre le problème de l'épaisseur [14].

I.6.3. Actionneurs et moteurs piézoélectrique

Les actionneurs et moteurs piézoélectriques bénéficient de l'effet piézoélectrique inverse : dans ces dispositifs, un champ électrique est utilisé pour entraîner une déformation ou un mouvement électrique.

On appelle actionneur piézoélectrique des actionneurs monoblocs contrôlables, utilisant la déformation cause par une tension électrique pour commander le déplacement. Les actionneurs différents des moteurs piézoélectriques par le fait qu'ils ne sont pas monoblocs mais composés de plusieurs parties mobiles qui se déplacent entre elles.

➤ Actionneurs

Le principe de cet actionneur est basé sur l'application d'un champ électrique sur un cristal piézoélectrique (Figure I.4). L'effet piézoélectrique est lié au couplage qui existe entre la déformation mécanique et celui de la polarisation électrique.

Dans le concept de l'actionneur piézoélectrique, l'idée de base est de convertir l'effort transversal piézoélectrique à un déplacement perpendiculaire. La fabrication des actionneurs piézoélectriques intégrés dans les microsystèmes à base de silicium (Si) requiert le dépôt d'une couche mince supplémentaire de matériau piézoélectrique sur le silicium.

Ce processus, étant relativement complexe. Cela explique pourquoi la plupart des micro-pompes à base de (Si) se manifestent généralement en un disque piézoélectrique collé sur le diaphragme de la micro-pompe [16].

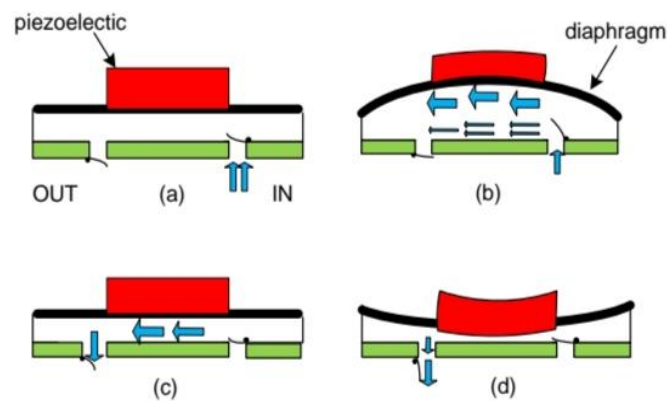


Figure I.4 : Micropompe à un actionneur piézoélectrique : (a) état initial ; (b) application d'un champ électrique cause une déflexion de la membrane vers le haut (aspiration du liquide) ; (c) et (d) la tension est éliminée cause une déflexion de la membrane vers le bas (pompage) [16].

Les micro actionneurs répondent rapidement. Ils agissent avec une puissance et une rapidité remarquable. La déformation est influencée par une tension électrique élevée.

➤ Moteur piézoélectrique

Les moteurs piézoélectriques, ou « piézomoteurs », utilisent l'effet piézoélectrique inverse pour convertir un signal électrique en mouvement continu, rotatif ou linéaire. On parle parfois également de « moteur ultrasonique », en référence à la gamme de fréquences dans laquelle sont activés les éléments piézoélectriques. Il existe plusieurs principes de fonctionnement, qu'on peut classer en grandes familles selon que le mouvement est généré par une onde stationnaire ou une onde progressive produite dans le matériau piézoélectrique [17].

Les principales caractéristiques des moteurs piézoélectriques sont les suivants :

- Ils sont connus pour leur haute précision, et leur rapidité ;
- ils présentent des vitesses lentes ; voire silencieux
- ils peuvent être facilement miniaturisés ;
- ils présentent une excellente proportion de poids/puissance ;

En revanche :

- ils nécessitent alimentations électriques à hautes fréquences ;
- ils ont une durée de vie limitée à cause des effets de frictions ;
- les céramiques piézoélectriques peuvent être coûteuses et délicates à intégrer au dispositif.

Les moteurs piézoélectriques sont principalement utilisés dans des applications où leur petite taille répond à des exigences d'encombrement comme les systèmes autofocus pour les appareils photographiques et les mécanismes de vitre électrique pour les voitures, etc ... [18].

I.6.4 Générateurs et transformateurs

L'allume-gaz et le briquet « électronique » sont des exemples de la manière dont les piézoélectriques permettent de produire de fortes tensions. L'effet piézoélectrique direct permet de produire de très fortes tensions, supérieures à 30 kV/cm pour un écartement de quelques millimètres. la tension de claquage de l'air Lorsque cette tension est atteinte, une étincelle de décharge est produite et mise à profit pour allumer le gaz du briquet ou de la gazinière [5].

Les transformateurs piézo-électriques ont vu le jour à la suite du développement des céramiques ferroélectriques de la famille cristalline des pérovskites, qui ont continué de s'améliorer depuis les années 1950.

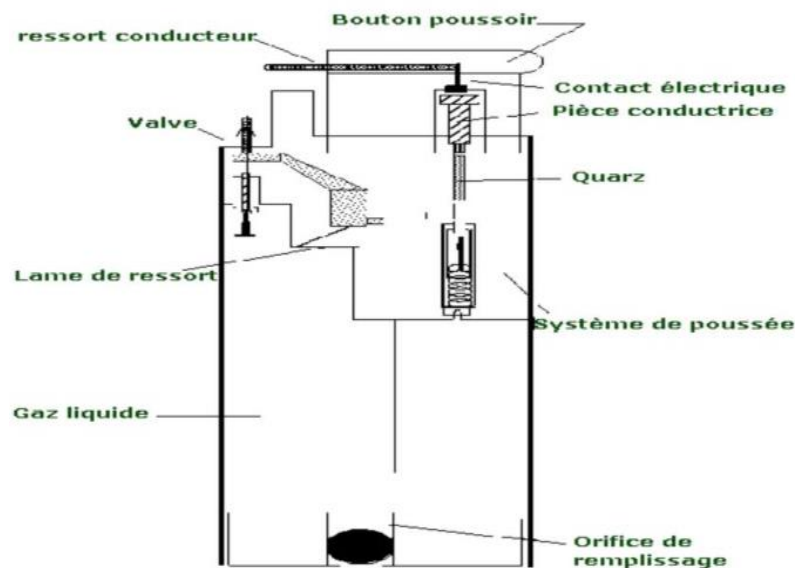


Figure I.5 : Mécanisme de la piézoélectricité directe utilisé dans les briquets [19].

Les transformateurs piézo-électriques, en plus de leur compacité, offrent des performances exceptionnelles en termes de gain en tension et sont utiles pour les applications nécessitant une adaptation de tension ou une isolation galvanique. Ils sont idéaux pour les applications de faible puissance à haut rendement. Cependant, les transformateurs piézoélectriques ont été déposés en 1931. A cette époque, l'électronique n'était pas à un stade aussi avancé qu'aujourd'hui et les circuits électroniques d'alimentation étaient chers et encombrants. Avec les travaux de Rosen et son équipe en 1957 et le développement des céramiques à base de titanate de baryum, les transformateurs piézoélectriques trouvèrent leurs premières applications en tant que filtres passe-bande et alimentation haute tension [5].

Les transformateur magnétique classique sont employés dans la majorité des systèmes électroniques pour fournir et transformer l'énergie. Les éléments sont plutôt lourds, volumineux et onéreux. De plus, l'actuelle miniaturisation demande des fréquences de découplage de plus en plus élevées, ce qui peut entraîner des problèmes d'émissions électromagnétiques susceptibles de perturber les systèmes. Il a été nécessaire de concevoir ou de développer de nouvelles technologies afin de poursuivre le processus de miniaturisation. Les transformateurs piézoélectriques présentent des

puissances volumiques accrues et produisent moins de perturbations électromagnétiques. Ces caractéristiques en font les candidats parfaits pour la miniaturisation.

Le transformateur piézoélectrique fonctionne en deux conversion électromécanique (effet piézoélectrique inverse) puis mécano-électrique (effet piézoélectrique direct) de l'énergie

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

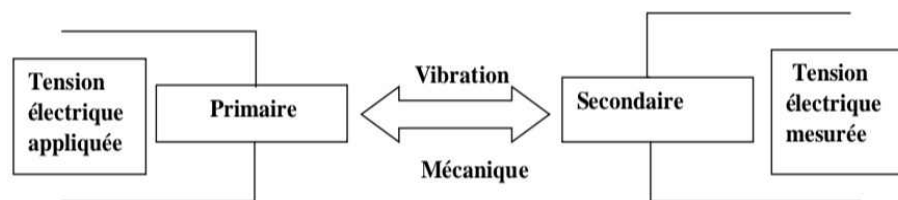


Figure II.6 : Principe d'un transformateur piézoélectrique [21].

Un générateur piézoélectrique est un dispositif qui exploite la piézoélectricité. Fonctionne en déformant un matériau piézoélectrique de façon à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les cristaux piézo-électrique utilisés dans le générateur piézoélectrique sont généralement fabriqués en céramique ou en quartz, et sont disposés d'une manière à être soumis à des contraintes mécaniques. Quand ces cristaux subissent une déformation, ils produisent une charge électrique qui peut être recueillie et exploitée comme énergie.

La structure habituelle des générateurs piézoélectriques est une poutre encastrée libre, une couche de matériau piézoélectrique déposée et une masse sismique pour réduire la fréquence de résonance (Figure 1.7) [3].

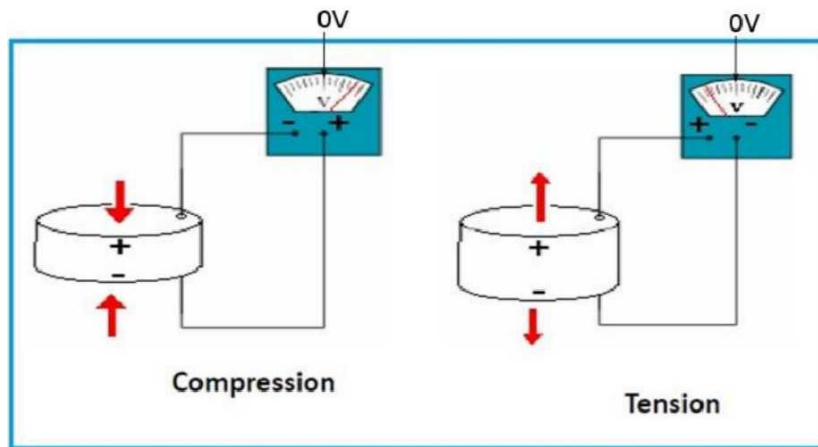


Figure II.7: Conversion électromécanique d'un matériau piézoélectrique [22].

Il est possible d'utiliser ces générateurs dans divers applications, comme la récupération d'énergie grâce aux vibrations environnementales, la recharge de petits appareils électroniques ou même l'alimentation de capteur sans fil. Ils sont légers, résistants et proposent une option intéressante pour tirer parti de l'énergie disponible dans notre environnement.

Un exemple étudié est l'incorporation d'un film piézoélectrique dans des chaussures de sport afin de produire de l'énergie grâce à la pression du talon lors de la marche. Les faibles puissances produites pourraient suffire à terme à alimenter certains dispositifs électroniques.

En tant que deuxième exemple, on peut citer la sonnette de maison sans fil et sans pile de la société française (Arveni S.A.S.). Ils récupèrent l'énergie mécanique générée par la pression du doigt sur un bouton. Une fois récupérée, l'électricité sert à alimenter un circuit radio, qui émet un message vers le récepteur. (Signal sonore)

La récupération d'énergie par microgénérateur piézoélectrique, est un domaine technique émergent. Au fil du temps, l'idée est de remplacer les piles par des microsources d'énergie renouvelable, pour toutes les applications communicantes, où une énergie mécanique extérieure existe.

I.7. Les applications de la piézoélectricité dans le domaine biomédical

I.7.1 Accéléromètre piézoélectrique

On utilise les accéléromètres piézoélectriques pour évaluer ou mesurer les vibrations mécaniques, les accélérations du mouvement, en convertissant les forces mécaniques en signaux électriques, qui ne sont pas exclusivement utilisés dans les secteurs aéronautique et automobile. Il

existe de multiples applications en médecine. D'où Les accéléromètres piézoélectriques sont largement utilisés en biomédecine pour diverses applications, y compris les dispositifs médicaux. L'une des applications les plus importantes est le contrôle actif des pacemakers [23].

Un pacemaker est un régulateur du rythme cardiaque implanté dans le corps du patient qui doit fonctionner sans cesse, que le patient soit au repos ou en phase s'exercices physiques. Il se compose d'une pile, sonde, capteur (accéléromètre) et partie électronique. Le système étant implanté, les exigences en termes de faible consommation, faibles dimensions, masse et durée de vie des batteries très fortes. Un tel accéléromètre détecte tout changement d'activité physique. Ainsi, quand le patient commence à courir, le pacemaker modifié les impulsions électriques envoyées au cœur pour les adapter à l'intensité de l'effort physique. Ce capteur ayant besoin d'une excitation en courant [24].

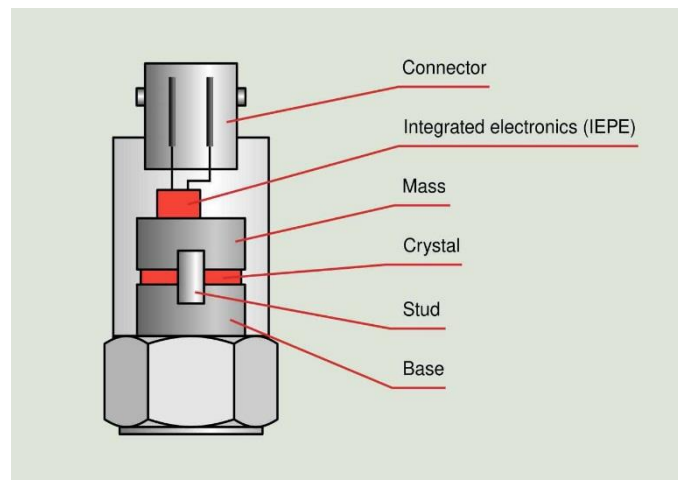


Figure I.8 : Accéléromètre piézoélectrique [25].

A. Le principe de fonctionnement

Le matériau piézoélectrique est l'élément actif de l'accéléromètre. L'effet piézoélectrique à l'aide d'un disque de compression est montré par (la figure I.9). Un disque de compression ressemble à un condensateur avec le matériau piézocéramique pris en sandwich entre deux électrodes. Une force appliquée perpendiculairement au disque provoque une production de charges et une tension aux électrodes. [26].

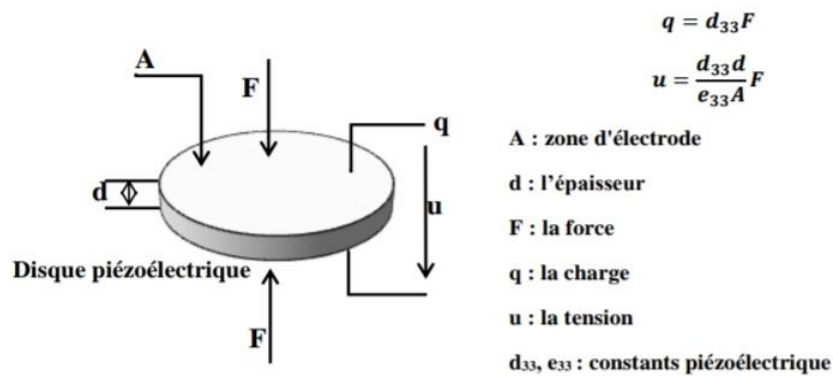


Figure II.9 : Effet piézoélectrique, calculs de base [26].

L'élément sensible d'un accéléromètre piézoélectrique se compose de deux parties principales :

- Matériau piézoélectrique.
- Masse sismique.

Un côté du matériau piézoélectrique est connecté à un montant rigide à la base du capteur et la masse sismique est attachée à l'autre côté. Lorsque l'accéléromètre est soumis à des vibrations, une force est générée qui agit sur l'élément piézoélectrique (la figure I.10). Selon la loi de Newton, cette force est égale au produit de l'accélération et de la masse sismique. Par l'effet piézoélectrique, une charge de sortie proportionnelle à la force appliquée est engendrée. La masse sismique étant constante, alors; le signal de sortie de charge est proportionnel à l'accélération de la masse [26].

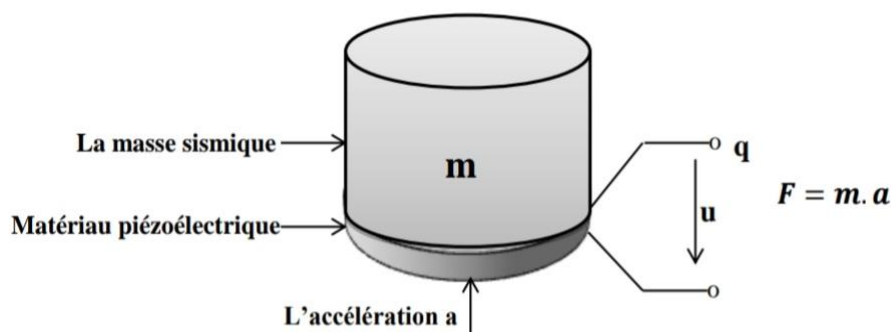


Figure I.10 : Principe d'un accéléromètre piézoélectrique [26].

I.7.2. Echographie

L'échographie est une évaluation sans douleur qui permet de surveiller et de contrôler le développement du fœtus pendant la grossesse est réalisée avec des ultrasons. En règle générale, l'échographe est constituée d'une céramique piézoélectrique (PZT) qui se trouve dans la sonde. Lorsqu'elle est soumise à des impulsions électriques, elle convertit l'onde électrique envoyée par l'échographe en une onde ultrasonore qui peut se propager dans le corps de la patiente. Les ondes sonores appelées ultrasons ont des fréquences très élevées (> 20 KHz) qui vont traverser les tissus et se réfléchir lorsqu'ils rencontrent un obstacle avant de revenir vers la sonde. Par la suite la sonde va capter ces ondes acoustiques, les transformer en signaux électriques, et les envoyer vers l'échographe qui pourra transformer ces échos en images. Contrairement aux rayons X, les ultrasons ne présentent aucun danger pour le patient et n'est pour l'utilisateur, ce qui les rend particulièrement pertinents pour les applications médicales [27].

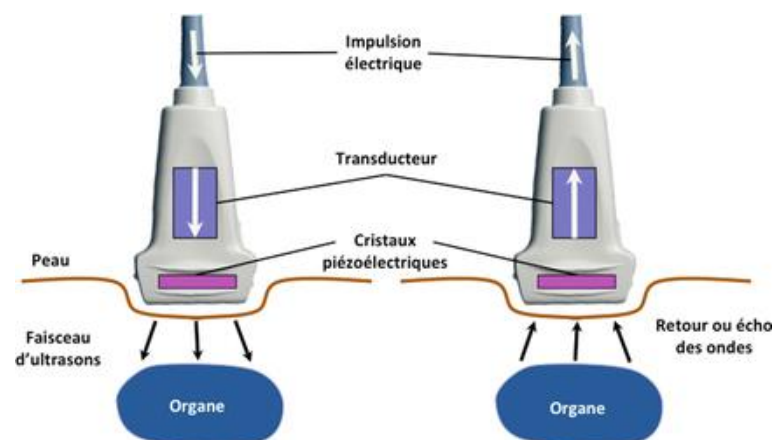


Figure I.11 : Principe de déroulement de l'échographie [28].

I.7.3. Micro-pompes piézoélectrique

L'une des applications de la piézoélectricité les plus courantes est l'utilisation des micro-pompes d'où sont utilisés pour contrôler le taux d'insuline délivré à base d'un actionneur piézo-électrique.

Les micro-pompes piézoélectriques sont des actionneurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) utilisés pour véhiculer le fluide. Elles se réfèrent généralement aux pompes fabriquées à l'échelle microscopique. La composition d'une micro-pompe piézoélectrique est une chambre de pompage reliée aux orifices d'entrée et de sortie, avec des micro-valves unidirectionnelles pour réguler la direction d'écoulement du fluide [29].

A. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la micro-pompe est montré schématiquement à (la Figure I 13). Le système comprend des parties électriques et mécaniques. Les parties électriques fournissent la tension électrique et sont munies d'un détecteur de signal électrique et d'un contrôleur électronique. Les parties mécaniques comprennent la chambre de pompage, la membrane, l'actionneur piézoélectrique et les valves d'entrée et de sortie.

La chambre de pompage est fermée par un diaphragme et un actionneur piézoélectrique déposé sur le dessus. Lorsque la tension d'alimentation AC est appliquée, le contrôle électronique convertit l'énergie électrique en travail mécanique (pour augmenter ou diminuer le volume de la chambre). L'actionneur piézoélectrique se dilate et se rétrécit périodiquement, ce qui provoque la déflexion du diaphragme vers le haut et vers le bas. Lorsque le matériau piézoélectrique agit sur (pousser et tirer) le diaphragme, Cela provoque la variation de pression dans la chambre pour le refoulement du liquide (la soupape de sortie s'ouvre pour permettre au fluide de sortir du système. Tandis que la valve d'entrée est fermée, et vice-versa.) [29-30].

La micro-pompe illustrée par la Figure I.12 ci-dessous est divisée en quatre parties :

- La chambre de transition des médicaments;
- Les micro-valves unidirectionnelles, telle que la valve d'entrée (reliée à un réservoir extérieur des médicaments);
- Le circuit de contrôle;
- L'actionneur. [16]

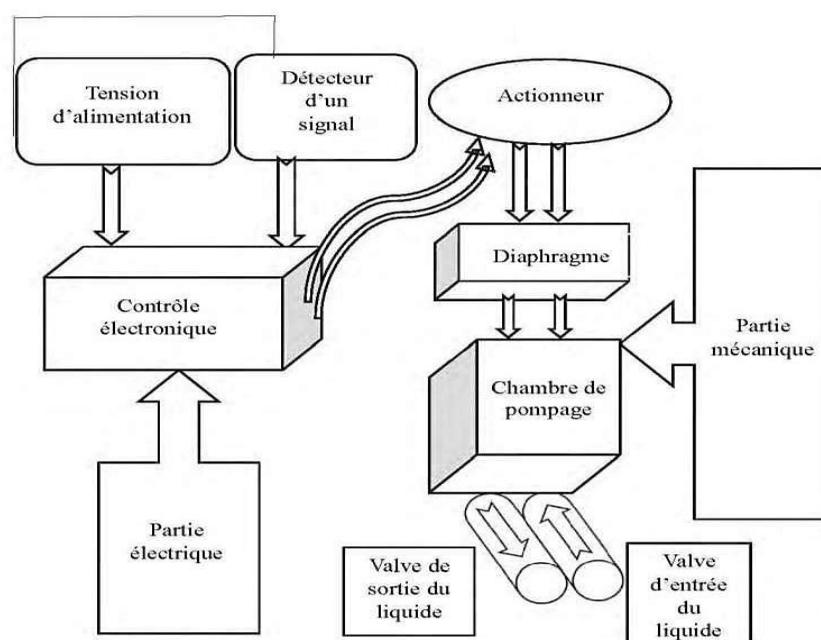


Figure I.12 : Principe du fonctionnement d'une micro-pompe piézoélectrique [16].

Les micro-pompes piézo-électrique présentent des avantages car elles conviennent parfaitement aux applications qui exigent une précision, une faible puissance, une hygiène ou une stérilité optimale dans le milieu de transport. Elles sont donc bénéfiques dans plusieurs secteurs.

I.8. Conclusion

Ce chapitre est un état de l'art sur la récupération d'énergie piézo-électrique qui permet de convertir les vibrations mécaniques en électricité et inversement. En insistant sur les ressources qui pourraient être exploitées au développement de systèmes de récupération d'énergie ambiante pour alimenter un dispositif médical. Dans lequel, nous avons présenté de nombreuses applications dans différents domaines biomédical et en général. Dans le domaine biomédical nous avons présenté l'échographe, l'accéléromètre, la micropompe et le générateur piézo-électrique qui sont vastes et variées. En général elle peut être utilisée dans de nombreux domaines, tels que les résonateurs, les actionneurs et moteurs piézoélectrique. En résumé, la récupération d'énergie piézo-électrique offre de nombreuses possibilités pour exploiter les vibrations mécaniques et contribuer à une utilisation plus efficace de l'énergie.

A decorative border in a light blue color, resembling a scroll. It features a vertical strip on the left side that is wider at the top and bottom, with rounded ends. The main body of the border is a horizontal rectangle with rounded corners. The top-right and bottom-right corners of the rectangle have small, elegant scroll-like flourishes.

Chapitre II :

Conception et modélisation du dispositif

II.1. Introduction

Effet piézoélectrique a été découvert par Pierre et Jacques Curie en 1880, est représenté un lien entre deux vastes domaines de la physique que sont l'électromagnétisme et l'acoustique. L'intérêt majeur de ce phénomène réside dans le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Il offre la possibilité d'influencer l'état mécanique d'une structure en utilisant un champ électrique ou inversement. Au cours des dernières décennies, l'utilisation de la piézoélectricité a conduit à des applications dans des domaines extrêmement divers, allant des méthodes de mesure telles que les capteurs ultrasonores, à l'énergie renouvelable telle que les récupérateurs d'énergie. Il y a environ soixante ans, la piézoélectricité a été intégrée dans un domaine d'application prometteur, à savoir l'électronique de faible puissance.

II.2. Les différents types de matériaux piézo-électriques

Depuis sa découverte, les matériaux piézoélectriques sont largement utilisés pour la possibilité d'exploiter l'effet direct ou inverse ou les deux simultanément.

Les matériaux piézoélectriques sont classés en deux groupes naturels et artificiels, chacun d'eux a ses propres caractéristiques.

II.2.1. Les matériaux piézo-électriques naturels**II.2.1.1. Les cristaux**

Le cristal piézo-électrique le plus connu est le quartz, mais ses caractéristiques ne sont pas très intéressantes pour les utilisations en tant que transducteurs médicaux : son impédance acoustique est plutôt élevée et son coefficient de couplage est très faible. D'autres matériaux, tel que le Niobate de Lithium (LiNbO_3) ou le Tantalate de lithium (LiTaO_3) affichent des valeurs de coefficients de couplage plus élevées, son coût est très élevé et aussi caractérisé par sa fragilité ce qui implique une utilisation secondaire de ce produit [31-32].

II.2.2. Les matériaux piézoélectriques artificiels

Ce sont des matériaux ferroélectriques qui présentent un phénomène piézoélectrique après polarisation. Dans les matériaux piézoélectriques artificiels on trouve Les céramiques, les polymères et les composites.

II.2.2.1. Les céramiques

Les céramiques piézoélectriques sont neib tnevuos adaptés pour une utilisation en contrôle de vibration. En effet, il y a une multitude de compositions différentes dont les caractéristiques diélectriques et mécaniques diffèrent considérablement, ce qui permet de trouver toujours une céramique adaptée à une application spécifique. Entre autres, on peut mentionner les titanates de baryum qui sont les fondements des céramiques modernes, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui comprend cinq à six compositions différentes et qui est la plus couramment utilisée ; les titanates de plomb qui sont de plus en plus compétitifs par rapport aux PZT, et enfin les métaniobates de plomb utilisés dans l'imagerie haute résolution [31].

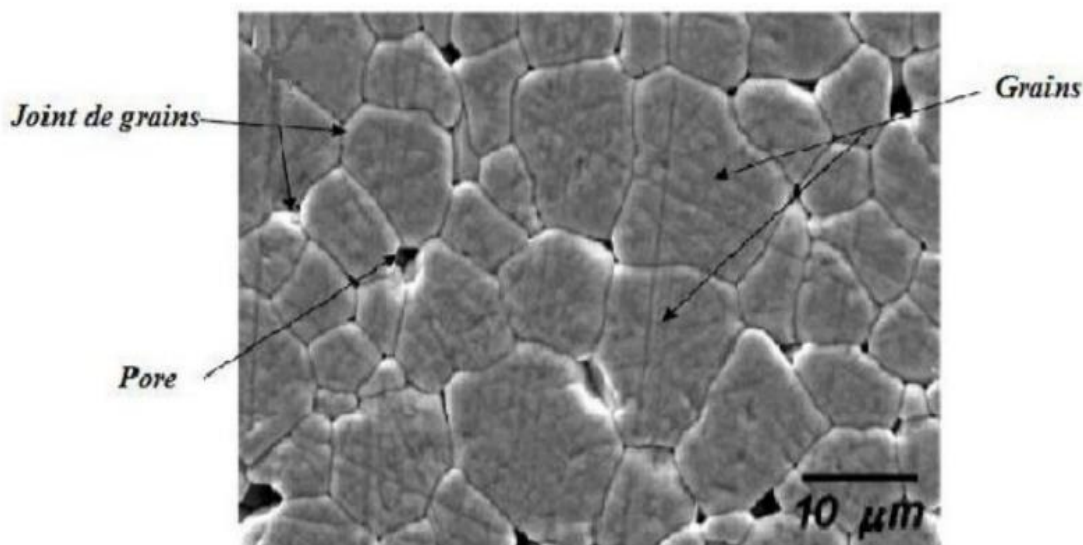


Figure II.1 : Microstructure de céramique [33].

II.2.2.2. Les polymères

Certains polymères tel que le PVDF (PolyVynilDiFluorure) et des copolymères tel que le PVDF-TrFE peuvent acquérir des propriétés piézoélectriques. Ils possèdent une épaisseur pouvant être très faible et une grande flexibilité qui les rend adaptables à des surfaces non planes. Ils ont été éprouvés et sont utilisés dans diverses applications. Ils sont efficaces en tant que capteurs grâce notamment à leur faible hystérésis. Cependant leur faible coefficient de couplage électromécanique les pénalise en temps qu'actionneurs. Ils présentent de plus des pertes diélectriques élevées [31-34].

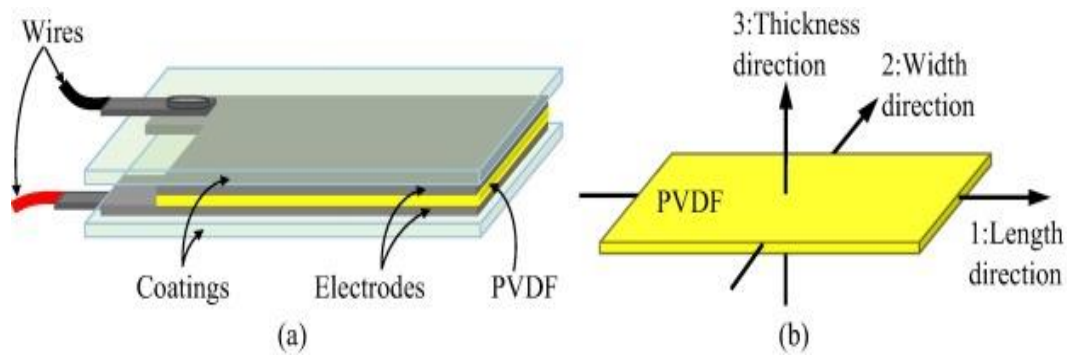


Figure II.2 : Le modèle général du capteur PVDF, comprenant : (a) la structure et (b) les directions de sensibilité du capteur [35].

II.2.2.3. Les composites

Dans les composites, le matériau piézoélectrique est séparé et immergé dans une matrice non piézoélectrique (une résine). Les composites se sont révélés plus intéressants que les céramiques traditionnelles dans le domaine des transducteurs acoustiques haute fréquence pour l'imagerie, grâce à leur coefficient de couplage électromécanique amélioré et à leur impédance acoustique plus adaptée [31].

II.3. Avantages et inconvénients des matériaux piézoélectriques

A. Avantages

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

B. Inconvénients

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

Ces avantages et inconvénients permettent de guider le choix des matériaux piézoélectriques en fonction des exigences spécifiques de l'application visée [31].

II.4. Les caractéristiques des matériaux piézo-électriques

Tableau II.1 : Caractéristiques piézoélectriques de quelques matériaux [36].

	Cristaux	Céramiques			Polymère
Matériaux	Quartz SiO ₂	BaTiO ₂	PZT	LiNbO ₂	PVDF
Densité g.cm⁻³	2.65	5.7	7.5	4.65	1.76
Constante diélectrique	4.5	1700	200-4000	40	12
Température du Curie en °C	573	130	<350	1210	180
Constante de charge d₃₃ × 10⁻¹² (C/N)	2	180	40-750	6	20
Constante de tension g₃₃ × 10⁻³ (VM/N)	50	17	15-40	20	190
Coefficient de couplage K (%)	10	40	40-70	10	14

II.5. Choix des matériaux et des configurations piézoélectriques

Différents matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés lors de la création des MEMS. La majorité de ces matériaux font partie de la famille des Pérovskite. Il existe trois matériaux couramment utilisés dans la conception de MEMS. Le zinc oxyde (ZnO) et l'aluminium nitrite (AlN) sont des composés de structure Wurtzite, tandis que le zirconate titanate de plomb (PZT) fait partie de la famille des pérovskites [37].

II.5.1. L'oxyde de Zinc (ZnO)

Le ZnO est l'un des matériaux piézoélectriques les plus populaires en raison de son importance dans les domaines électromécanique et piézoélectrique. Il a une forme cristalline hexagonale et une caractéristique particulière qui lui permet de produire un effet piézoélectrique [1].

Le ZnO est prometteur pour les applications biomédicales grâce à sa biocompatibilité et à ses bonnes propriétés piézoélectriques. De nombreuses recherches sont menées pour optimiser sa stabilité et sa durabilité, notamment en explorant différentes nanostructures et en développant des techniques de synthèse et d'intégration innovantes.

II.5.2. Nitrure d'aluminium (AlN)

Le matériau céramique technique le plus intéressant est le nitrure d'aluminium (AlN), qui combine une conductivité thermique très élevée avec des propriétés d'isolation électrique exceptionnelles. Ce matériau possède des caractéristiques piézoélectriques captivantes. Un coefficient de couplage électromécanique voisin de 7% et un coefficient piézoélectrique de 3,4 à 5 pm.V [38].

L'AlN est particulièrement intéressant pour les applications à haute température ou haute fréquence, telles que les capteurs et les transducteurs pour les environnements hostiles ou les dispositifs de communication sans fil. Cependant, sa fragilité mécanique et son coût élevé peuvent limiter son utilisation dans certaines applications biomédicales où la flexibilité et le faible coût sont des facteurs critiques.

II.5.3. Zirconate Titanate de Plomb (PZT)

En raison de leur résistance mécanique, de leur inertie chimique, de leur facilité de mise en forme et de leurs coûts de production relativement bas, les PZT sont parmi les céramiques piézoélectriques les plus répandues. On peut ajuster leurs caractéristiques mécaniques, diélectriques, de couplage et de pertes en fonction de leur concentration en zirconium et en titane [1].

Malgré la présence de plomb, le PZT reste très utilisé en raison de ses excellentes propriétés piézoélectriques et de sa facilité de fabrication. Cependant, des efforts sont déployés pour développer des matériaux piézoélectriques sans plomb, offrant des performances comparables tout en étant plus respectueux de l'environnement.

Les applications typiques du PZT incluent les actionneurs, les transducteurs, les capteurs, ainsi que les systèmes de récupération d'énergie piézoélectrique pour diverses applications, y compris biomédicales.

Voici un tableau récapitulant les avantages et inconvénients des différents matériaux piézoélectriques:

Tableau II.2 : Les avantages et les inconvénients des matériaux piézoélectriques [1].

Matériau	Avantages	Inconvénients
ZnO	<ul style="list-style-type: none"> - La méthode de fabrication facile - Les propriétés de détection des ZnO nanostructures obtenues sont prometteuses pour la fabrication de dispositifs capteurs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une mauvaise stabilité sur silicium
AlN	<ul style="list-style-type: none"> - AlN présente une bonne stabilité sur silicium contrairement au ZnO 	<ul style="list-style-type: none"> - Propriétés - Piézoélectriques restent moindres comparés à celles du ZnO
PVDF	<ul style="list-style-type: none"> - Plus souple - Bon isolant thermique - Basse densité 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible à la température - Matière première limitée - Détérioration par UV
PZT	<ul style="list-style-type: none"> - Excellentes propriétés piézo-électriques, diélectriques et ferroélectriques - Puissance générer plus élevée - Ses performances physiques (électriques et mécaniques) 	

II.6. Modélisation du générateur piézoélectrique

Les générateurs piézoélectriques sont des dispositifs qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique à l'aide de matériaux piézoélectriques.

Un Générateur piézoélectrique peut être modélisé électriquement comme une source de courant proportionnelle à la vitesse de vibration, en parallèle avec la capacité CO et la résistance parasitique RC de l'élément piézoélectrique.

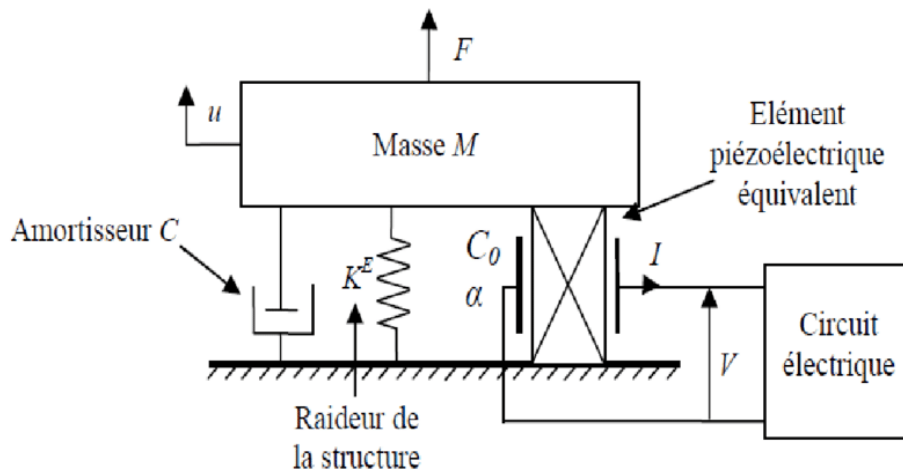


Figure II.3 : Modèle mécanique [39].

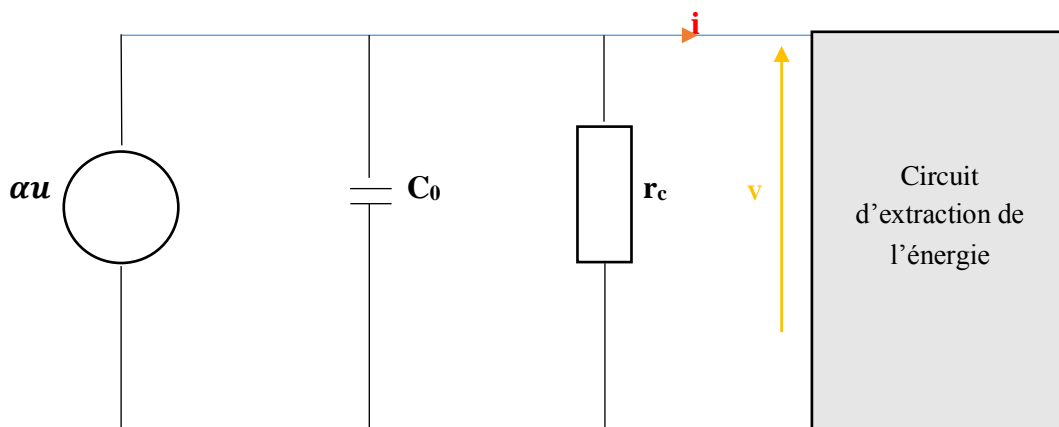


Figure II.4 : Circuit équivalent

II.6.1. Architecture du générateur piézoélectrique

L'architecture typique d'un générateur piézoélectrique comprend trois étages de conversion :

❖ **Le système piézoélectrique (SP):**

C'est l'étage central de conversion mécano-électrique, constitué d'un ensemble de céramiques ou de films piézoélectriques.

On utilise principalement du PZT (Titano-Zirconate de Plomb) ou du PVDF (polyfluorure de vinylidène) comme matériau piézoélectrique. Ces couches sont polarisées électriquement lors de leur fabrication.

- ❖ **Le dispositif mécanique d'application (DMA):** L'objectif de ce premier étage de conversion purement mécanique et de transformer la force F_{moteur} délivrée par la source mécanique en une force F de forme et d'amplitude adaptées au SP.
- ❖ **Le système de récupération (SR):** Ce dernier étage de conversion purement électrique est un convertisseur statique. Il est indispensable pour convertir l'énergie 'brute' délivrée par le SP en énergie utilisable par l'appareil portable ciblé, ou éventuellement en énergie stockée dans un élément de type condensateur ou accumulateur électrochimique ou batterie. Il est généralement composé d'un redresseur puis d'un convertisseur statique [40].

II.7. Circuit de récupération d'énergie

La récupération d'énergie est une thématique visant à utiliser l'énergie ambiante (lumière, vibrations, gradients thermiques) présente dans l'environnement pour alimenter des dispositifs électroniques (via des capteurs) de façon à prolonger leur durée de fonctionnement, voire à les rendre totalement autonomes [41].

Les circuits électriques ne peuvent pas être alimenté directement par la tension alternative fournie de l'élément piézo-électrique raison de sa grande dépendance à la tension et de sa faible puissance de sortie (une centaine de μW).

La mise en œuvre d'une gestion de l'énergie électrique est délicate pour avoir une optimisation sur la structure d'un récupérateur d'énergie. La structure classique d'extraction d'énergie récupérer est alors pour convertir les tensions alternatives générées en tensions continues, d'adapter leurs niveaux à ceux nécessités par le système de stockage utilisé, et de les réguler de manière à générer des tensions indépendantes de la source ou des variations de charge [41].

Le processus d'un récupérateur d'énergie est schématisé sur la Figure suivante.

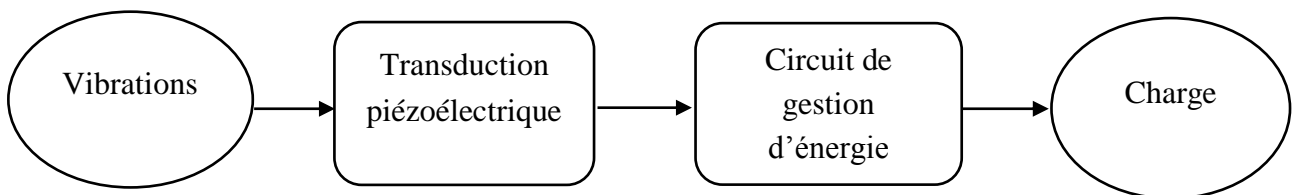


Figure II.5 : Schéma fonctionnel d'un générateur piézoélectrique.

II.7.1. Redresseur

Un redresseur est un dispositif électronique qui convertit un courant alternatif (CA) en courant continu (CC). Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui permettent d'obtenir un courant unidirectionnel de la tension d'une source alternative. On les appelle, communément, des convertisseurs AC/DC.

On retrouve des redresseurs non commandés, constitués uniquement de diodes, et on retrouve aussi des redresseurs commandés qui doivent contenir des composants commandable que sont les thyristors [42].

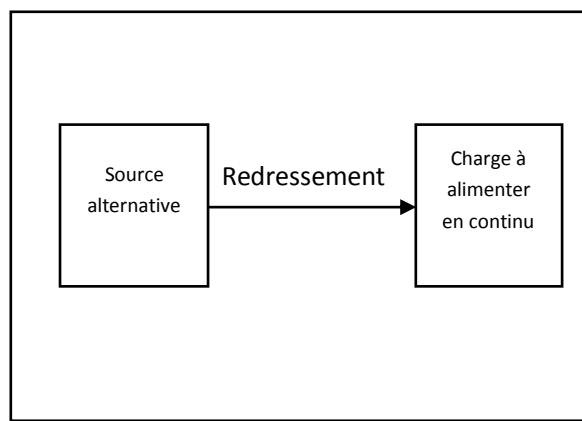


Figure II.6 : Convertisseur alternatif-continue.

➤ La diode

Une diode est un composant électronique qui permet au courant de circuler facilement dans une direction, mais le bloquant dans l'autre.

Les diodes ont une polarité déterminée par une anode (fil positif) où le courant entre tandis que la cathode (fil négatif) où le courant sort.

C'est donc un composant polarisé. Son symbole est le suivant :

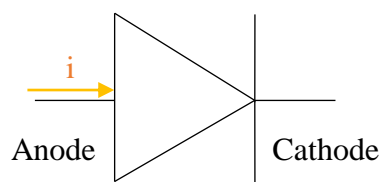


Figure II.7 : Symbole d'une diode.

Lorsque le courant va de l'anode vers la cathode, c'est le sens passant. La diode se comporte comme un interrupteur fermé. Dans le sens inverse, c'est un interrupteur ouvert.

➤ **Thyristor**

Le thyristor est un semi-conducteur de structure PNPN assimilable à un ensemble de trois jonctions; il constitue un interrupteur unidirectionnel à fermeture commandée.

II.7.1.1. Définition d'un redresseur monophasé

Un redresseur monophasé est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal alternatif monophasé en un signal continu unidirectionnel. Il est composé d'un ou plusieurs semi-conducteurs (diodes) qui conduisent le courant dans un seul sens.

Les redresseurs est essentiellement réalisés à partir de diodes et de thyristors.

II.7.1.2. Types des redresseurs monophasés

- En monophasé, on distingue les redresseurs a simple alternance et les redresseurs a double alternance.
- Le redresseur simple alternance peut-être commande ou non commandé que est le même cas avec les redresseurs doubles alternance.

➤ **Redressement monophasé à simple alternance**

Le type de redressement le plus simple est le redressement monophasé à simple alternance. Il est constitué d'une seule diode qui laisse passer le courant uniquement pendant les alternances positives du signal d'entrée alternatif. La tension de sortie est une succession de demi-ondes positives séparées par des intervalles nuls [43].

➤ **Redressement monophasé à double alternance (pont de Graetz)**

Le redressement monophasé à double alternance, également connu sous le nom de pont de Graetz, est constitué de quatre diodes montées en pont. Cela permet de redresser les deux alternances (positive et négative) du signal d'entrée alternatif. La tension de sortie est une succession d'ondes complètes du même signe [44].

➤ **Redressement monophasé à double alternance (demi-pont)**

Le redressement monophasé à double alternance en demi-pont utilise deux diodes montées en série et un transformateur avec un enroulement secondaire à prise médiane. Chaque diode conduit pendant une demi-alternance du signal d'entrée alternatif, permettant ainsi de redresser les deux alternances.

➤ **Redressement monophasé à double alternance (doubleur de tension)**

Le redressement monophasé à double alternance avec doubleur de tension utilise un circuit spécial comprenant deux condensateurs et deux diodes. Ce circuit permet d'obtenir une tension continue de sortie environ deux fois supérieure à la valeur crête de la tension d'entrée alternative [45].

II.7.2. Définition de filtre

Le filtre est un circuit électronique ou c'est un élément nécessaire dans le traitement du signal, il est utilisé pour sélectionner les fréquences, c'est à dire Permet aux fréquences de passer et bloquer les autres fréquences. il est utilisé dans de nombreux systèmes de transmission radiofréquences et hyperfréquences (radios portables, satellites, radars, etc.) et il constitue la base de traitement du signal, qui s'applique à des signaux de tout type (sons, images, vidéo, vibrations sismiques,...) [46].

II.7.2.1. Les différents types de filtrage

➤ **Filtre passe-bas**

Un filtre passe-bas est un filtre qui laisse passer les basses fréquences et qui atténue les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure (F_c).

➤ **Filtre passe-haut**

Ce sont des filtres de première classe qui effectuent le processus inverse d'un filtre passe-bas, qui consiste à faire passer des signaux électriques à des hautes fréquences, tout en bloquant les signaux en dessous de la fréquence de coupure.

➤ **Filtre passe-bande**

Sont des filtres de second ordre, ils laissent passer les signaux électriques dans une certaine bande de fréquences [F_{c1} , F_{c2}], tout en atténuant les deux signaux aux fréquences supérieures et inférieures à cette bande, c'est-à-dire ce genre de filtre contient des champs de suppression supérieurs et inférieurs.

➤ **Filtre coupe-bande**

Ce sont des filtres de second ordre qui effectuent le processus inverse du filtre passe-bande, permettant aux fréquences supérieures et inférieures de passer en dehors de la plage prédéterminée $[F_{C1}, F_{C2}]$, tout en les empêchant de passer dans cette plage [47].

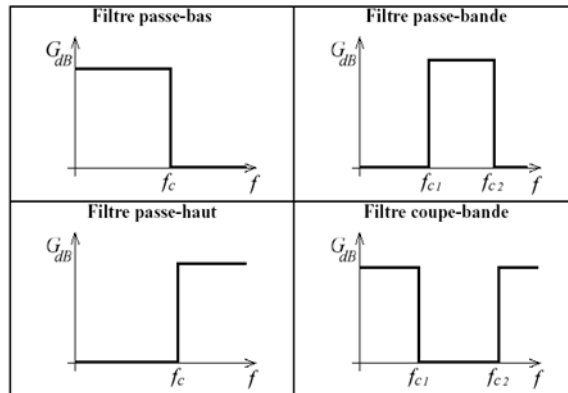


Figure II.8 : Les filtres [48].

- **Fréquence de coupure d'un filtre**

Voici comment calculer la fréquence de coupure d'un filtre :

Pour un filtre RC en série, la fréquence de coupure Fc est donnée par :

$$F_c = 1 / (2\pi * R * C) \dots\dots\dots (II.1)$$

Où :

R est la résistance en ohms (Ω)

C est la capacité en farads (F)

Pour un filtre RL en série, la fréquence de coupure est :

$$F_c = R / (2\pi * L) \dots\dots\dots (II.2)$$

Où :

R est la résistance en ohms (Ω)

L est l'inductance en henrys (H)

La fréquence de coupure correspond à la fréquence pour laquelle la puissance transmise est réduite de moitié (-3 dB).

II.7.3. Les hacheur commandable : Étude et analyse

II.7.3.1. Définition d'un hacheur

Un hacheur commandable (ou onduleur) est un convertisseur statique de l'électronique de puissance qui permet de convertir une source de tension continue de valeur fixe en une autre tension alternative de fréquence et de valeur moyennes réglables [49].

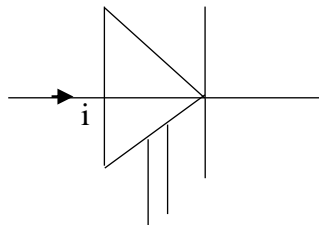


Figure II.9 : Symbole d'un hacheur.

Le hacheur permet la modulation de l'énergie entre une source et une charge continues. Cette source et cette charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).

Il s'agit d'un circuit électronique composé principalement d'un interrupteurs de puissance peut être un transistor (pour des puissances faibles) ou thyristors (pour grande puissance), commandés à l'ouverture et à la fermeture [49].

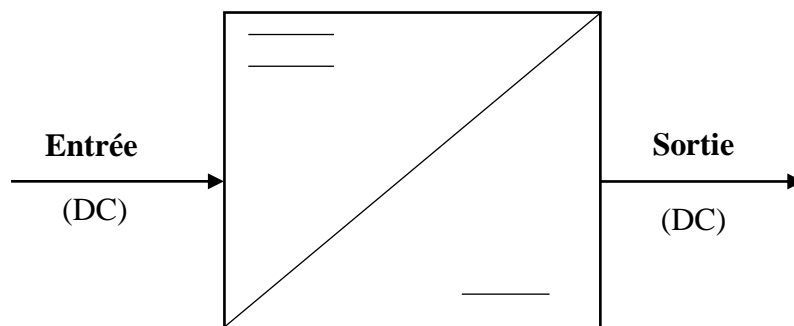


Figure II.10 : Schéma d'un hacheur.

II.7.3.2. Les différents types de hacheurs

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, trois types de convertisseurs statiques sont distingués :

A. Hacheur série (buck)

Le hacheur série ou un convertisseur BUCK, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, Le hacheur série est un convertisseur direct DC-DC, La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [50].

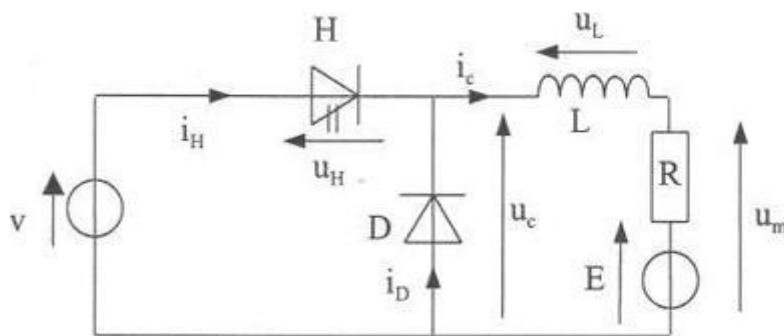


Figure II.11 : Schéma d'un hacheur série [51].

❖ Structure fondamentale de l'hacheur série

La structure de hacheur série se compose de deux interrupteurs de puissance principaux à savoir, KI et K2.

Le premier est un interrupteur commandable K1, un transistor IGBT Il s'agit d'un transistor bipolaire à grille isolée, qui est un appareil semi-conducteur de la famille des transistors, principalement employé comme interrupteur électronique dans les montages de l'électronique de puissance. Il est capable de faire face à des puissances considérables et à des fréquences de commutation similaires.

Le second est un interrupteur spontané K2, une diode placée en parallèle sur la charge.

Une diode se comporte comme un interrupteur automatique dont contacts se ferment des que l'anode devient légèrement positive par rapport à la cathode et dont les contacts s'ouvrent dès que le courant qu'elle porte devient nul, il sembler banal de préciser qu'une diode arrête de Conduire lorsque le courant nul [52].

B. Hacheur parallèle (boost)

Le hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur «K» peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement [50].

C. Hacheur abaisseur – élévateur

Le hacheur abaisseur-élévateur est aussi appelé dévolteur-survolteur, est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [50].

Le branchement série est le plus simple et le plus utilisé. Selon le procédé de hachage (découpage), on peut faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie de 3 manières :

1. Hacheur à fréquence fixe et largeur d'impulsion variable.
2. Hacheur à fréquence variable et à largeur d'impulsion fixe.
3. Hacheur à fréquence et à temps de conduction variable [49].

II.7.4. Commande hacheur

Afin de contrôler le convertisseur Boost (toujours en boucle ouverte), il faut une commande l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur (transistor), cette opération peut se faire par un microcontrôleur PIC, pour générer un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) avec un rapport cyclique voulu afin de commander le transistor.

A. Définition d'un Pic

Un microcontrôleur est un circuit intégré rassemblant dans un même boîtier tous les éléments d'une structure à base de microprocesseur, mémoires (mémoire morte pour le programme, mémoire vive pour les données), unités périphériques (ports, timers, convertisseur) et interfaces d'entrées-sorties. Un microcontrôleur peut fonctionner de façon autonome après avoir été programmé.

Les microcontrôleurs PIC (Périphérie Interface Controller) peuvent être divisés en trois grandes familles:

- La famille Base-line qui utilise des mots d'instructions de 12 bits.
- La famille Mid-Range qui utilise des mots de 14 bits.
- La famille High-End qui utilise des mots de 16 bits. [53]

B. Modulation de largeur d’impulsion PWM

La modulation de largeur d’impulsion (MLI), aussi appelée PWM (Pulse Width Modulation) en anglais, est une technique utilisée pour synthétiser des signaux analogiques à partir de circuits numériques (tout ou rien, 1 ou 0), ou à états discrets.

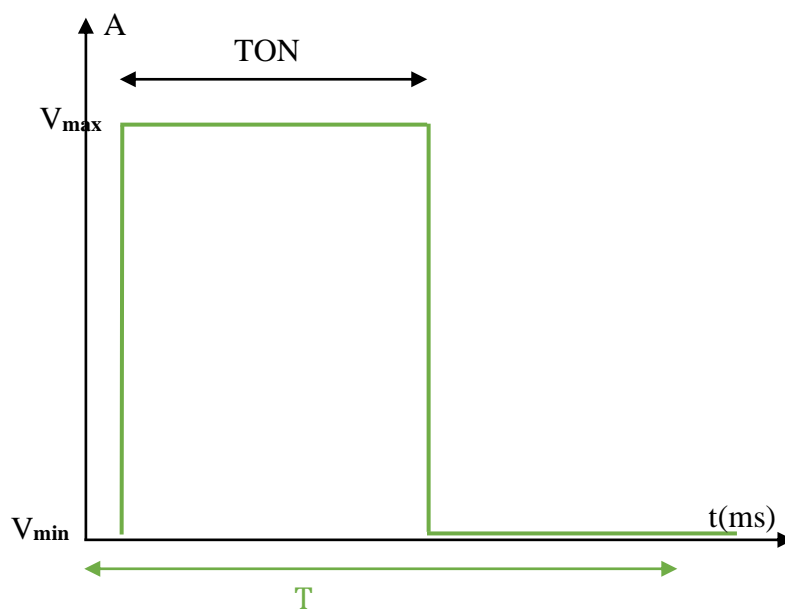


Figure II.12 : Modulation de largeur d’impulsion.

➤ **Amplitude du PWM**

L’amplitude de la modulation de largeur d’impulsion est un autre concept important à discuter pour bien comprendre cette notion. L’amplitude est la différence entre une tension maximale et une tension minimale du signal.

Pour calculer l’amplitude on utilise la formule suivante :

$$\text{Amplitude} = V_{max} - V_{min} \dots\dots\dots (II.3)$$

➤ Rapport cyclique " α "

Pour calculer le rapport cyclique d'un signal, on utilise la formule suivante :

Rapport cyclique (%) = [Durée du signal haut (ms) / Période totale du signal (ms)] x 100

○ Par équation : $\alpha = \frac{TON}{T} \times 100$ (II.4)

Le rapport cyclique représente la proportion de temps pendant lequel le signal est à un niveau logique haut par rapport à la période totale du signal. Cela permet de déterminer la durée pendant laquelle le signal est actif par rapport à la durée totale de l'onde.

Remarque

- «T» c'est la période totale du signal.
- Durée du signal haut c'est le temps d'activation du signal TON.

➤ Tension moyenne de modulation de largeur d'impulsion

Pour calculer la tension moyenne d'un signal PWM, on utilise la formule suivante :

Tension moyenne de sortie = Tension maximale x Rapport cyclique.

Par équation : $\langle u_c \rangle = \alpha \cdot V$

Où : $\langle u_c \rangle$ est la valeur moyenne de la tension de sortie.

Dans cette formule, la tension maximale représente la tension à l'état haut du signal PWM, et le rapport cyclique est la proportion de temps pendant laquelle le signal est à l'état haut par rapport à la période totale du signal. En multipliant la tension maximale par le rapport cyclique, on obtient la tension moyenne du signal PWM.

II.8. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a fourni une vue d'ensemble complète des composants et technologies essentiels qui sont impliqués dans la conception de générateurs piézoélectriques efficaces. La conception et l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie piézoélectrique reposent sur une base solide basée sur l'étude des matériaux, des architectures de générateurs piézoélectriques et des circuits de conversion et de régulation de l'énergie. Ces connaissances sont cruciales pour le développement de dispositifs énergétiques avancés qui exploitent les propriétés uniques des matériaux piézoélectriques.

A decorative border in a light blue color, resembling a scroll. It features a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and small circular motifs at the corners, suggesting a rolled-up document.

Chapitre III :

Simulation et caractérisation expérimentale

III.1. Introduction

Ce chapitre vise à concevoir et à optimiser un système de récupération d'énergie piézoélectrique pour charger une batterie de 5 volts utilisée dans un dispositif biomédical. Le système doit être capable de convertir l'énergie fournie par un générateur piézoélectrique, générant 18 volts à 136 Hz, en une tension stable de 5 volts. Cela implique plusieurs étapes techniques, notamment le redressement de la tension, le filtrage des signaux indésirables et la régulation de la tension de sortie.

Avant d'entamer ces étapes nous présenterons tout d'abord une introduction au logiciel de programmation Proteus utilisé pour la simulation de notre application. Ainsi que le logiciel de programmation des picMicroC for Pic .Puis nous calculerons les différents composants nécessaires au fonctionnement optimal du circuit et le choix de chaque composant.

Enfin, nous expliquerons le fonctionnement global du circuit et les résultats obtenus.

III.2. Logiciel de simulation Proteus

Proteus est une suite logicielle destinée à l'électronique. Développé par la société Labcenter Electronics, Elle permet de concevoir et de simuler des circuits électroniques, ainsi que de créer des prototypes virtuels, les logiciels incluent dans Proteus: ISIS, ARES, PROSPICE et VSM.

Cette suite logicielle est très connue dans le domaine de l'électronique, et utilisé par de nombreuses entreprises et organismes de formation (incluant lycée et université) en raison de sa facilité d'utilisation et de ses fonctionnalités avancées. Outre la popularité de l'outil, Proteus possède d'autres avantages

- Pack contenant des logiciels facile et rapide à comprendre et utiliser
- Le support technique est performant
- L'outil de création de prototype virtuel permet de réduire les coûts matériel et logiciel lors de la conception d'un projet. Elle permet de concevoir et de simuler des circuits électroniques, ainsi que de créer des prototypes virtuels [54].

III.3. Compilateur de programmation MicroC for Pic

MicroC est un compilateur qui permet de programmer des microcontrôleurs PIC en langage C. Il traduit un programme écrit en C en langage machine, qui peut ensuite être transféré dans la mémoire du microcontrôleur pour être exécuté.

Les principales étapes pour utiliser MicroC pour un projet sont :

1. **Édition** : Écrire et modifier le programme en C dans un éditeur de code.
2. **Compilation** : Utiliser le compilateur MicroC pour traduire le code C en langage machine.
3. **Programmation** : Transférer le programme compilé (fichier.hex) dans la mémoire du microcontrôleur PIC à l'aide d'un programmeur.

MicroC offre aussi des fonctionnalités utiles comme des bibliothèques, des exemples de projets, et un gestionnaire de bibliothèques pour faciliter le développement [55].

III.4. Les étapes à suivre pour la simulation de notre application

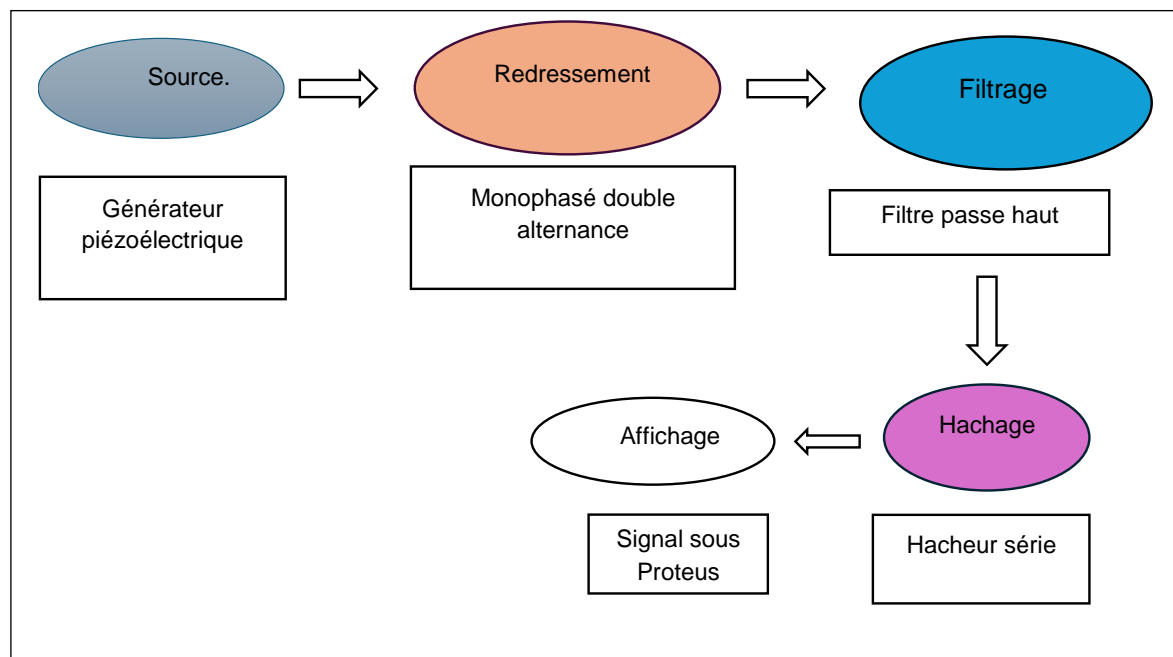


Figure III.1 : Schéma explicatif de notre simulation.

Avant de passer à la simulation finale de notre application on va présenter et définir chaque partie de la simulation.

III.5. 1^{ère} Application

III.5.1. Source de tension alternative

a. Symbole de la source alternative

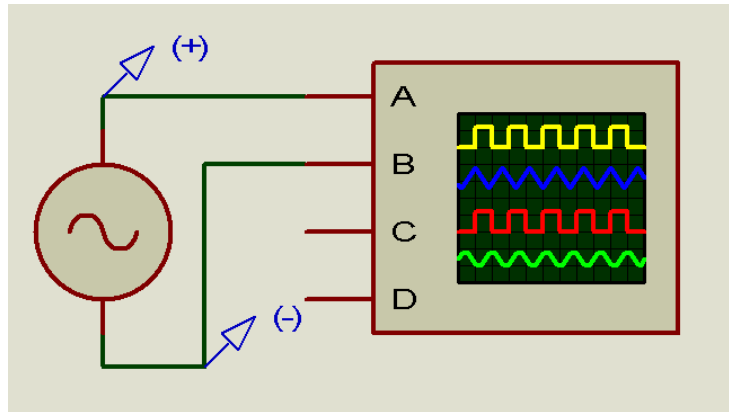


Figure III.2 : Source alternative et oscilloscope sous Isis-Proteus.

b. Signal sinusoïdale d'entrée

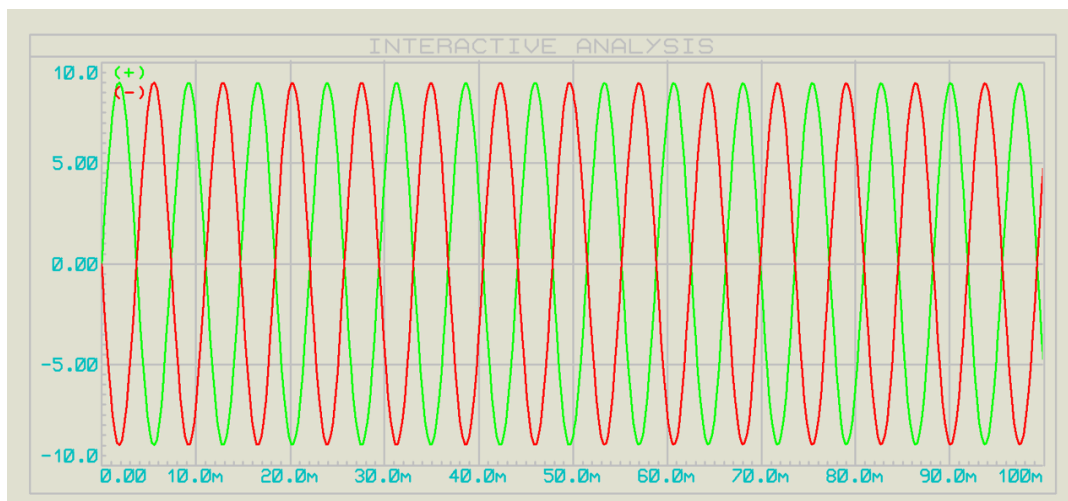


Figure III.3 : Résultats, courant alternatif.

III.5.2. Redressement monophasé double alternance

Le redressement est réalisé à l'aide de quatre diodes disposées en pont de Graetz et arrangées de la manière qui permet de redresser un courant alternatif en courant continu. C'est à dire de convertir les alternances positives et négatives uniquement en une tension positive.

Ce montage représente un redressement monophasé double alternance. Une source alternative de 50 Hz avec des diodes générique.

a. Schéma du pont de diodes

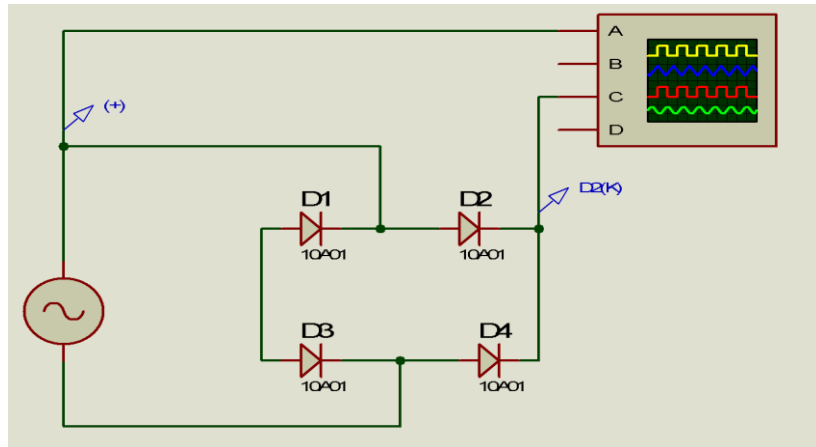


Figure III.4 : Schéma de simulation de redressement.

Le pont de diode appelé aussi pont de Graetz ou redresseur double alternance est un assemblage de 4 diodes qui a pour objectif de redresser la tension alternative issue de la sortie du générateur et la rendre continue par l’ajout d’une capacité de filtrage.

b. Calcul analytique

Chaque diode à une chute de tension de 0.7V, le courant passe par deux diodes donc 1.4V.

La fréquence de tension redressée c’est 136Hz, pour pont de diodes la fréquence sera doublée à 272Hz.

$$V_e = 18 [V]$$

$$V_{diode} = 0.7 [V]$$

- La tension maximale :

$$V_{max} = V_e \times \sqrt{2} \dots\dots\dots(III.1)$$

$$V_{max} = 18V \times 1.414 \approx 25.5V$$

- La tension crête après le redressement :

$$V_{\text{crête redressé}} = V_{\text{max}} - 2V_{\text{diode}} \dots\dots\dots(III.2)$$

$$V_{\text{crête redressé}} = 25.5 - 2 \times 0.7 = 24.1V$$

- La tension moyenne : (la tension de sortie après le redressement)

$$V_{moy} = 2V_{max} / \pi \dots\dots\dots(III.3)$$

$$V_{moy} = 2 \times 25.5 / 3.14 = 16.24V$$

c. Choix des diodes

Les diodes (D1, D2, D3, D4) sont choisies pour supporter la tension et le courant du circuit.

Les diodes utilisé 10A01 sont des diodes générique pour le redressement, elles supportent une tension inverse maximal de 50V et un courant maximal de 1A.

Dans notre simulation là où nous avons obtenu une tension d'entrée positive, deux diodes sont passantes et les deux autres sont conductrices, permettant ainsi le passage de courant. Quand elle est négative, les deux autres diodes sont passantes.

Cela veut dire :

❖ Tension d'entrée positive

D1 et D3 passantes

D2 et D4 bloquées

$$i = i_1 = i_3 \geq 0$$

$$U_{D1} = U_{D3} = 0$$

❖ Tension d'entrée négative

D1 et D3 bloquées

D2 et D4 passantes

$$i = i_2 = i_4 \geq 0$$

$$U_{D2} = U_{D4} = 0$$

d. Résultats de simulation

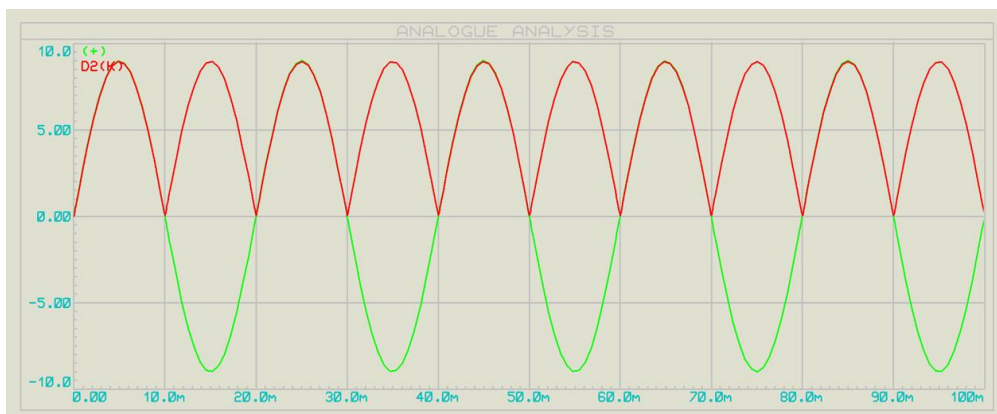


Figure III.5 : Résultat de simulation.

III.5.3. Filtrage

Après le redressement on ajoute une capacité et une résistance (filtre passe haut) pour laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences c’est à dire les fréquences inférieures à la fréquence de coupure.

On prend une ondulation 1V et un courant de charge 0.5A.

a. Calcul du condensateur et résistance

• Calcul du condensateur

$$C_1 = I_{charge} / (2 \times f \times \Delta V) \dots\dots\dots(III.4)$$

On a : $I_{charge} = 0.5A$

Avec $F = 136 Hz$

Et $\Delta V = 1V$

$$C_1 = 0.5/2 \times 136 \times 1 \times 10^6 \approx 2000\mu F.$$

$$C1 \approx 2000\mu F$$

✓ I_{charge} = Courant de charge [A].

✓ F = Fréquence d’entrée [Hz].

✓ ΔV = Ondulations [V].

b. Calcule de résistance

$$R = U/I \dots\dots\dots(III.5)$$

On a $U = 18V$

Et $I = 0.5A$

$$R = 36\Omega.$$

$$R = 0.036 k\Omega.$$

✓ I_{charge} = Courant de charge (A).

✓ U = la tension d'entrée.

c. Choix de condensateur et résistance

Pour plus de sécurité et pour stabiliser la tension de sortie en choisit un condensateur de $5000 \mu F$, et une résistance de $1k\Omega$.

d. Calcule la fréquence de coupure

$$F_c = 1/2\pi Rc \dots \dots \dots (III.6)$$

On à : $R = 1K\Omega$ et $c = 5000 \mu F$

$$F_c = 1/(2 * 3.14 * 1 * 10^3 * 5000 * 10^{-6})$$

$$F_c = 31,4 Hz$$

e .Schéma du montage

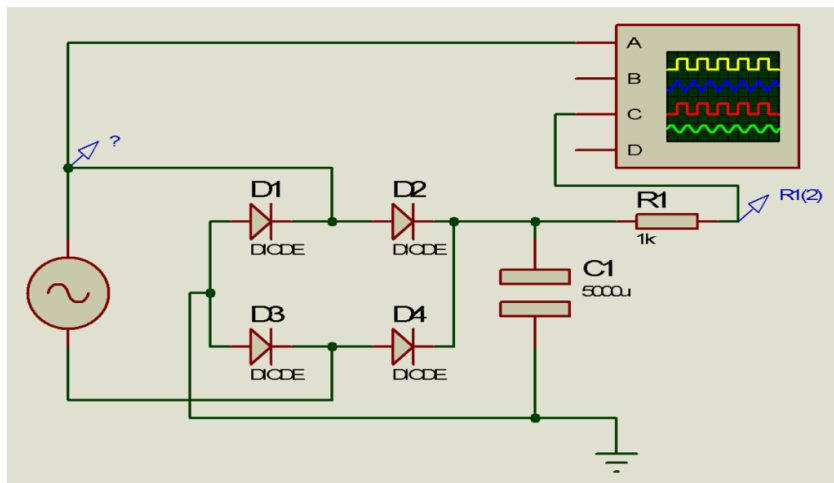


Figure III.6 : Schéma électronique du pont à diodes avec filtre passe haut.

f .Résultats de simulation

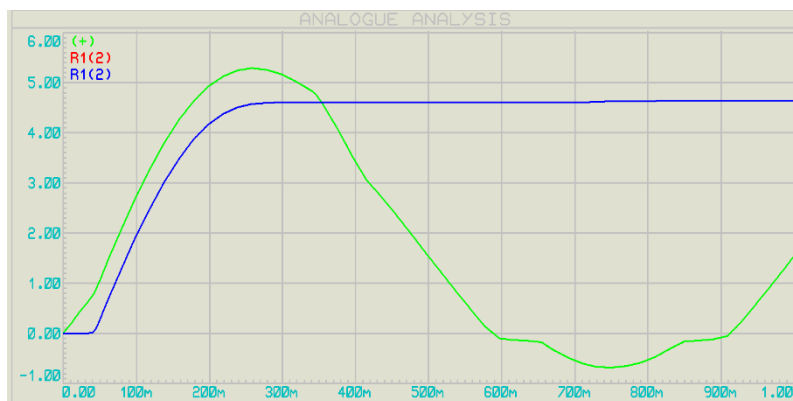


Figure III.7 : Résultat de simulation.

Le lissage dépend aussi du courant consommé et de la fréquence : plus le circuit consomme de courant plus le condensateur se déchargera vite, et plus la fréquence est élevée, plus il sera rechargé rapidement.

Donc notre projet vise à récupérer de l'énergie vibratoire pour alimenter des capteurs médicaux et selon le capteur qu'on souhaite alimenter on doit régler la valeur de la tension nécessaire pour le fonctionnement de ce dernier.

Pour ce faire on va utiliser un hacheur série pour régler la tension d'alimentation et l'ajuster selon le besoin.

III.5.4. Etude et analyse du hacheur commandable

Le hacheur, ou convertisseur continu-continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

a. Choix des composants

Le fonctionnement de ce hacheur en commutation avec :

- Un interrupteur on a choisi un transistor 2N2222 est un NPN utilisé pour la commutation (le passage de courant de charge). Sa capacité maximale de courant est de 800mA.
- Une diode fournit un chemin pour le courant lorsque l'interrupteur est ouvert, on a utilisé une diode générique (10A01).
- Un condensateur C_2 filtre les ondulations de tension pour fournir une sortie lisse on le prend de même tension que $C_1 = 5000\mu F$
- Une inductance de 100nH pour stocker l'énergie pendant les périodes de commutation et la transfère à la charge.

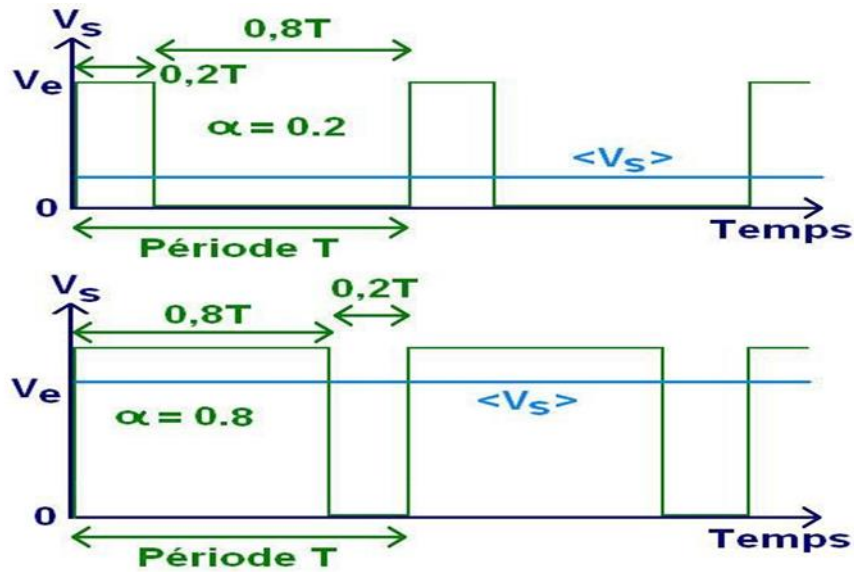


Figure III.8 : Allure de la tension de sortie du hacheur.

La tension de sortie V_s est périodique de période T . On peut limiter le raisonnement sur une période.

La tension de sortie vaut tantôt V_e , tantôt 0.

Pendant la durée $\alpha.T$ ($0 < \alpha < 1$), $V_s = V_e$.

Pendant la durée qui reste $((1-\alpha) T)$ pour finir la période, la tension $V_s = 0$.

α représente le pourcentage du temps où l'interrupteur est fermé, c'est-à-dire $V_s = V_e$. α .

ou α est appelé le rapport cyclique.

La valeur moyenne de V_s est notée. Elle se calcule en faisant la moyenne pondérée suivante :

$$V_s \text{ moy} = (\alpha T.V_e + (1 - \alpha)T.0)/T \dots \dots \dots (III.7)$$

En simplifiant, on arrive au résultat à retenir :

$$V_s \text{ moy} = \alpha .V_e \dots \dots \dots (III.8)$$

Donc le hacheur nous a permis de régler et d'abaisser la tension de sortie donc ce n'est rien d'autre qu'une alimentation à découpage abaisseur de tension ("hacheur dévolteur") appelée Buck. La tension de sortie n'est pas isolée de la tension d'entrée, contrairement à un transformateur.

Pour éviter que la tension de sortie soit "hachée", il faut ajouter des éléments qui vont la lisser, c'est-à-dire réduire ses variations. Pour cela, on ajoute un condensateur une inductance, et une diode. En sortie du hacheur série.

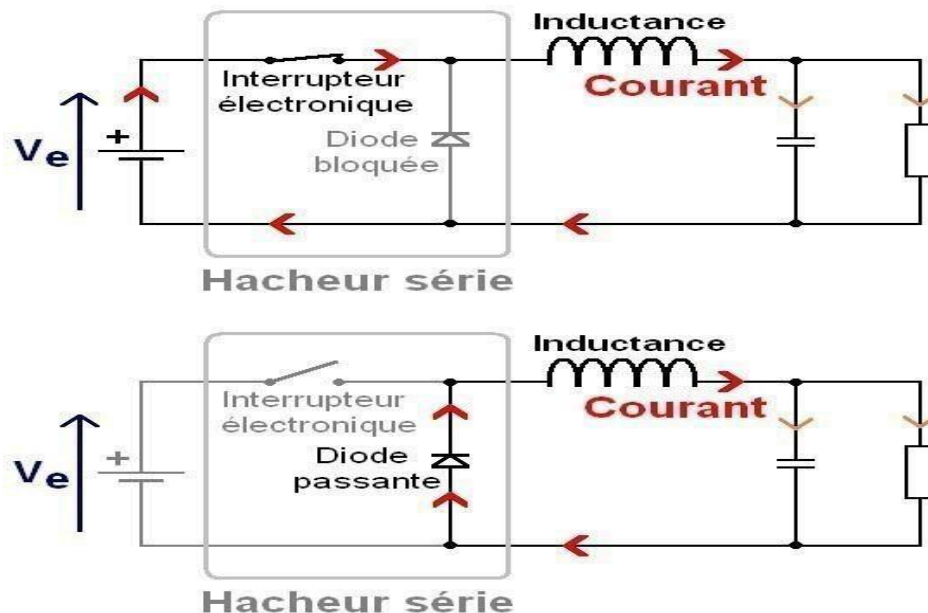


Figure III.9 : Fonctionnement du Hacheur série.

A. Commande du hacheur

Avec un microcontrôleur pic18F4520 pour commander un hacheur série à transistor, en utilisant la modulation de la largeur d'impulsion pour ajuster la vitesse ou la puissance de circuit.

La programmation de ce pic a été faite avec le compilateur MicroC PRO for PIC qui est basée sur le langage de programme C++.

B. Programme sous MicroC

Cette solution consiste à utiliser le PIC 18F4520 afin de générer des signaux par la technique de modulation de largeur d'impulsion. Donc on a écrit le programme qui se base sur le Timer afin d'appliquer un rapport cyclique de valeur 50%, pour l'implémenter en suite sur le PIC dans la simulation sur le logiciel ISIS Proteus.

Le programme a été écrit en langage C sur le logiciel «MikroC PROforPIC» donnée comme suite :

```

// Timer function using interrupt
void interrupt () {
LATD= LATD;
TMROH=0xFF;
TMROL= 0xE4;
INTCON.TMROIF=0;
void main(){
INTCON.GIE=0; INTCON.TMROIE=1;
TOCON=0b10000111;
TMROH=0xFF;
TMROL=0xE4;
TRISD=0;
LATD=0;
INTCON.GIE=1;
}
// End of timer function
    
```

Les valeurs du Timer TMR0H=0xFF et TMR0L=0xE4 ont été retrouvées grâce à la relation:

$$N = \frac{T_s}{T} \dots\dots\dots(III.8)$$

Avec:

- N : La valeur en hexadécimal mise sur le Timer TMR0H et TMR0L.
- Ts : La période de sortie du PIC.
- T: La période du Timer du PIC 18F4520 fixée à 1024×10^{-4}

Dans notre cas, nous souhaitons une valeur moyenne de 50 % de celle délivrée par le générateur piézoélectrique. Or, la fréquence du générateur est de 136 Hz, ce qui implique une période de $T_h=7.35 \times 10^{-3}$ s. Ainsi, Ts sera approximativement de 2.5 ms et $N=20/1024=19$ (décimal).

En hexadécimal, 19 (décimal) correspond à 001A (hexadécimal).

Pour retrouver la valeur désirée à mettre sur le Timer du PIC, on calcule :

$$FFFF-001A=FFE4$$

On prend finalement FF pour la valeur du TMR0H et E4 pour TMR0L.

C. Modulation de la largeur d'impulsion

Une technique de création de signaux qui permet de contrôler de l'analogique avec des sorties numériques d'un microcontrôleur. La commande en PWM consiste en une succession rapide d'impulsion électrique. Le PWM est un signal tout ou rien qui permet un équivalent d'une variation de tension continue.

Le principal intérêt de la technique PWM est de limiter la chauffe des composants électroniques. En effet, en commande analogique, pour obtenir une variation de puissance il faut dissiper le complément de la puissance maximale consommée.

C'est un signal rectangulaire qui présente ici un rapport cyclique de 50%, Sa valeur moyenne est égale à la moitié de l'amplitude maximale.

D. Schéma électronique

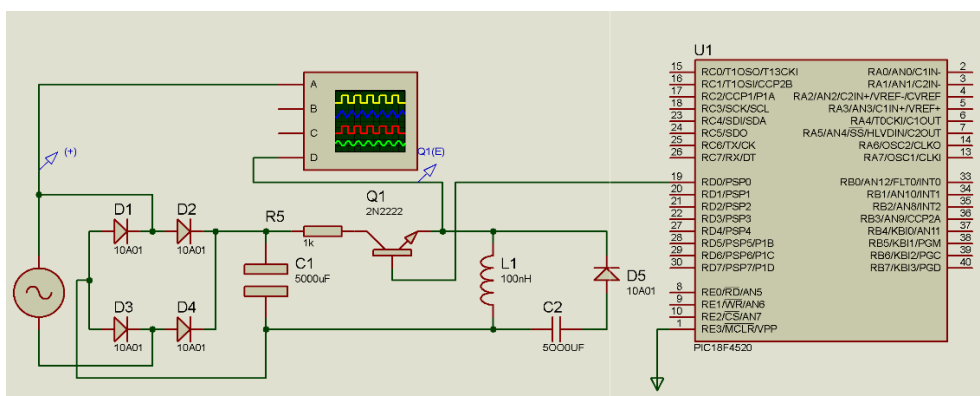


Figure III.10 : Schéma de simulation.

➤ Les valeurs des paramètres sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Valeurs des composants utilisés.

Les paramètres	Les valeurs
La tension d'entrée V_e	18V
La fréquence	136Hz
Le condensateur C_1	5000 μF
Le condensateur C_2	5000 μF
La résistance R	1K Ω
La tension de sortie	5V
L'inductance L	100nH

❖ **État de conduction (interrupteur fermé)**

Le courant circule à travers l'inductance, stockant de l'énergie sous forme de champ magnétique.

La tension aux bornes de l'inductance est positive .

❖ **État de blocage (interrupteur ouvert)**

La diode fourni un chemin pour le courant. L'énergie stocké dans l'inductance est transféré à la charge.

E. Résultat de simulation

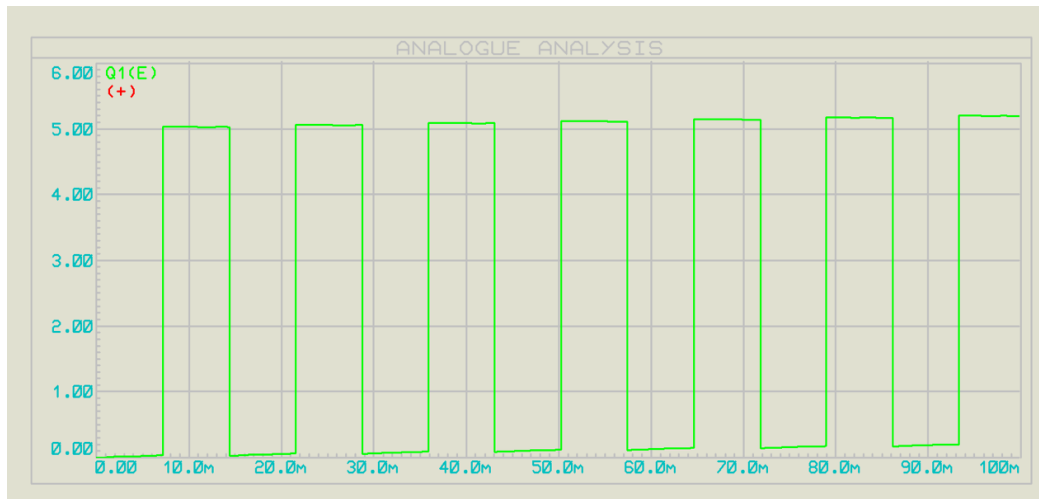


Figure III.11 : Résultat de simulation de PWM.

Les résultats de simulation montrent les formes d'onde de la tension à chaque étape du processus, vérifiant ainsi le bon fonctionnement du système.

Calcul de rapport cyclique α :

On a : TON = 7,24 ms

Et

T = 14,34 ms

$$\alpha = \text{TON} / T \dots \dots \dots (III.9)$$

$$\alpha = 50 \%$$

III.6. 2^{ème} application**III.6.1. Montage du dispositif de récupération d'énergie électrique**

Avec un microcontrôleur PIC16F887, vous pouvez commander un hacheur série à transistor en utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour ajuster la vitesse ou la puissance du circuit. Le PIC16F887 est équipé d'un module PWM intégré qui peut générer des signaux PWM précis nécessaires pour contrôler efficacement la commutation des transistors dans le hacheur série. Ce contrôle permet de réguler la quantité d'énergie délivrée au circuit, influençant ainsi sa vitesse ou sa puissance en fonction des besoins de l'application.

A. Programme sous MicroC

La solution proposée consiste à utiliser le microcontrôleur PIC 16F887 pour générer des signaux en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Le programme développé se base sur l'utilisation du Timer afin d'appliquer différents rapports cycliques de min à max en passant sur les valeurs de 25%, 50%, 75%, pour l'implémenter en suite sur le PIC dans la simulation sur le logiciel ISIS Proteus.

Le programme a été écrit en langage C sur le logiciel «MikroC PROforPIC» donnée comme suite :

```

int ton;
int t;
int ra;

void interrupt() {
t++; // Interrupt causes cnt to be incremented by 1
ton++;
TMR0 = 0; // Timer TMR0 is returned its initial value
if (t == 16) { // Increment port B after 400 interrupts
PORTA = ~PORTA; // Increment number on port B by 1
// Delay_ms(500);
t = 0; // Reset variable t
ton = 0; //reset de ton
}
if (ton == ra) { // Increment port B after 400 interrupts
PORTA = ~PORTA; // Increment number on port B by 1
//Delay_ms(500);
}
INTCON = 0x20; // Bit TOIE is set, bit TOIF is cleared
}

void main() {
OPTION_REG = 0x82; // Prescaler is assigned to timer TMR0
ANSEL = 0; // All I/O pins are configured as digital
ANSELH = 0;
TRISA = 0; // All port B pins are configured as outputs
PORTA = 0x00; // Reset port B
IRTSB = 0xFF; // Port B en entrée
TMR0 = 0; // Timer T0 counts from 0 to 255
INTCON = 0xA0; // Enable interrupt TMR0
t = 0; // Variable t is assigned a 0
ton = 0; // ton =0
ra=15;

do { // Endless loop
if( PORTB == 0x00)
ra = 1;
if( PORTB == 0x01)
ra = 4;
if( PORTB == 0x03)
ra = 8;
if( PORTB == 0x07)
ra = 12;
if( PORTB == 0x0F)
ra = 15;

} while(1);
}

```

Les valeurs du PORTB

PORTB = 0x00 : Correspond à la valeur 0000 en binaire. Cela pourrait représenter le cas où aucun signal particulier n'est détecté ou un état initial. Dans le programme, cela

modifiera pour être égal à 1. Cela pourrait signifier que lorsque PORTB est à 1, ra représente 1, ce qui pourrait être interprété comme $1/16^{\text{ème}}$ du maximum.

PORTB = 0x01 : Correspond à la valeur binaire 0001. Dans le programme, cela modifiera pour être égal à 4. Cela pourrait signifier que lorsque PORTB est à 4, ra représente 4, ce qui pourrait être interprété comme $4/15^{\text{ème}}$ du maximum, soit environ 25% si l'on considère 16 comme le maximum.

PORTB = 0x03 : Correspond à la valeur binaire 0011. Dans le programme, cela modifie ra pour être égal à 8. Cela pourrait représenter $8/15^{\text{ème}}$ du maximum, soit 50%.

PORTB = 0x07 : Correspond à la valeur binaire 0111. Dans le programme, cela modifie ra pour être égal à 12. Cela pourrait représenter $12/15^{\text{ème}}$ du maximum, soit 75%.

PORTB = 0x0F : Correspond à la valeur binaire 1111. Dans le programme, cela modifie ra pour être égal à 15. Cela pourrait représenter le maximum, soit environ 93,75%.

B. Schéma électronique

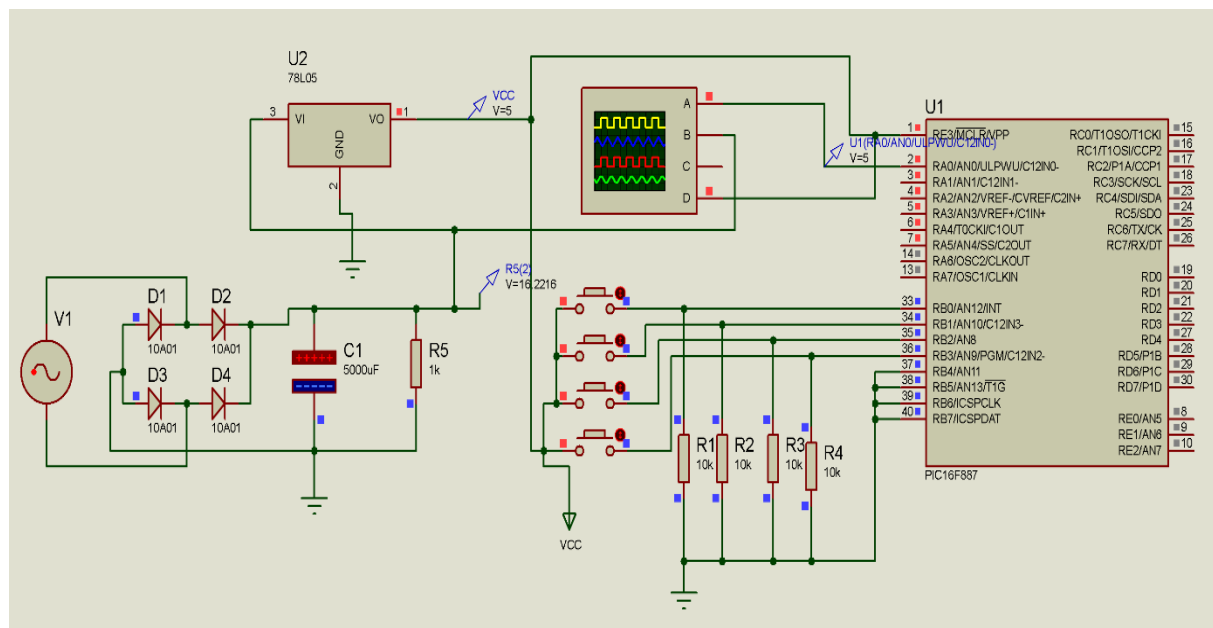


Figure III.12 : Schéma de simulation.

III.6.2 Résultats de simulation sous Isis_Proteus et interprétations

A. Résultats de simulation

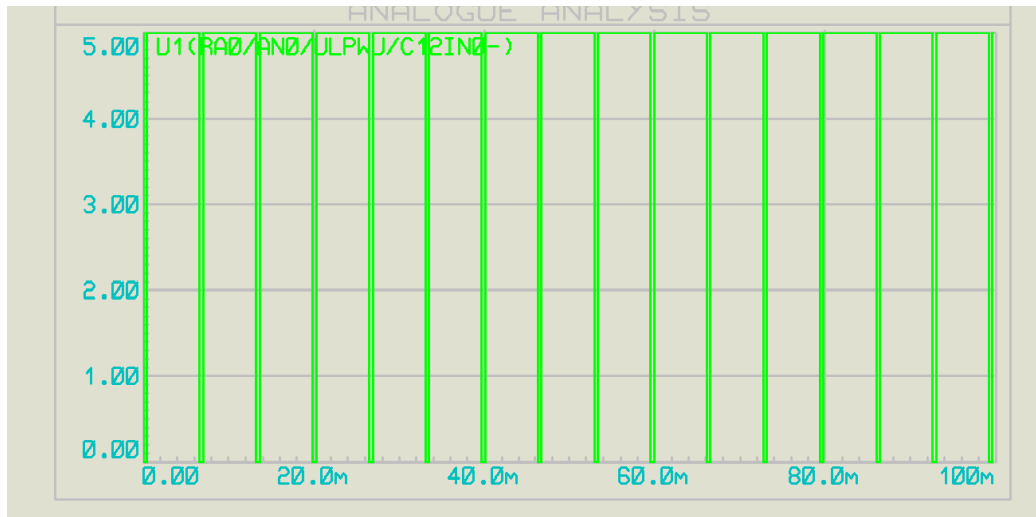


Figure III.13 : Résultat de simulation.

B. Interprétation

Chaque valeur spécifique (1, 4, 8, 12, 15) sur le port B peut correspondre à l'état d'un interrupteur virtuel dans le simulateur Proteus. Chaque fois que le programme détecte un changement ou une condition spécifique sur le port B, il ajustera en conséquence, ce qui peut entraîner d'autres actions ou configurations dans notre système simulé.

1. Lorsque l'interrupteur est fermé sur 0, cela signifie que le niveau de batterie est au minimum, indiquant une charge très faible.

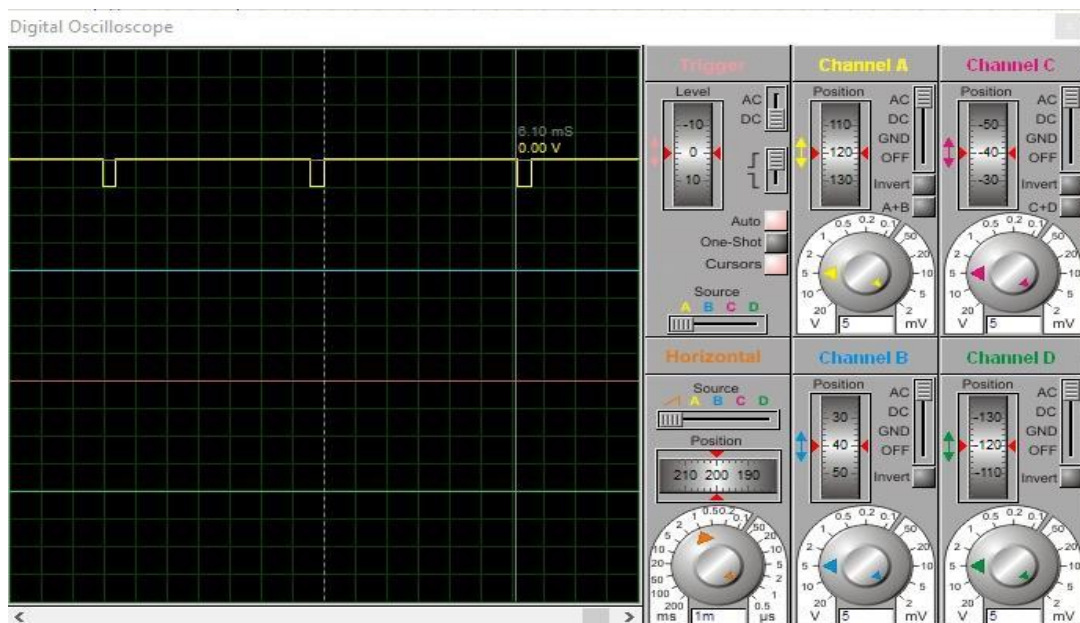


Figure III.14 : Résultat de simulation $ra=1$.

- Si l'interrupteur est sur 4, cela correspond à un niveau de batterie d'environ 25%, indiquant une charge faible mais pas critique. La tension délivrée est environ 1.25 volts.

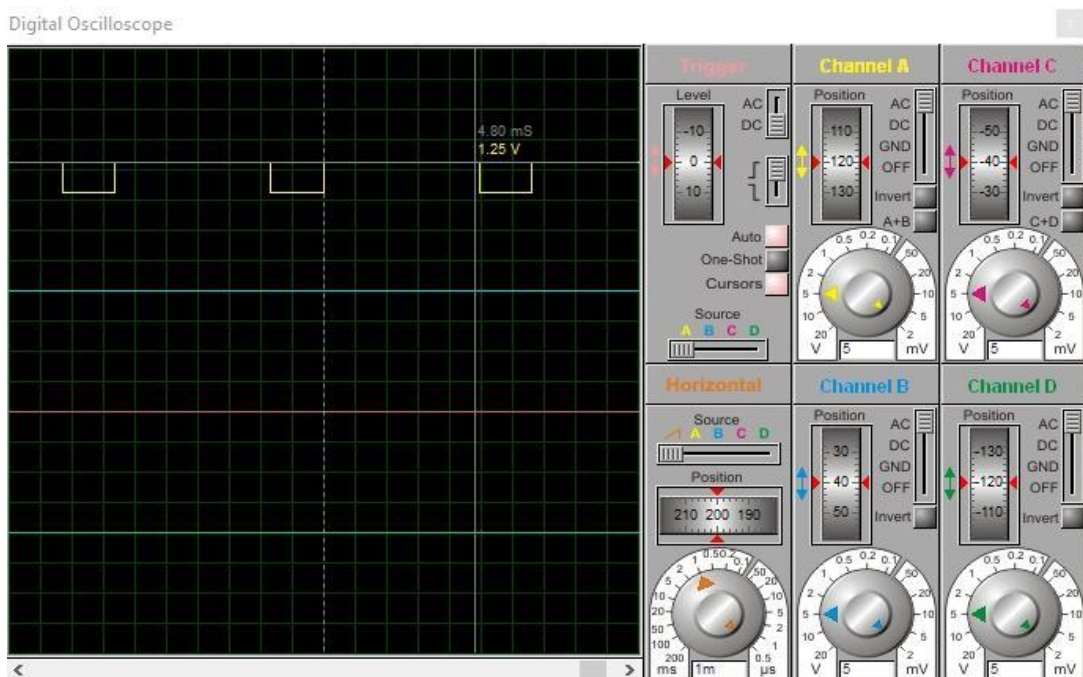


Figure III.15 : Résultat de simulation $ra=4$.

- Lorsque l'interrupteur est positionné sur 8, cela signifie que le niveau de batterie est à environ 50%, indiquant une charge moyenne. La tension délivrée est environ 2.25 volts.

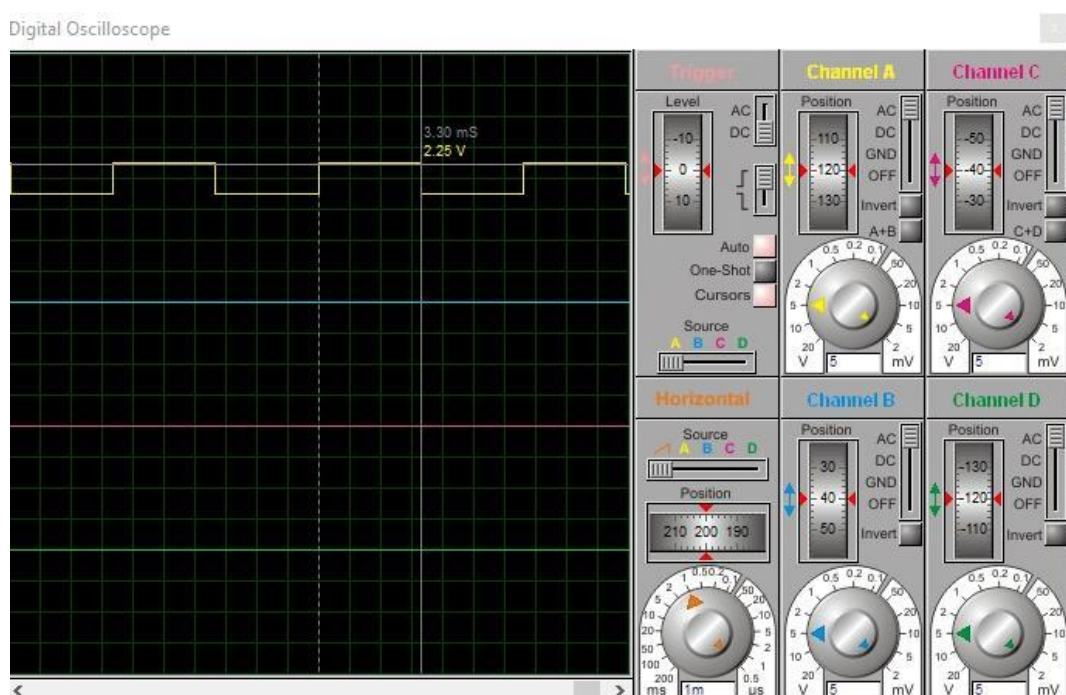


Figure III.16 : Résultat de simulation ra=8.

- Si l'interrupteur est sur 12, cela correspond à un niveau de batterie d'environ 75%, indiquant une charge assez élevée. La tension délivrée est environ 3.50 volts.

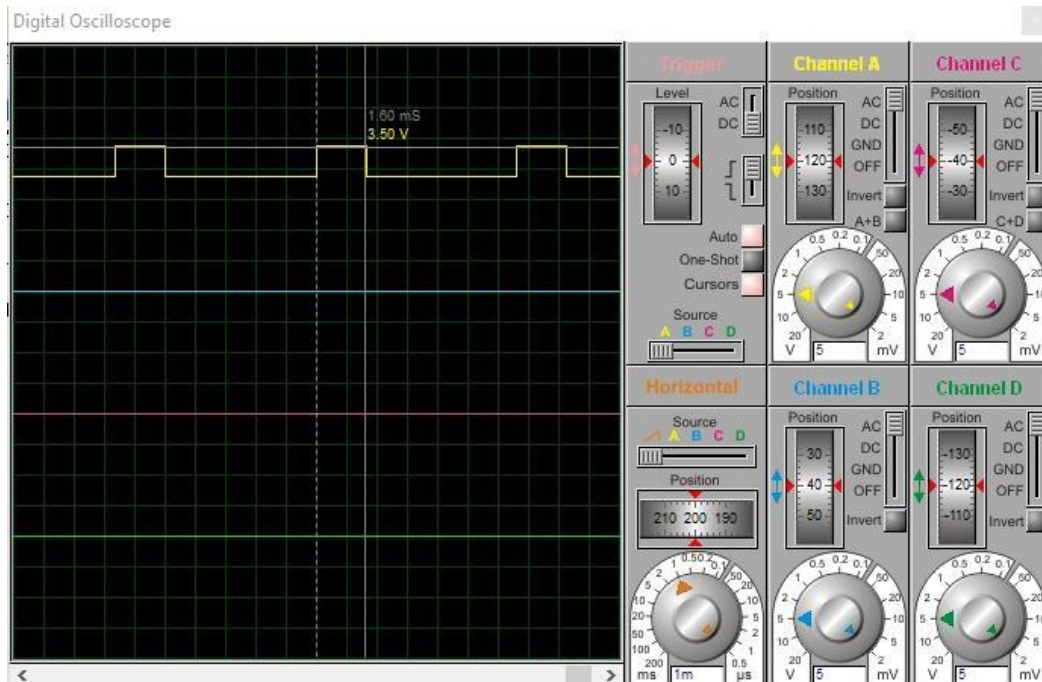


Figure III.17 : Résultat de simulation ra=12.

- Enfin, lorsque l'interrupteur est sur 15, cela indique que le niveau de batterie est au maximum, avec une charge complète et prête à être utilisée. La tension délivrée est environ 4.75volts.

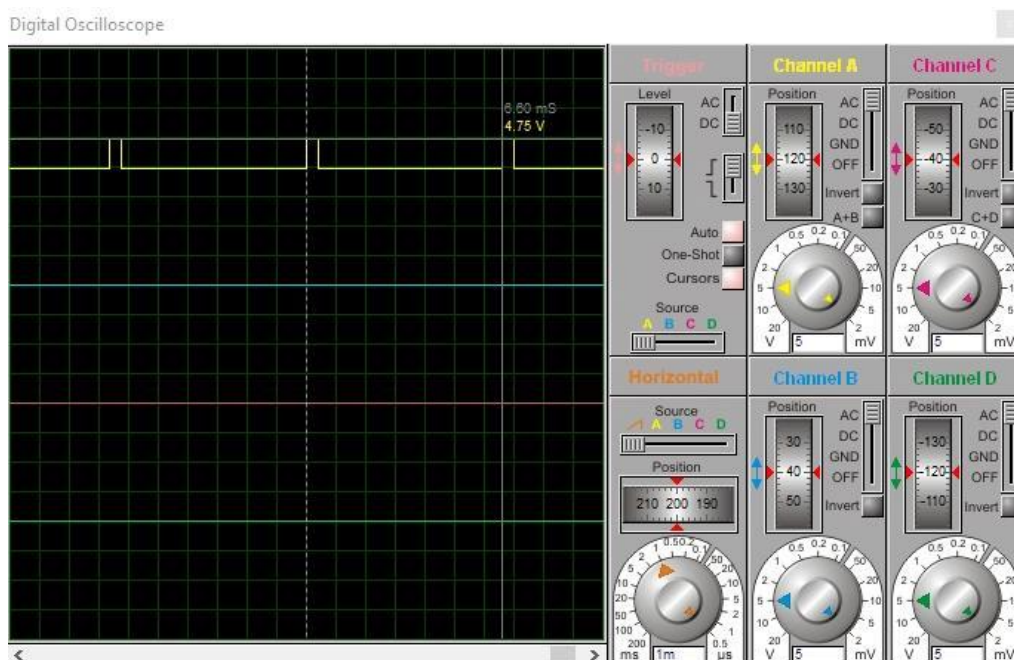


Figure III.18 : Résultat de simulation Max.

En conclusion, l'analyse et la représentation de ce système sur Proteus mettent en évidence la possibilité et l'efficacité de l'utilisation de l'énergie piézoélectrique pour alimenter des appareils biomédicaux, en générant un signal carré cohérent en sortie. Cette recherche met en évidence l'importance de ces outils dans la création et la vérification des dispositifs électriques. Selon les résultats qu'on a obtenus et d'après les calculs qu'on a fait, il est possible de conclure que ces résultats sont à peu près similaires à ceux obtenus en simulation.

III.7. Caractérisation expérimentale

III.7.1. Introduction

Dans cette partie, nous nous concentrons sur l'application pratique de notre projet de récupération d'énergie piézoélectrique. Nous détaillerons les différentes étapes de la mise en œuvre du système, en commençant par la conception et l'assemblage des composants nécessaires. Nous aborderons le fonctionnement du générateur piézoélectrique, suivis par les processus de redressement, de filtrage et de hachage de l'énergie. En outre, nous expliquerons la commande du hacheur pour le chargement efficace d'une batterie. Les résultats expérimentaux obtenus seront présentés et analysés, permettant d'évaluer la performance du système et d'identifier les axes d'amélioration pour des applications futures.

III.7.2. Matériels utilisés

Il est possible d'utiliser le disque piézoélectrique sans boîtier constitué d'un disque métallique sur lequel est collé un élément piézo-céramique. Comme générateur d'énergie en convertissant l'énergie mécanique en électricité. Quand on applique Une tension alternative sur cet élément provoquera une contraction ou une expansion diamétrale de l'élément, ce qui produit un signal électrique .Il est possible de capter et de stocker ce signal afin d'alimenter des systèmes ou des appareils.

Cela offre la possibilité de récupérer de l'énergie renouvelable provenant de mouvements ou de vibrations.

III.7.3. Les caractéristiques du disque piézoélectrique

- Tension nominale: 15 à 30 [V]
- Consommation: 1,5 [mA]

- Fréquence: 0,5 à 20 [kHz]
- Niveau sonore: 75 [dB]
- Diamètre: 50 [mm]
- Longueur fils: 10 [cm]
- Raccordement par fils.

Ce type de disque piézoélectrique sans boîtier est largement utilisé dans de nombreux produits électroniques grand public et industriels en raison de ses avantages en termes de coût, de taille et de fiabilité.

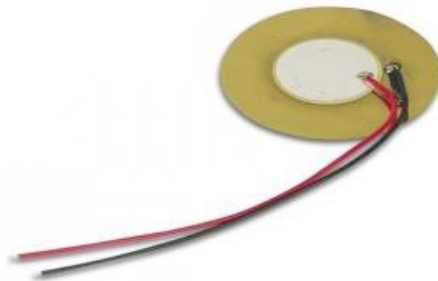


Figure III.19 : Capteur piézoélectrique.

III.7.4. Montage réalisé du récupérateur d'énergie piézoélectrique

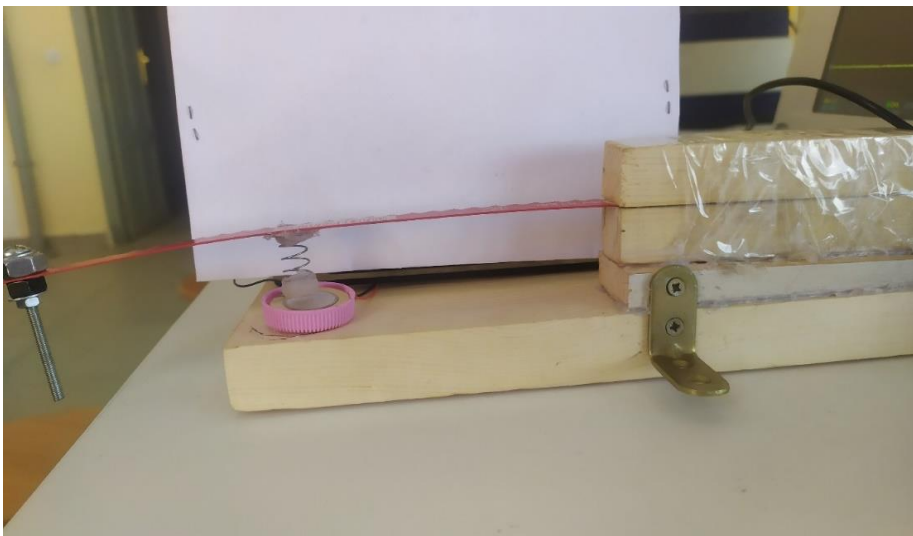
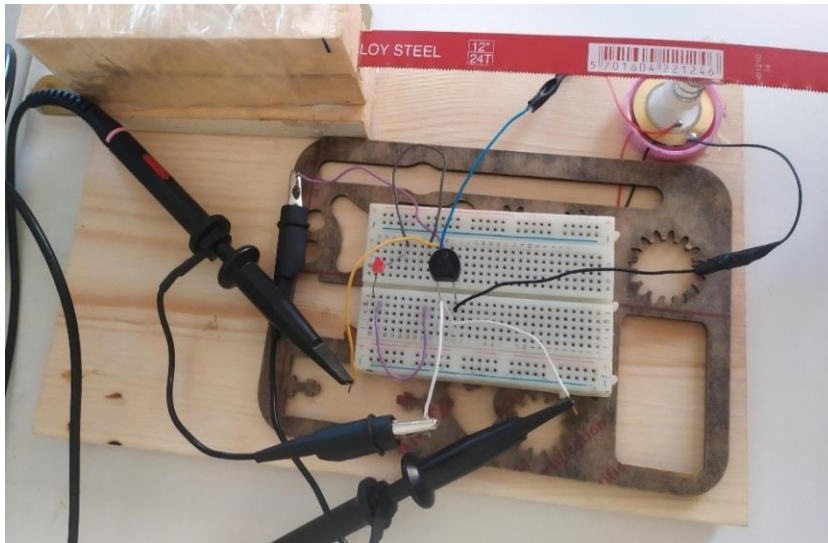


Figure III.20 : Principe d'un générateur piézoélectrique.

Cette expérience démontre l'utilisation d'un matériau piézoélectrique pour détecter des vibrations. Une masse sismique est attachée à un ressort au-dessus du matériau piézoélectrique. Lorsqu'une vibration ou un choc déplace la masse, le ressort comprime le matériau piézoélectrique, générant ainsi une charge électrique.

III.7.5. Schéma électronique

**Figure III.21** : Schéma de récupération d'énergie piézoélectrique.

Lorsqu'on applique une pression sur la masse sismique, le ressort génère des vibrations. Ces vibrations sont transmises au matériau piézoélectrique, produisant ainsi une charge électrique. Cette charge est ensuite redressée par un pont de diodes pour fournir une alimentation électrique stable, permettant d'allumer une LED.

Le pont de diode choisi 840 C800 2401, ces ponts de diodes sont utilisés pour redresser le courant alternatif en courant continu, ce qui est utile pour alimenter des éléments qui nécessitent une alimentation en courant continu, comme des LED ou des automatiques industriels.

La LED (Light-Emitting Diode) est un composant électronique qui émet de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.

III.7.6. Résultats et interprétations

Les pics observés sur l'oscilloscope représentent les variations de tension générées par le matériau piézoélectrique en réponse aux vibrations appliquées. Lorsque le matériau piézoélectrique est soumis à une pression ou à des vibrations, il produit une tension qui fluctue rapidement, créant des pics sur le signal bleu (CH2). Ces pics montrent la force et la fréquence des vibrations. Après passage par le pont de diodes, le signal jaune (CH1) montre la tension redressée, où les pics sont transformés en une tension continue avec quelques ondulations résiduelles. Cela démontre comment l'énergie mécanique des vibrations est convertie en énergie électrique utilisable pour, par exemple, allumer une LED.

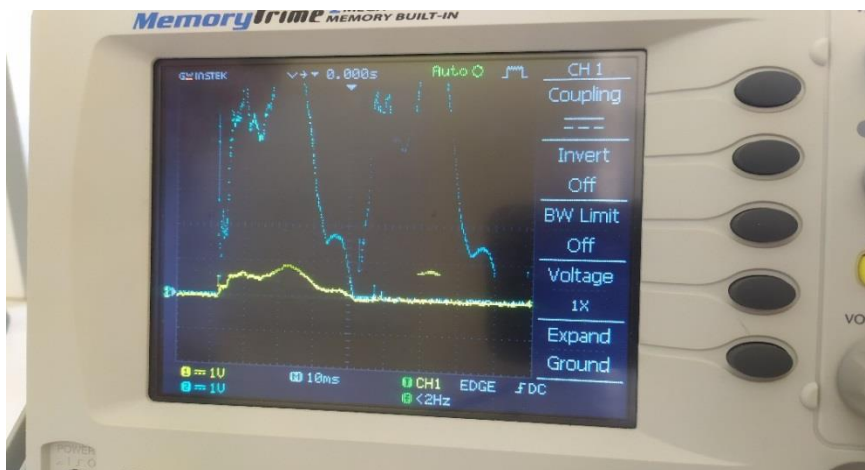


Figure III.22 : Résultat sous l'oscilloscope.

La puissance générée par ce générateur piézo-électrique ne permet pas d'obtenir certaines valeurs de tension de sortie nécessaire pour alimenter un dispositif biomédical.

Pour alimenter un dispositif biomédical de 5 volts il nous faut un générateur piézo-électrique beaucoup plus puissant qui peut générer par exemple 5, 9, 12, 18 volts.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir et d'optimiser un système de récupération d'énergie piézo-électrique pour des applications biomédicales. Les travaux réalisés ont permis de démontrer le potentiel de cette technologie émergente pour valoriser l'énergie des vibrations ambiantes.

Dans un premier temps, nous avons dressé un état de l'art complet sur la piézoélectricité, retraçant son historique, ses principes fondamentaux ainsi que ses avantages et inconvénients. Nous avons également détaillé ses nombreuses applications, en mettant l'accent sur le domaine biomédical dans l'échographie, les sonars dans la marine, les accéléromètres... etc.

Ensuite, nous avons modélisé les matériaux piézoélectriques et le circuit électrique complet de récupération d'énergie, comprenant les étapes de redressement, filtrage et hachage. Cette modélisation nous a permis d'optimiser chaque composant en vue d'une réalisation concrète.

Le dispositif de récupération d'énergie piézo-électrique fonctionne en convertissant les vibrations mécaniques en énergie électrique grâce aux propriétés des matériaux piézoélectriques. Lorsqu'un matériau piézoélectrique est soumis à une contrainte mécanique, il génère une tension électrique. Ce phénomène est exploité pour capturer l'énergie des vibrations ambiantes

L'autonomie du dispositif dépend de la fréquence et de l'amplitude des vibrations mécaniques présentes dans l'environnement. Plus les vibrations sont fréquentes et intenses, plus l'énergie récupérée sera importante, ce qui permet de maintenir la batterie chargée plus longtemps. Dans des conditions optimales, le système peut fournir une source d'énergie quasi inépuisable tant que des vibrations sont présentes.

Pour finir notre travail on a entamé la partie applications qui résume notre travail. Dans cette partie nous avons simulé les différents étages sous Proteus (Isis plus) et le programme de commande des PIC sous microC. Nous avons consacré notre travail à la réalisation d'un prototype de récupération d'énergie basé sur l'utilisation des matériaux piézoélectriques, permettant de charger une batterie à partir des vibrations mécaniques. Les performances de ce dispositif sont analysées et discutées.

Les résultats obtenus montrent que la piézoélectricité peut être utilisée pour charger des batteries à partir des vibrations mécaniques, Cela ouvre des perspectives intéressantes pour l'intégration de tels systèmes dans des dispositifs médicaux autonomes.

Les perspectives d'avenir pour cette technologie sont prometteuses. Il est possible d'améliorer l'efficacité et la viabilité de ces systèmes en miniaturisant les composants, en améliorant les matériaux piézoélectriques et en optimisant les circuits de récupération d'énergie.

En dehors du secteur biomédical, où les piézoélectriques sont déjà largement employés pour des applications telles que les implants et les dispositifs de diagnostic, ces technologies trouvent de nouvelles applications dans les appareils portables (montres intelligentes), les capteurs autonomes (surveillance environnementale) et les systèmes embarqués dans différentes industries (surveillance des machines).

Enfin, la conception et l'optimisation des systèmes de récupération d'énergie piézo-électrique dans le domaine de la biomédecine représentent une avenue prometteuse pour répondre aux défis énergétiques tout en améliorant les technologies médicales.



Bibliographie

- [1] BELMOKHTAR Fatima Zohra et CHAMEKH Ikrame « Récupération d'énergie à base d'un matériau piézoélectrique pour alimenter un dispositif médical». Mémoire de master. Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen. 2019-2020.
- [2] A. Einstein, « « La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. », p. 235.
- [3] M. Defosseux, « Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes », p. 224.
- [4] A. Ballato. Piezoelectricity History and New Thrusts. In, 1996 IEEE Ultrasonics. Symposium, 1996. Proceedings, volume 1, pages 575-583 vol. 1. IEEE, November 1996.
- [5] Dejan VASIC .François COSTA « Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance » dossier technique de l'ingénieur.D3235 .2022
- [6] G. Lippmann, Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques. J. Phys. Theor. Appl. 10 (1) (1881) 381-394.
- [7] M.A. Ainslie, Introduction, in M. Ainslie (Ed.). Principles of Sonar Performance Modelling, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. (2010) : pp. 3-26.
- [8] M. L.SAHLI, «modélisation et contrôle de sante des matériaux composites hybrides à propriété adaptables». 2009.
- [9] Faiza Boukazouha «Conception, Réalisation, Modélisation et Caractérisation Expérimentale d'un Transformateur de Tension de Type Rosen». Thèse .2016.
- [10] Grey et al. « Piezoelectric Materials : A Compréhensive Overview. »2021.
- [11] B. kouider « contrôle active de vibration par les matériaux piézoélectrique» 2012.
- [12] Libor. Rufer, Transducteurs électroacoustiques et ultrasonores : Des macro-aux micro-systemes», thèse de doctorat, université Joseph Fourier, Grenoble, 2007.
- [13] S. Mahon, R. Aigner, « Bulk Acoustic Wave Devices Why, how, where they are going », CS Mantech conference, 2007.
- [14] G. Sauerbrey. Utilisation du quartz pour l'alimentation en eau et en micro-ondes. Zeitschrift für Physik, 155 : 206-222, 1959.

- [15] Sylvain GIRAUD « Étude, conception et réalisation de résonateurs piézoélectriques pour des applications hautes fréquences» Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES. 2007.
- [16] A. Hamie « Prototype d'une micro pompe dédiée à l'injection des médicaments anti-épileptiques». Maîtrise ès sciences appliquée, école polytechnique de Montréal. Mémoire de master .2013
- [17] «(en) K. Uchino, « Piezoelectric ultrasonic motors : overview », Smart Materials and Structures, vol. 7, rchive]»). lire en ligne [a] 285–p. 273 ,1998
- [18] Moteurs piézoélectriques [archive] par Bertrand Nogare de sur Techniques de l'ingénieur.
- [19] <https://spseriengabriel.wixsite.com/footenergie/blank-1>.
- [20] Do Manh Cuong. « Piezoelectric Transformer Integration Possibility in High Power Density Applications ». Thèse de doctorat d'Allemagne, 2008.
- [21] S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue S. « Hirose. Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer » and its Application to High Voltage Power Inverter. IEEE Ultrasonics Symposium. (1994). P 525-530.
- [22] Thien. HOANG « Dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique : modélisation, fabrication et caractérisation ». Thèse.2019.
- [23] NICOLAS RIZET, « Contrôle actif de vibrations utilisant des matériaux piézo-électriques », thèse de doctorat, INSA de LYON, année 1999, p13, 17.
- [24] CHELLI Zakia. CHERFAOUI Lamia «Elaboration d'une pastille piézoélectrique pour une application médicale» mémoire de master. 2016.
- [25] <https://images.app.goo.gl/DisUgiA5k9JzqpPXA> .
- [26] Manfred Weber, Piezoelectric Accelerometers Theory and Application, Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.2012.
- [27] <https://pytheas-technology.com/news/la-piezoelectricite-simplement/>
- [28] Ikhbarzaade.shop. image «en ligne »

- [29] Zahira. Boutaichi « Étude des écoulements de liquide dans une micropompe piézoélectrique à deux chambres pour une conception améliorée». (Mémoire de maîtrise). Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.2019
- [30] Koch, M., et al.. A novel micropump design with thick-film piezoelectric actuation. *Measurement Science and Technology*, 1997. 8(1) : p. 49.
- [31] A. Deboucha, W. Bouafa . «Contrôle de vibration pour les matériaux piézo-électrique des pales éolienne » Mémoire. Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi- Bordj Bou Arreridj. 2022.
- [32] S. HARARI, « CONTRÔLE MODAL SEMI-ACTIF ET ACTIF À FAIBLE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE PAR COMPOSANTS PIÉZOÉLECTRIQUES »,12 octobre 2009.
- [33] A. Kherif ; «Synthèse, caractérisations et étude structural des céramiques PZT de type pérovskite Pb-Laz Cax (Zry Ti-Y) 0.75 (Sb) 025] 03», Mémoire, Université Mentouri de Constantine Algérie (2012).
- [34] K.K. Shung, J.M. Cannata, and Q.F. Zhou. Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications : A review. *Journal of Electroceramics*, 19(1) :139-145, 2007. (Cité page 8.)
- [35] M. Luo, H. Luo, D. Axinte, D. Liu, J. Mei, and Z. Liao, « A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors, » *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 110, pp. 556-568, Sep. 2018, doi : 10.1016/j.ymsp.2018.03.040.
- [36] "Piézoélectricité, ferroélectricité et applications industrielles du PZT." [Online]. Available: <http://csidoc.insa-lyon.fr/these/2003/millon/chapitre1.pdf>
- [37] M. E. A. Brix Nigass, «Conception et réalisation d'un micro-actionneur à forte amplitude de déflexion »
- [38] AIN ». Consulté le: 28.04.2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/AIN>.
- [39] [https://www.researchgate.net content://media/external/downloads/44836](https://www.researchgate.net/content://media/external/downloads/44836).

- [40] L. Meharga, H. Cherigui. «Récupération d'énergie mécanique à l'aide des matériaux intelligents par des méthodes non linéaires» mémoire. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj. Juin 2013.
- [41] <https://www.scribd.com/document/697551601/Recuperation-d-energie>
- [42] Maiza Leithe, Abd Alhamid Saker Med Lamine, Moumen Kamel Elyes. « Les redresseurs commandés». Institut de formation professionnelle Didouche Mourad Annaba.
- [43]https://mcours.net/cours/pdf/scien1/Redresseur_simple_alternance_monophase_hjkiu.pdf.
- [44] NGUYEN Ngoc Linh. Thèse. «Conception et réalisation d'un convertisseur multiniveaux entrelacé pour une application photovoltaïque ».Université de Grenoble, France, 2012.
- [45] AMARA Yahia. Thèse. « Contribution à l'étude de la commande non linéaire des convertisseurs statiques en utilisant les modes de glissement d'ordre supérieur ».Université de Sétif 1, Algérie, 2010.
- [46] F.TAIHI & S.BENMAIZA. Mémoire. « Etude et implémentation d'un filtre RIF adaptatif sous VHDL ».Université SAAD DAHLAB de BLIDA .2017-2018.
- [47] m.s.hadji, n. bouhafs, "etude et conception de filtre passe bande ultra large bande pour les systèmes de communication sans fil", université kasdi merbah ouargla, p17, mai 2017
- [48] https://www.gchagnon.fr/cours/courlong/4_3_1_3.html.
- [49] Ali. Soltani. Mémoire, « Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP » UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI. 2016.
- [50] H. LEQUEU, IUT-EDP-9, 2004/2005.Thierry LEQUEU-Mars 2005 DIV435] Fichier: IUT-EDP-9.DOC.
- [51] <http://physiquenetappliquee.free.fr/hacheur.php>.
- [52] Guy SEGUIER <<< L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE >> les fonctions de base et leurs principales. Applications, 7^{ème} édition, professeur à l'université des sciences et techniques de Lille, édition londres paris newyork 1997.

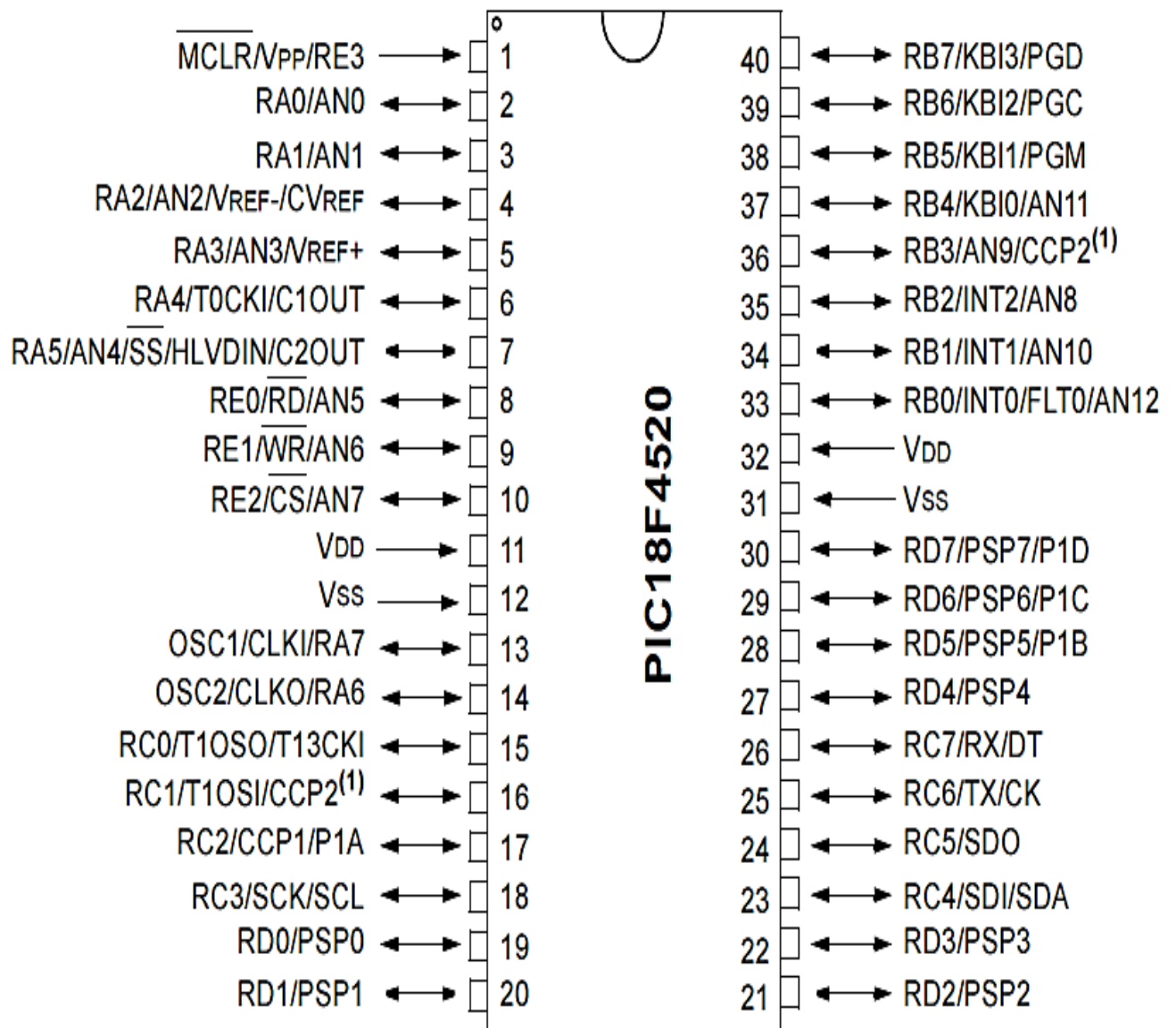
[53] Fares Chahinaz, Chouchane Tahani. «COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC PAR UN MICRO CONTROLEUR» Mémoire. Université Larbi Tébessi - Tébessa - 2021.

[54] Z.BELHOCINE, K.KHELIFAOUI «Conception et réalisation de la carte de commande D'une tournette» Mémoire. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.

[55] https://wikigeii.iut-troyes.univ-reims.fr/images/d/df/Fr_1st_project_pic_c_v101.pdf



Annexes



PIC18F2420/2520/4420/4520

REGISTER 2-2: OSCCON: OSCILLATOR CONTROL REGISTER

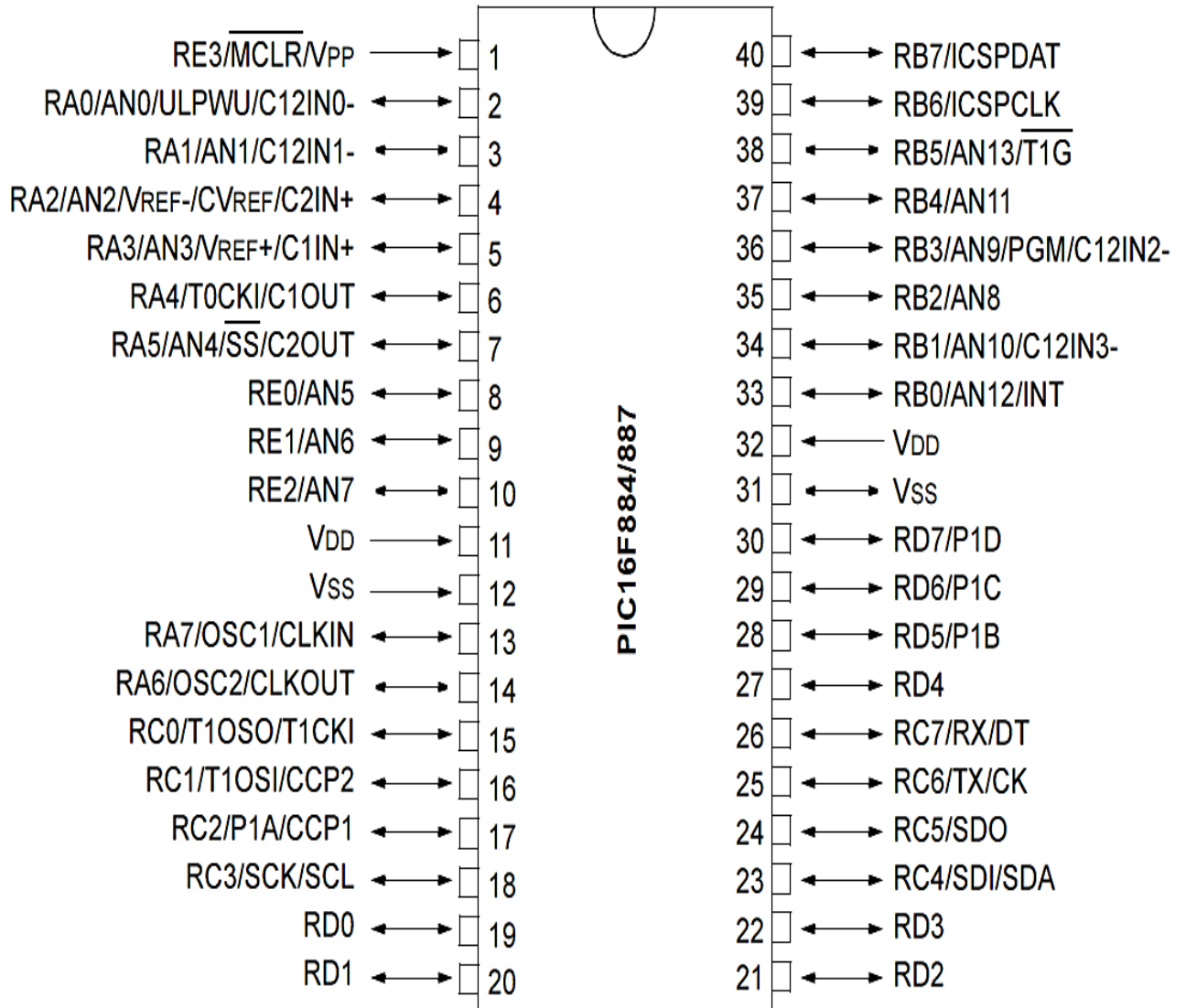
R/W-0	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R ⁽¹⁾	R-0	R/W-0	R/W-0
IDLEN	IRCF2	IRCF1	IRCF0	OSTS	IOFS	SCS1	SCS0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'
-n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared
		x = Bit is unknown

- bit 7 **IDLEN:** Idle Enable bit
 - 1 = Device enters an Idle mode on *SLEEP* instruction
 - 0 = Device enters Sleep mode on *SLEEP* instruction
- bit 6-4 **IRCF<2:0>:** Internal Oscillator Frequency Select bits
 - 111 = 8 MHz (INTOSC drives clock directly)
 - 110 = 4 MHz
 - 101 = 2 MHz
 - 100 = 1 MHz⁽³⁾
 - 011 = 500 kHz
 - 010 = 250 kHz
 - 001 = 125 kHz
 - 000 = 31 kHz (from either INTOSC/256 or INTRC directly)⁽²⁾
- bit 3 **OSTS:** Oscillator Start-up Timer Time-out Status bit⁽¹⁾
 - 1 = Oscillator Start-up Timer (OST) time-out has expired; primary oscillator is running
 - 0 = Oscillator Start-up Timer (OST) time-out is running; primary oscillator is not ready
- bit 2 **IOFS:** INTOSC Frequency Stable bit
 - 1 = INTOSC frequency is stable
 - 0 = INTOSC frequency is not stable
- bit 1-0 **SCS<1:0>:** System Clock Select bits
 - 1x = Internal oscillator block
 - 01 = Secondary (Timer1) oscillator
 - 00 = Primary oscillator

- Note 1:** Reset state depends on state of the IESO Configuration bit.
Note 2: Source selected by the INTSRC bit (OSCTUNE<7>), see text.
Note 3: Default output frequency of INTOSC on Reset.



Résumé

Les systèmes de récupération d'énergie vibratoire permettent de générer de l'électricité à partir des vibrations ambiantes. Ils offrent une alternative à l'utilisation de batteries pour l'alimentation des systèmes électroniques embarqués à faible consommation d'énergie, comme les MEMS. Dans le cadre de notre travail, nous avons conçu et réalisé un prototype de générateur piézoélectrique destiné à alimenter des systèmes portables. Les matériaux utilisés sont des céramiques en PZT, qui fonctionnent en compression sous l'effet de contraintes de faible fréquence (régime quasi-statique). Le générateur se compose de trois parties : le dispositif mécanique d'application (DMA) de la contrainte, le système piézoélectrique (SP) et le système de récupération (SR). Pour cela, nous avons subdivisé cette étude en plusieurs chapitres, détaillant les étapes nécessaires à la conception et à la réalisation du générateur. Le logiciel PROTEUS a été utilisé comme outil de simulation dans ce travail, afin de développer, analyser et examiner les modèles et les performances des lois de commandes élaborées. Enfin, une conclusion résume l'ensemble des travaux présentés et propose des perspectives pour de futurs développements.

ملخص

تقوم أنظمة تجميع طاقة الاهتزاز بتوليد الكهرباء من الاهتزازات المحيطة. وهي توفر بديلاً لاستخدام البطاريات لتشغيل الأنظمة الإلكترونية المدمجة منخفضة الطاقة، مثل MEMS. وفي هذا السياق، قمنا بتصميم وإنتاج نموذج أولي لمولد كهروضغية مخصص لتشغيل الأنظمة المحمولة. المواد المستخدمة هي سيراميك PZT، الذي يعمل بالضغط تحت تأثير ضغوط التردد المنخفض (النظام شبه الساكن). يتكون المولد من ثلاثة أجزاء: جهاز تطبيق الضغط الميكانيكي (DMA)، والنظام الكهروضغية (SP)، ونظام الاسترداد (SR). وللقيام بذلك، قمنا بتقسيم هذه الدراسة إلى عدة فصول، مع تفصيل الخطوات اللازمة لتصميم وبناء المولد. تم استخدام برنامج PROTEUS كأداة محاكاة في هذا العمل من أجل تطوير وتحليل وفحص نماذج وأداء قوانين الرقابة المطورة. وأخيراً، يلخص الاستنتاج جميع الأعمال المقدمة ويقدم وجهات نظر للتطورات المستقبلية.

Abstract

Vibration energy harvesting systems allow the generation of electricity from ambient vibrations. They offer an alternative to using batteries for powering low-energy consumption embedded electronic systems such as MEMS. In this context, we designed and built a prototype piezoelectric generator intended to power portable systems. The materials used are PZT ceramics, which operate in compression under the effect of low-frequency stress (quasi-static regime). The generator consists of three parts: the mechanical stress application device (DMA), the piezoelectric system (SP), and the recovery system (SR). To achieve this, we divided the study into several sections, detailing the steps necessary for the design and realization of this project. The PROTEUS software was used as a simulation tool in this work to develop and analyze the models studied through simulation, in order to examine the performance of the developed control law. Finally, a conclusion summarizes all the presented work and proposes perspectives for future work.

Key words: Piezoelectric, MEMS, PZT, PWM, PIC, piezoelectric materials.

