

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : ELECTRONIQUE

Spécialité : INSTRUMENTATION

Par : SAIDI YOUSRA HIBAT ALLAH et MECHEMACHE SARAH

Sujet

Etude d'un système de récupération d'énergie fonctionnant sur le principe de la piézoélectricité

Soutenu publiquement, le 11 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Mme BOUAZZA née GUEN Ahlam	Professeur	Université de Tlemcen	Présidente
M LACHACHI Djamel	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
M BRIXI NIGASSA Med El Amine	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme BOUZID Asma	Doctorante	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2023 / 2024



DEDICACE

— Je dédie ce Travail :

— À mon cher père : **Sidi Mohammed**

Ta force, ta sagesse et ton soutien ont été ma lumière à chaque étape. Tu as toujours été là, avec ton amour et tes conseils. Merci pour tout ce que tu as sacrifié et fait pour moi. Ta présence et ton inspiration ont été essentielles. Cette réussite est autant la tienne que la mienne.

— À ma chère mère : **Souad**

Ta douceur, ton amour et ta force m'ont soutenu toute ma vie. À chaque défi, tu as été là pour moi, m'offrant soutien et réconfort. Ce mémoire exprime ma gratitude pour tout ce que tu as sacrifié et donné. Tu es ma source d'inspiration. Cette réussite est aussi la tienne, grâce à l'éducation et l'amour que tu m'as offert.

— À mes adorables sœurs : **Djihed, Radjaa et Madjda**

Pour votre soutien inestimable et vos encouragements permanents. Vous êtes une source de motivation et de joie pour moi. Que Dieu vous protège et vous accorde le succès dans tous ce que vous entreprenez.

— À mon frère adoré : **Abdelmounim**

Pour ton humour et ta bienveillance qui illuminent ma vie. Que Dieu veille sur toi, te protégeant et te guidant à chaque étape de ton chemin.

— À mes amies

Pour votre amitié sincère, votre écoute attentive et vos encouragements dans les moments de doute. Votre présence à mes côtés a été un véritable soutien, je tiens également à exprimer ma gratitude envers ma chère amie, ma binôme, pour son soutien indéfectible. Merci d'être là, Je vous aime.

— À Toute ma famille Tout ceux qui m'aiment et que j'aime.

— **SAIDI Yousra Hibat Allah**



DEDICACE

— J'ai le grand plaisir de dédie ce mémoire à :

Ma famille, elle qui m'a dote d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis
aujourd'hui :

A mon très cher père, dont la sagesse et le soutien constant ont été une source d'inspiration
et de force pour moi, je suis éternellement reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour
moi. Merci pour ton amour inconditionnel et ta force et tes précieux conseils .

A ma très chère mère , quoi que je fasse ou que je dise , je ne saurai point de te remercier
comme il se doit .Ton amour , tes encouragements ,ta patience , ton soutien sans faille tout
au long de mon parcours , ta sagesse m'ont guide a inspiré chaque jour .

Que dieu , le tout puissant, les préserve et les procure sante et la longue vie .

A ma très chère sœur, ta présence a été une source de réconfort et de motivation .Merci
pour ta complicité , ton soutien et tes moments de joie partagés. Je suis chanceuse de
t'avoir a mes cotés.

A toutes ma famille ,mes amies pour votre encouragements , vous avez toujours été la dans
les moments de doutes et de stresse , et tous ceux que j'aime.

En fin, a chère amie avant d'être mon binôme , Ce mémoire est le fruit de notre parcours
commun .

A vous cher lecteurs .

— **MECHEMACHE Sarah**



REMERCIEMENTS

APRÈS avoir rendu grâce à Dieu le Tout-Puissant et le Miséricordieux, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidés et facilité la vie pendant tout notre parcours à l'Université de Tlemcen, de M le Doyen de la faculté de technologie jusqu'aux plus petits fonctionnaires.

NOUS adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, **M. BRIXI-NIGASSA Mohammed El Amine**, Maître de conférences classe B pour votre patience, votre disponibilité et surtout vos judicieux conseils. Nous désirons aussi remercier tous les professeurs de génie électrique, spécialement ceux de l'option Instrumentation, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

EN particulier, nous remercions les membres du jury de notre travail pour avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce travail.

NOUS tenons à remercier **Mme BOUAZZA née GUEN Ahlam**, Professeur à l'Université de Tlemcen, et **M. LACHACHI Djamel**, Maître de conférences classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de faire partie de notre jury et pour l'honneur qu'ils nous ont fait en étudiant avec attention notre travail.

À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude. Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin pour rendre ce travail réalisable et présentable.



TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 la récupération d'énergie	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 Les sources d'énergie ambiante	4
1.3 Principe de la récupération d'énergies ambiantes	5
1.3.1 La récupération d'énergie solaire photovoltaïque	5
1.3.2 La récupération d'énergie vibratoire ambiante	6
1.3.3 La récupération d'énergie géothermique	6
1.3.4 La récupération d'énergie éolienne	7
1.3.5 La récupération d'énergie biomasse	8
1.3.6 La récupération d'énergie hydraulique	8
1.4 Récupération d'énergie à échelle réduite	10
1.5 Les Mécanismes de conversion d'énergie	10
1.5.1 Transduction piézoélectrique	10
1.5.2 Transduction Electromagnétique	11
1.5.3 Transduction électrostatique	11
1.6 La Piézoélectricité	13
1.6.1 Définition	13
1.6.2 Symétrie et piézoélectricité	14
1.6.3 Équation de la piézoélectricité	15
1.6.3.1 Les indices de directions	16
1.6.4 Modes de déformation dans les matériaux piézoélectriques	17
1.6.4.1 Mode de compression (mode d33)	17

1.6.4.2	Mode transversal (mode d31)	17
1.6.4.3	Mode de cisaillement (mode d15)	18
1.7	Les Matériaux piézoélectriques	18
1.7.1	Les céramiques piézoélectriques	19
1.7.2	Polymères piézoélectriques	19
1.7.3	Monocristaux semi-conducteurs	19
1.8	Applications	20
1.9	Avantages et inconvénients des matériaux piézoélectriques	21
1.10	Comparaison entre les différents matériaux piézoélectriques	21
1.11	Conclusion	22
2	Simulation sous Comsol Multiphysics d'un capteur piézoélectrique	23
2.1	Introduction	24
2.2	Présentation du Logiciel Comsol Multiphysics	24
2.2.1	Création d'un programme sous Comsol Multiphysics	24
2.2.2	Fenêtre principale de Comsol Multiphysics	25
2.3	Composant choisi pour la modélisation sous Comsol Multiphysics	27
2.3.1	Paramètre du Modèle	27
2.3.2	Modélisation d'un capteur piézoélectrique sous logiciel Comsol Multiphysics	28
2.3.3	Dessin du capteur piézoélectrique	28
2.3.4	Matériaux du capteur piézoélectrique	31
2.3.5	Étude de la physique	33
2.3.5.1	Mécanique du solide	33
2.3.5.2	Électrostatique	34
2.3.5.3	Le circuit électrique et le couplage multiphysiques	34
2.3.6	Le Maillage	35
2.3.7	Partie étude	35
2.3.8	Résultats	36
2.4	Analyse comparative sur la puissance électrique et la tension sous Comsol Multiphysics	39
2.4.1	Étude sur L'accélération	39
2.4.2	Étude sur les épaisseurs du capteur piézoélectrique	40
2.5	Conclusion	41
3	Système de récupération d'énergie proposé	42
3.1	INTRODUCTION	43

3.2	Système de récupération d'énergie proposé	43
3.2.1	Disposition des Capteurs Piézoélectriques dans la Semelle	44
3.2.2	La Tension Mesurée par les Capteurs Piézoélectriques lors d'un Test de Marche	44
3.2.3	Le Circuit électronique pour la récupération d'énergie de la marche	45
3.2.4	Étage des capteurs piézoélectriques	46
3.2.5	Étage de redressement (pont de diode)	47
3.2.6	Étage du condensateur de Filtrage	49
3.2.7	Étage de régulation variable LM317	50
3.2.8	Batterie rechargeable	52
3.3	Test final et résultats	53
3.4	Résultats obtenues	53
3.5	Conclusion	54
 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES		55
 ANNEXES		61
A.1	Datasheet LM317	61

LISTE DES FIGURES

1.1	Quelques énergies récupérables disponibles dans l'environnement.	5
1.2	Panneaux photovoltaïques pour la récupération de l'énergie solaire [1]. . . .	6
1.3	Lampe à induction exploitant l'énergie vibratoire pour générer de l'électricité [2].	6
1.4	La géothermie à très basse énergie [3].	7
1.5	Éoliennes exploitant la force du vent pour générer de l'électricité [5].	7
1.6	L'énergie biomasse [6].	8
1.7	Image d'un barrage destiné à exploiter l'énergie hydraulique pour générer de l'électricité [7].	8
1.8	Schéma fonctionnel du système de Récupération d'énergie [13].	10
1.9	Semelle piézoélectrique connectée [14].	11
1.10	Lampe torche utilisant un générateur électromagnétique [15].	11
1.11	Schéma d'un microphone à condensateur [17].	12
1.12	Illustration de l'effet piézoélectrique direct et inverse [19].	13
1.13	Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité [20]. . . .	14
1.14	Les différentes classes cristallines et leurs propriétés [20].	15
1.15	Axes pour spécifier les constantes piézoélectriques [23].	17
1.16	Schéma montrant la déformation en mode de longitudinal [23].	17
1.17	Schéma montrant la déformation en mode transversal [23].	18
1.18	Schéma montrant la déformation en mode de cisaillement [23].	18
1.19	Schéma montrant quelques applications des différents matériaux piézoélectriques [28, 29, 30].	20
2.1	Étapes de création d'un programme sous Comsol Multiphysics.	25
2.2	La fenêtre principale de Comsol Multiphysics.	26
2.3	Capteur piézoélectrique céramique considéré dans nos modélisations [14]. .	27
2.4	Schéma bloc pour les étapes de modélisation.	28
2.5	Paramètre du volet « Geometry ».	29
2.6	Fenêtre des paramètres des deux cercles.	29
2.7	Structure 2D du capteur piézoélectrique (Piézo buzzer).	30

2.8	Paramètres du volet « Union »	30
2.9	Structure 3D du capteur piézoélectrique.	31
2.10	Bibliothèque des matériaux dans Comsol Multiphysics.	32
2.11	Matériaux composants notre capteur piézoélectrique.	32
2.12	Partie mécanique du solide de la simulation.	33
2.13	Partie électrostatique.	34
2.14	Partie de circuit électrique et multiphysiques.	34
2.15	Maillage utilisé dans notre simulation.	35
2.16	Paramètre de l'étude fréquentielle.	36
2.17	Partie résultats sous Comsol Multiphysics	37
2.18	Déformation du capteur piézoélectrique à une fréquence de 535 Hz.	37
2.19	Courbes de la puissance électrique et de la tension en fonction de la fréquence.	38
2.20	Courbe de la puissance électrique et la tension en fonction de l'accélération.	39
2.21	Courbe de la puissance électrique et la tension en fonction des épaisseurs du capteur piézoélectrique.	40
3.1	Schémas de bloc du système de récupération d'énergie.	43
3.2	Les points de pression du pied	44
3.3	la tension en fonction de poids	45
3.4	Le circuit électronique proposé pour la récupération d'énergie de la marche.	46
3.5	Test d'alimentation d'une diode DEL par un seul capteur piézoélectrique.	47
3.6	Test d'alimentation d'une diode DEL par trois capteur piézoélectrique.	47
3.7	Pont redresseur utilisant quatre diodes 1N4002.	48
3.8	Pont redresseur branché avec les capteurs piézoélectriques.	48
3.9	Le signal de l'oscilloscope obtenu du pont redresseur.	49
3.10	Capteurs piézoélectriques branchés avec le pont redresseur et le condensateur.	49
3.11	Le signal obtenu aux bornes du condensateur.	50
3.12	Circuit de régulateur LM317.	51
3.13	Branchement du régulateur avec le circuit précédent.	51
3.14	Partie stockage en utilisant une batterie Lithium-Ion	52
3.15	Système de récupération d'énergie réalisé.	53



LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison des densités de puissance pour chaque source d'énergie [8, 9, 10, 11, 12].	9
1.2	Comparaison des mécanismes de transduction pour la récupération d'énergie [18].	12
1.3	les gradeurs physiques et les notations [22].	16
1.4	Propriétés des matériaux piézoélectriques [26, 32, 33, 34, 35].	21
2.1	Dimensions disponibles sur le marché pour des piézo buzzer de 20 mm. . .	28
2.2	Variation de la puissance électrique et de la tension pour diverses Valeurs d'Accélération.	39
2.3	Variation de la puissance électrique et de la tension pour diverses Valeurs d'épaisseurs.	40
3.1	Tableau des Données de Santé des Participants	45
3.2	Résultats pratiques obtenus.	53



LISTE DES ABRÉVIATIONS

MEMS micro-electro-mechanical-system

BaTiO₃ titanate de baryum

PZT Zirconate Titanate de Plomb

PVDF Polyvinylidene fluoride

ZNO L'oxyde de Zinc

AlN Nitrure d'Aluminium)

LiNbO₃ Niobate de Lithium

Cu Cuivre

PZT-5H Type de Zirconate Titanate de Plomb

DEL Diode électroluminescente



INTRODUCTION GÉNÉRALE

LA récupération d'énergie est devenue un axe de développement majeur ces dernières années, ou les gouvernements du monde entier investissent des milliards de dollars chaque année pour obtenir leur indépendance énergétique et remplacer les énergies fossiles. Le principe de cette récupération d'énergie est relativement simple : exploiter les énergies naturelles disponibles dans notre environnement, telles que lumière, vent, vibration ambiante, courant marins... et les convertir en énergie électrique exploitable. L'avantage majeur de la récupération d'énergie ambiante est qu'elle peut s'appliquer non seulement à une échelle industrielle (panneaux photovoltaïques, éoliennes, barrages hydroélectriques...) mais aussi à petite échelle, comme les MEMS par exemple. Dans notre mémoire, nous nous intéressons à une application à petite échelle, permettant de récupérer l'énergie de la marche de l'être humain. L'objectif ici est de mettre en place un système simple et peu coûteux permettant de récupérer de l'énergie. Nous avons pour cela imaginé une semelle de chaussure intégrant des capteurs piézoélectriques. Lorsqu'une marche est entamée, une pression est exercée sur ces capteurs générant ainsi de l'électricité. Sachant que ces capteurs piézoélectriques génèrent un signal alternatif, il est nécessaire de passer par des étapes de redressement, de filtrage et de régulation avant de pouvoir stocker cette énergie sur une batterie. Ce mémoire se divise en 3 chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous commencerons par définir quelques énergies disponibles dans l'environnement à grande échelle (MW au GW) et à petite échelle (μ W au mW). Nous verrons ensuite quelles sont les techniques utilisées pour récupérer ces énergies en citant les différents mécanismes de transduction disponibles. Nous nous intéresserons ensuite à la transduction piézoélectrique que nous détaillerons ici et en citant les différents matériaux piézoélectriques disponibles.

- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le logiciel de modélisation par éléments finis (FEM), Comsol Multiphysics. Nous montrerons les différentes étapes suivies pour modéliser un capteur piézoélectrique que nous avons choisi. Nous avons ensuite mené une étude afin de voir l'impact de l'accélération et des dimensions du capteur sur la puissance et la tension générée.
- Dans le troisième chapitre, nous aborderons la création du prototype de récupération d'énergie, basé sur une chaussure intégrant une semelle piézoélectrique. Nous avons pour cela présenté un circuit dont chaque étage a été présenté et testé avant de réaliser les tests finaux. Nous avons terminé ce chapitre avec des tests pratiques en montrant les résultats pratiques obtenus et en les discutant.
- Enfin, une conclusion générale et quelques perspectives clôtureront ce modeste travail.

la récupération d'énergie

Sommaire

1.1	INTRODUCTION	4
1.2	Les sources d'énergie ambiante	4
1.3	Principe de la récupération d'énergies ambiantes	5
1.3.1	La récupération d'énergie solaire photovoltaïque	5
1.3.2	La récupération d'énergie vibratoire ambiante	6
1.3.3	La récupération d'énergie géothermique	6
1.3.4	La récupération d'énergie éolienne	7
1.3.5	La récupération d'énergie biomasse	8
1.3.6	La récupération d'énergie hydraulique	8
1.4	Récupération d'énergie à échelle réduite	10
1.5	Les Mécanismes de conversion d'énergie	10
1.5.1	Transduction piézoélectrique	10
1.5.2	Transduction Electromagnétique	11
1.5.3	Transduction électrostatique	11
1.6	La Piézoélectricité	13
1.6.1	Définition	13
1.6.2	Symétrie et piézoélectricité	14
1.6.3	Équation de la piézoélectricité	15
1.6.4	Modes de déformation dans les matériaux piézoélectriques	17
1.7	Les Matériaux piézoélectriques	18
1.7.1	Les céramiques piézoélectriques	19
1.7.2	Polymères piézoélectriques	19
1.7.3	Monocristaux semi-conducteurs	19
1.8	Applications	20
1.9	Avantages et inconvénients des matériaux piézoélectriques	21
1.10	Comparaison entre les différents matériaux piézoélectriques	21
1.11	Conclusion	22

1.1 INTRODUCTION

La récupération d'énergie ou *energy harvesting* en anglais est un domaine qui connaît un essor considérable ces dernières années, poussé par une transition énergétique de plus en plus importante. Le principe de cette dernière est simple, elle consiste à transformer un flux d'énergie non utilisée et souvent perdue, comme la chaleur, les vibrations, les rayons du soleil, les mouvements, ..., en énergie le plus souvent électrique. Cette dernière peut être utilisée pour alimenter plusieurs dispositifs allant de l'échelle industrielle à l'échelle miniature qui s'appelle microsystème (MEMS), selon la méthode de conversion utilisée. Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes sources d'énergies ambiantes pouvant être récupérées. Nous présenterons par la suite les différents mécanismes de transductions utilisés pour la récupération d'énergie avant de nous attarder sur la piézoélectricité et les principaux matériaux piézoélectriques existants utilisés dans ces applications. C'est cette technique de transduction que nous avons retenue dans ce travail, et ce choix sera justifié par une étude de l'état de l'art sur les mécanismes de transduction. Nous finirons ce chapitre par une conclusion.

1.2 Les sources d'énergie ambiante

Il existe divers types et sources d'énergies ambiantes dans notre environnement, que nous pouvons exploiter, soit à échelle industrielle (photovoltaïque, Éolienne, courants marins...), soit à une échelle miniature (MEMS). En exploitant ces sources d'énergies, nous pouvons accroître l'autonomie de certains dispositifs ou encore plus, les rendre complètement autonomes. Il existe différentes méthodes de transduction pouvant servir à transformer les sources d'énergies ambiantes en énergie électrique, la figure 1.1 qui suit montre quelques exemples.

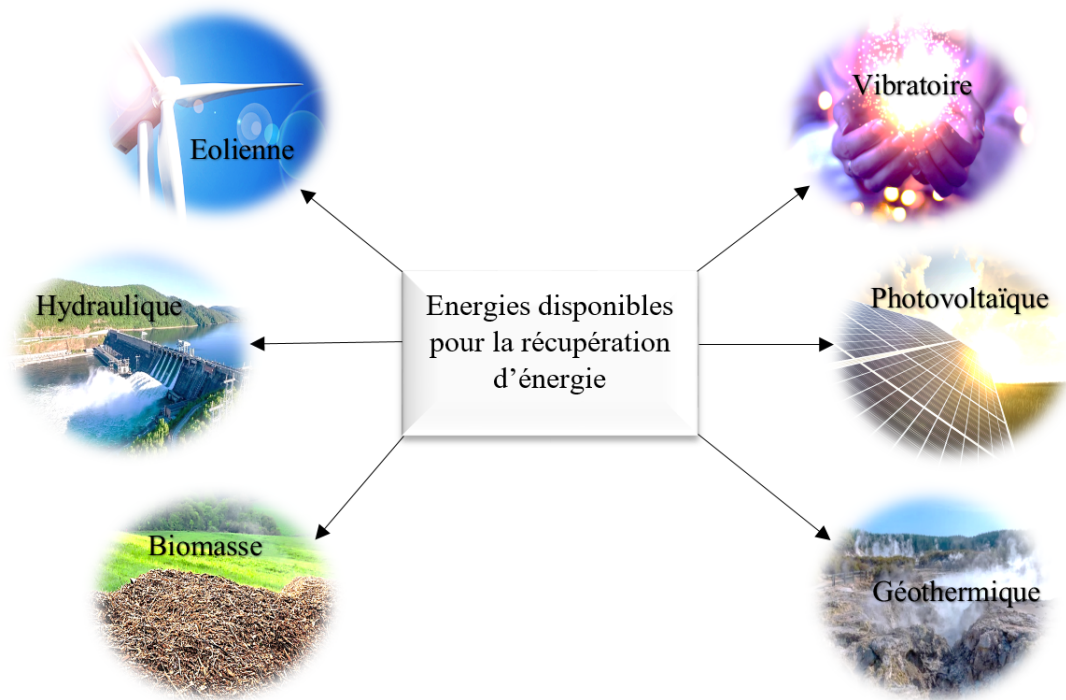


Figure 1.1 – Quelques énergies récupérables disponibles dans l'environnement.

Cette figure permet de donner un aperçu sur le potentiel et le nombre d'énergies pouvant être récupérées. À cet effet, nous allons présenter quelques méthodes de transduction destinées à récupérer certaines des sources d'énergies ambiante citées.

1.3 Principe de la récupération d'énergies ambiantes

Actuellement, la plupart des sources d'énergies ambiantes disposent d'un dispositif permettant leur récupération. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques sources d'énergies les plus exploitées avec leurs techniques de transduction dédiées.

1.3.1 La récupération d'énergie solaire photovoltaïque

La récupération d'énergie solaire photovoltaïque consiste à exploiter ces panneaux solaires pour produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil (voir figure 1.2).



Figure 1.2 – Panneaux photovoltaïques pour la récupération de l'énergie solaire [1].

1.3.2 La récupération d'énergie vibratoire ambiante

La récupération d'énergie vibratoire ambiante consiste à capturer l'énergie mécanique des vibrations environnementales pour la convertir en électricité. La figure 1.3 illustre un modèle de lampe à induction, couramment appelée lampe de Faraday [2]. Une lumière peut être émise de cette lampe simplement en l'agitant.



Figure 1.3 – Lampe à induction exploitant l'énergie vibratoire pour générer de l'électricité [2].

1.3.3 La récupération d'énergie géothermique

La récupération d'énergie géothermique consiste à exploiter la chaleur naturelle présente sous la surface de la terre pour produire de l'électricité ou fournir de la chaleur. Il existe

plusieurs types d'énergies géothermiques, parmi eux, on peut citer la géothermie à très basse énergie qui utilise la chaleur du sous-sol (figure 1.4)[3].

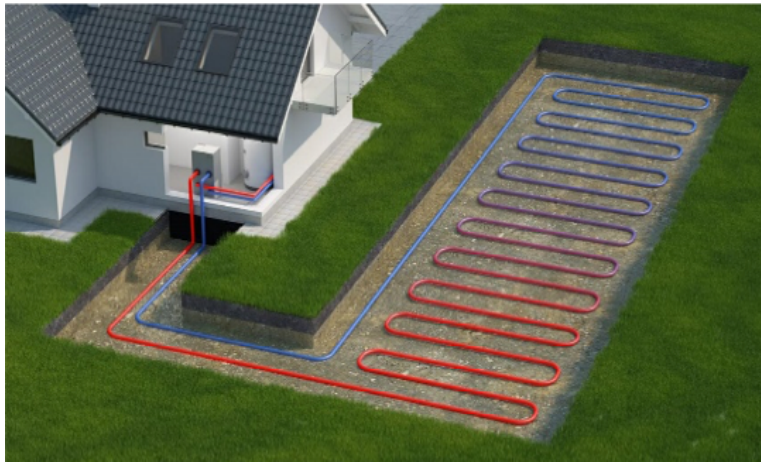


Figure 1.4 – La géothermie à très basse énergie [3].

1.3.4 La récupération d'énergie éolienne

Avec l'eau et le bois, le vent fait partie des premières ressources naturelles à avoir été utilisées par l'être humain. En maîtrisant la force du vent, ils ont pu par exemple moulin les grains avec les moulins à vent. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est produite avec la force du vent en utilisant des éoliennes comme le montre la figure 1.5 [4].



Figure 1.5 – Éoliennes exploitant la force du vent pour générer de l'électricité [5].

1.3.5 La récupération d'énergie biomasse

L'énergie biomasse est une source d'énergie renouvelable provenant de la matière organique, végétale ou animale [6]. Elle est utilisée pour produire de la chaleur, de l'électricité et des biocarburants (figure 1.6).



Figure 1.6 – L'énergie biomasse [6].

1.3.6 La récupération d'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydro-électriques, et ce, grâce à la force de l'eau (figure 1.7). Cette technique est très répandue dans de nombreuses régions du monde et permet de générer de l'électricité à très grande échelle.



Figure 1.7 – Image d'un barrage destiné à exploiter l'énergie hydraulique pour générer de l'électricité [7].

Toutes ces sources d'énergie sont exploitables et présentent des avantages et des caractéristiques bien distincts. La principale différence réside dans la plage de puissance pouvant être générée par chaque source d'énergie. Le tableau 1.1 qui suit montre une comparaison entre les différentes densités de puissance pour chaque source d'énergie.

Les énergies	La puissance
L'énergie solaire	10 - 100 MW/cm ²
L'énergie vibratoire	100 - 116 μW/cm ²
L'énergie géothermique	28 - 100 kW/m ²
L'énergie éolienne	6,22 - 99,53 kW/m ²
L'énergie biomasse	300 kW - 25 MW
L'énergie hydraulique	25 731 MW - 65.10 ¹² W

Table 1.1 – Comparaison des densités de puissance pour chaque source d'énergie [8, 9, 10, 11, 12].

Remarque : L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie biomasse et l'énergie hydraulique présentent une densité de puissance à grande échelle (allant du kW au MW), tandis que l'énergie vibratoire se manifeste à une échelle plus réduite (μW, mais peut aller jusqu'au mW dans certaines applications). L'objectif de notre travail se concentre justement sur la récupération d'énergie vibratoire à échelle réduite. Pour cela, nous devons choisir la technique de transduction adéquate pour parvenir à nos fins.

1.4 Récupération d'énergie à échelle réduite

Comme nous l'avons cité précédemment, celle-ci concerne la génération de puissance relativement faible et se base sur des dispositifs le plus souvent à taille réduite pouvant aller jusqu'au MEMS. La figure 1.8 qui suit présente le schéma fonctionnel de base du système de récupération d'énergie à petite échelle.

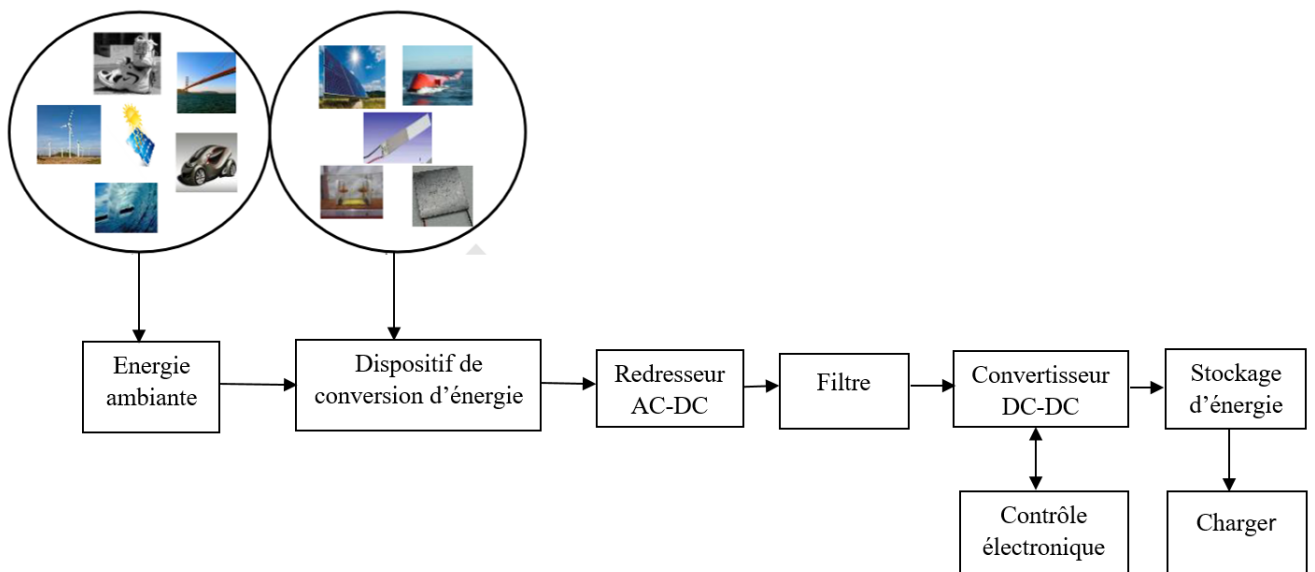


Figure 1.8 – Schéma fonctionnel du système de Récupération d'énergie [13].

1.5 Les Mécanismes de conversion d'énergie

L'énergie vibratoire ambiante est généralement récupérée par trois mécanismes de conversion qui sont les plus utilisés : piézoélectrique, électromagnétique et électrostatique.

1.5.1 Transduction piézoélectrique

Dans ce cas précis, le matériau piézoélectrique sert à convertir une contrainte ou une force mécanique en énergie électrique. La Figure 1.9 qui suit montre une application de semelle connectée avec des capteurs piézoélectriques flexibles placés au niveau des pieds pour surveiller et transmettre des données de pression à des appareils électroniques [14].

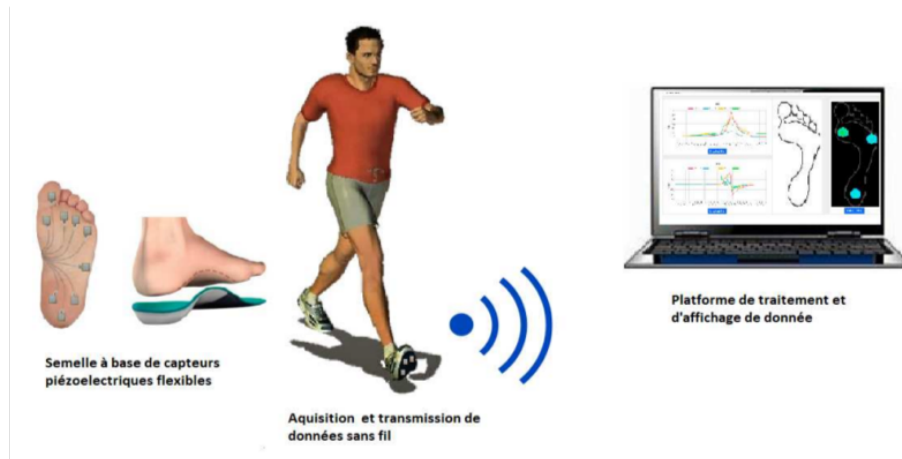


Figure 1.9 – Semelle piézoélectrique connectée [14].

1.5.2 Transduction Electromagnétique

L'énergie est produite par un aimant en mouvement induisant un courant dans une bobine. Une des applications les plus simples de ce principe est la lampe torche représentée sur la Figure 1-6. Secouer la lampe torche déplace un aimant dans une bobine, générant un courant qui recharge un condensateur pour alimenter une diode. C'est un générateur d'énergie, car il nécessite un mouvement volontaire.[15]

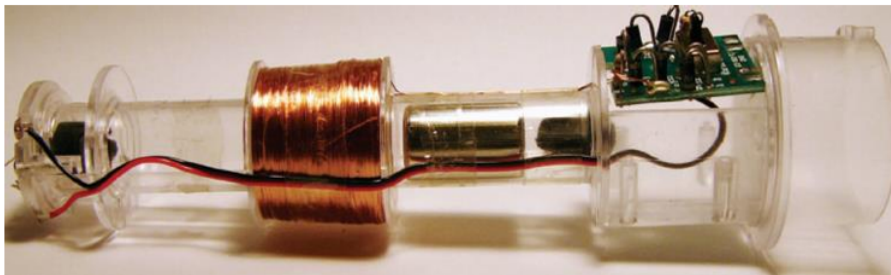


Figure 1.10 – Lampe torche utilisant un générateur électromagnétique [15].

1.5.3 Transduction électrostatique

L'énergie est produite par le mouvement relatif entre deux particules chargées ou des surfaces. Un exemple d'application est le microphone à condensateur (ou micro électrostatique)(Figure 1.11), qui possède un condensateur avec une électrode fixe et une

membrane polymère. La pression sonore déplace la membrane, modifiant la capacitance et changeant la sortie électrique [16].



Figure 1.11 – Schéma d'un microphone à condensateur [17].

Chaque mécanisme de transduction présente des avantages et des inconvénients comme le montre le tableau 1.2.

Mécanisme	Les Avantages	Les inconvénients
Piézoélectricité	structure simple, facile à mettre en œuvre à petite échelle, sortie haute tension, couplage électromécanique élevé	Faible courant, haute impédance, matériaux fragiles
Électromagnétique	construction simple et maîtrisée à plus grande échelle, basse impédance, courant élevé	Basse tension, difficile à mettre en œuvre en microfabrication
Électrostatique	haute tension de sortie, pas de matériaux exotiques, compatible avec les technologies standards	Faible courant, tension de polarisation nécessaire (non électret), haute impédance

Table 1.2 – Comparaison des mécanismes de transduction pour la récupération d'énergie [18].

Le tableau 1.2 montre que la transduction piézoélectrique est la plus adéquate dans notre étude, car elle permet d'offrir une structure simple tout en générant des tensions plus importantes comparées aux autres transductions. Aussi, l'intégration et l'absence de tension de polarisation font de la piézoélectricité un choix logique. À partir de ce constat,

nous allons dans ce qui suit donner quelques notions sur la piézoélectricité et les principaux matériaux piézoélectriques.

1.6 La Piézoélectricité

1.6.1 Définition

La piézoélectricité est un phénomène physique caractérisé par trois types de coefficients [20] :

- Des coefficients purement électriques.
- Des coefficients purement mécaniques.
- Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

Le phénomène piézoélectrique se manifeste sous formes de deux effets (Figure 1.12) :

- Effet direct : Cet effet se produit lorsque la polarisation (P) d'un matériau est proportionnelle à la contrainte (F) exercée sous contrainte mécanique.
- Effet inverse : Cela se produit lorsque le même matériau est déformé par l'application d'un champ électrique.

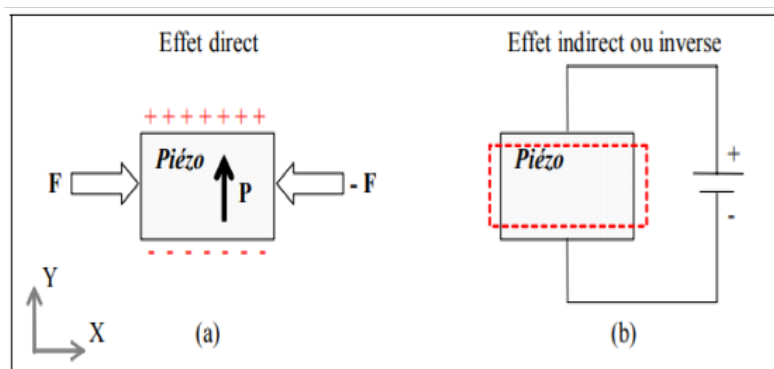


Figure 1.12 – Illustration de l'effet piézoélectrique direct et inverse [19].

1.6.2 Symétrie et piézoélectricité

Dans les solides cristallins, la piézoélectricité est directement liée à la symétrie des cristaux et se manifeste par une polarisation de la maille. Ce moment dipolaire est créé par la séparation du centre de gravité des charges positives et de celui des charges négatives suite aux déformations sous l'action de contrainte. Les propriétés de symétrie des cristaux ont une importance fondamentale pour l'existence ou non de la piézoélectricité. Tout corps présentant un centre de symétrie ne peut être piézoélectrique alors que ceux ne possédant pas de centre de symétrie peuvent l'être (figure 1.13).[20]

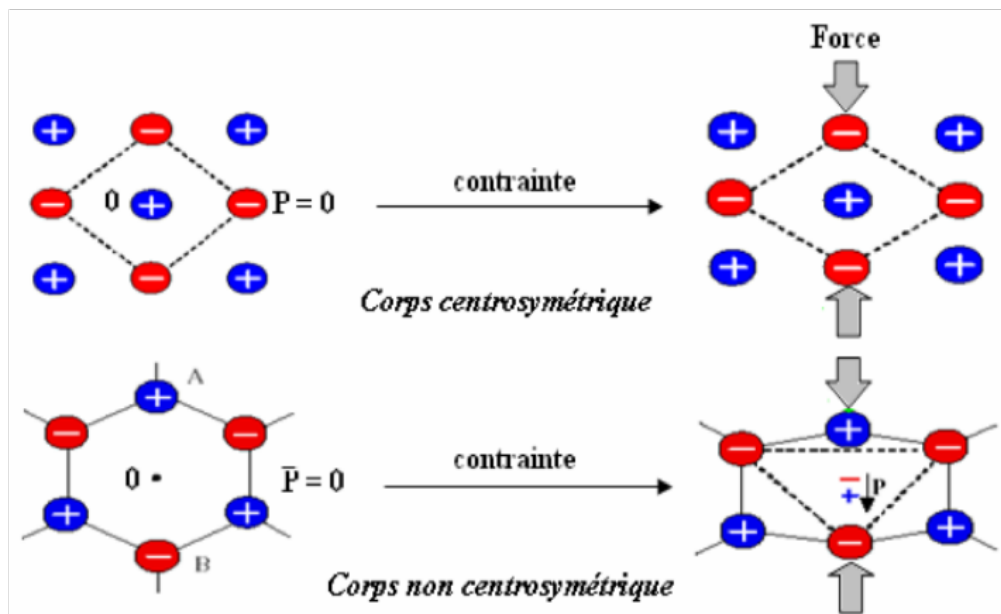


Figure 1.13 – Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité [20].

Cela est dû au fait qu'il existe 32 classes cristallines, seules 21 d'entre elles sont dépourvues de centre de symétrie. Parmi celles-ci, on remarque que 20 sont piézoélectriques dont 10 présentent une polarisation spontanée en l'absence d'un champ électrique, elles sont dites pyroélectriques et polaires en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température. L'organisation est décrite dans la figure 1.14 [20].

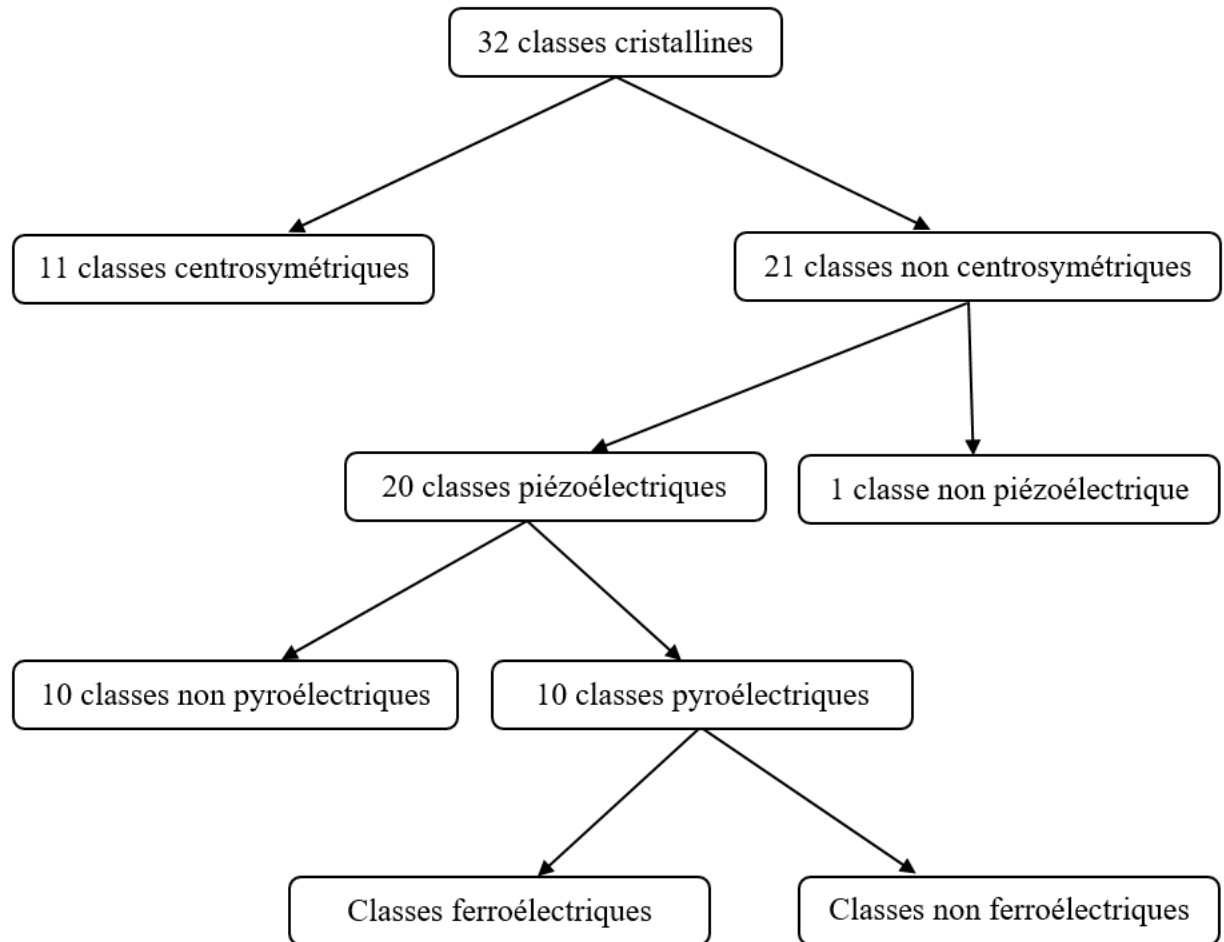


Figure 1.14 – Les différentes classes cristallines et leurs propriétés [20].

1.6.3 Équation de la piézoélectricité

Les équations de la piézoélectricité découlent de la thermodynamique énergétique impliquant à la fois des énergies mécaniques et électriques. Le système d'équations montre les couplages au sein d'un matériau piézoélectrique [21] :

$$S_{\lambda} = s_{\lambda\mu}^E T_{\mu} + d_{i\lambda} \cdot E_i$$

$$D_i = d_{i\lambda} T_{\lambda} + \xi_{ik}^T E_i$$

Les gradeurs physiques et les notations sont définies dans le tableau 1.3 qui suit :

Nature	Notations		Unité
Électrique	D	Induction électrique	C/m ²
	E	Champ électrique	V/m
	ϵ	Permittivité	F/m
Mécanique	S	Tenseur de déformation	
	T	Tenseur des contraintes	N/m ²
	s	Souplesse	m ² /N
Piézoélectrique	e	Constantes piézoélectriques du matériau	N/Vm
	d		m/V

Table 1.3 – les gradeurs physiques et les notations [22].

λ et μ sont les indices mécaniques contractés (de 1 à 6), c.-à-d. destinés à simplifier les équations piézoélectriques. i et k , sont les indices électriques correspondant aux trois axes (de 1 à 3). Le premier indice « i » représente l'axe de polarisation alors que le deuxième « k » représente l'axe de déformation.

1.6.3.1 Les indices de directions

Dans la documentation bibliographique ou sur les fiches techniques, on trouve généralement deux indices d_{ik} . En raison de la nature anisotrope des matériaux piézoélectriques, leurs propriétés (élasticité, permittivité, constante de charge, etc.) dépendent de la direction. Mathématiquement, ils sont appelés quantités tensorielles. Pour cette raison, les constantes sont écrites avec deux indices qui se réfèrent à la direction et la quantité. Pour identifier les directions dans un élément piézoélectrique, trois axes orthogonaux sont utilisés. Ces axes sont nommés 1, 2 et 3, par analogie à x , y et z de l'ensemble d'axes tridimensionnel classique. La contrainte de cisaillement autour des axes 1, 2 et 3 est représentée par les nombres 4, 5 et 6. Pour les céramiques piézoélectriques, la direction de polarisation positive est généralement suivant l'axe 3. (Sous compression, la polarité de la charge est identique à celle du champ de polarisation initial) [23]

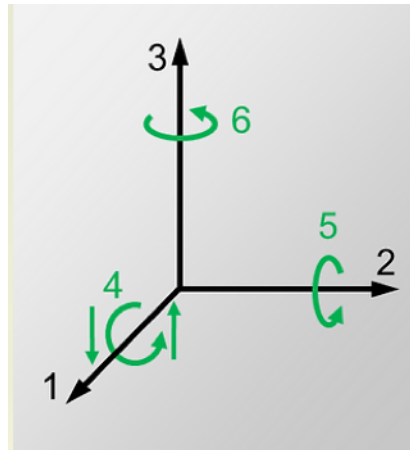


Figure 1.15 – Axes pour spécifier les constantes piézoélectriques [23].

1.6.4 Modes de déformation dans les matériaux piézoélectriques

1.6.4.1 Mode de compression (mode d33)

Le terme d33 indique la polarisation générée dans la direction 3 par unité de contrainte de compression mécanique (T) appliquée dans la direction trois au corps piézoélectrique.

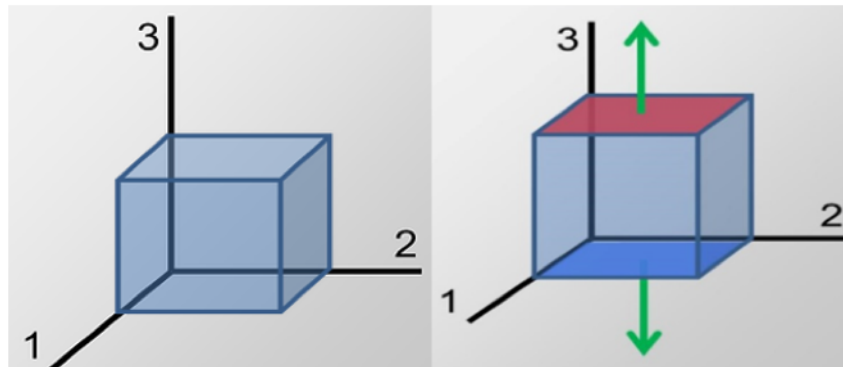


Figure 1.16 – Schéma montrant la déformation en mode de longitudinal [23].

1.6.4.2 Mode transversal (mode d31)

Le terme d31 indique la polarisation développée dans la direction 3 par unité de contrainte appliquée dans la direction 1 (toutes les autres contraintes externes sont nulles, 0).

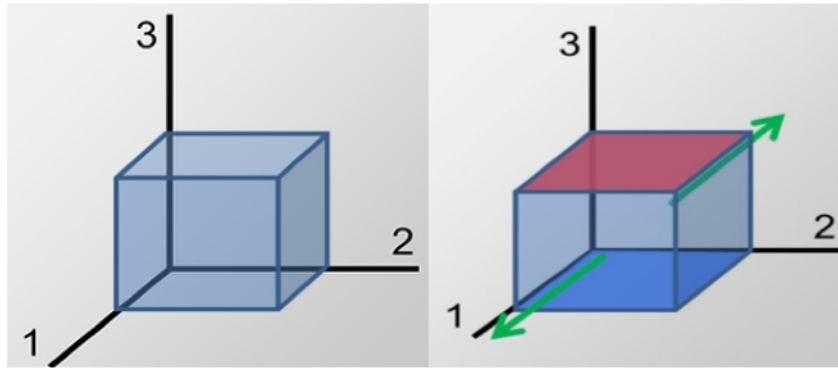


Figure 1.17 – Schéma montrant la déformation en mode transversal [23].

1.6.4.3 Mode de cisaillement (mode d15)

Le terme d15 signifie la polarisation développée dans la direction 1 par unité de contrainte de cisaillement appliquée dans la direction 5. C'est aussi le cisaillement autour de la direction 2 lorsqu'il n'y a pas d'autres contraintes externes

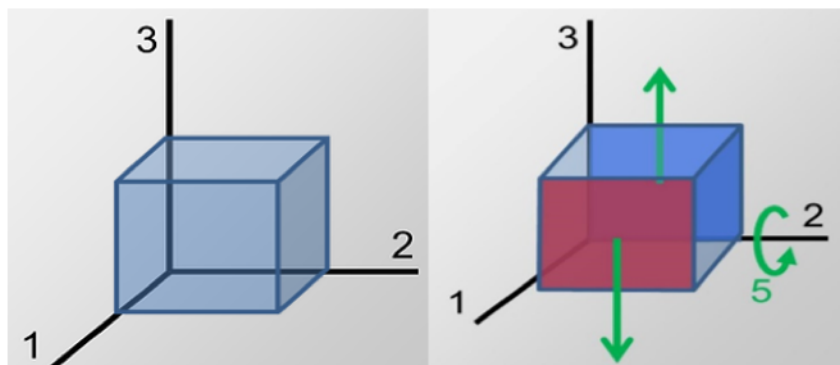


Figure 1.18 – Schéma montrant la déformation en mode de cisaillement [23].

Après examen de l'équation fondamentale de la piézoélectricité ainsi que les axes pour spécifier les constantes piézoélectriques et les différents modes, on passe maintenant en revue les différents matériaux piézoélectriques.

1.7 Les Matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont couramment utilisés dans de nombreux dispositifs, tels que les transducteurs, les capteurs et les actionneurs [24]. Il existe plusieurs matériaux

piézoélectriques qui se différencient les uns des autres, principalement par les coefficients piézoélectriques, les constantes diélectriques et les facteurs de couplages. Parmi tous ces matériaux, on distingue trois principales familles :

- Les céramiques.
- Les polymères.
- Les monocristaux semi-conducteurs.

1.7.1 Les céramiques piézoélectriques

Les céramiques piézoélectriques appartiennent à la famille des matériaux ferroélectrique et sont les matériaux piézoélectriques les plus courants en raison de leur coefficient piézoélectrique élevé et de leur simple fabrication. Les céramiques piézoélectriques les plus couramment utilisées dans l'industrie sont : le titanate de baryum (BaTiO_3) et le titanate de Zirconate de plomb (PZT) [25].

1.7.2 Polymères piézoélectriques

Les polymères piézoélectriques, tels que le PVDF partiellement cristallin, sont flexibles, légers et possèdent la capacité unique de répondre aux champs électriques. Ils sont considérés comme des matériaux résistants à la déformation et peuvent capturer efficacement les signaux acoustiques sous-marins. De plus, le PVDF peut orienter ses chaînes polymères sous un champ électrique, améliorant ainsi sa fonctionnalité [26].

1.7.3 Monocristaux semi-conducteurs

Ce sont des matériaux piézoélectriques faisant partie de la famille des Wurtzites. Ainsi, dans sa phase Wurtzite, le matériau possède une polarisation spontanée, ce qui le classe dans la catégorie des matériaux pyroélectrique. Les matériaux les plus connus de cette famille sont le ZnO (oxyde de zinc) et l' AlN (nitrure d'aluminium). Ils sont non seulement utilisés comme des semi-conducteurs dans diverses applications technologiques, mais ils

présentent aussi des propriétés piézoélectriques en raison de leur cristallisation dans cette phase qui manque de symétrie d'inversion [27].

1.8 Applications

Il existe de nombreuses applications des matériaux piézoélectriques dans différents domaines. La figure 1.19 qui suit illustre justement quelques exemples. En fonction de la famille de matériaux piézoélectrique utilisée.

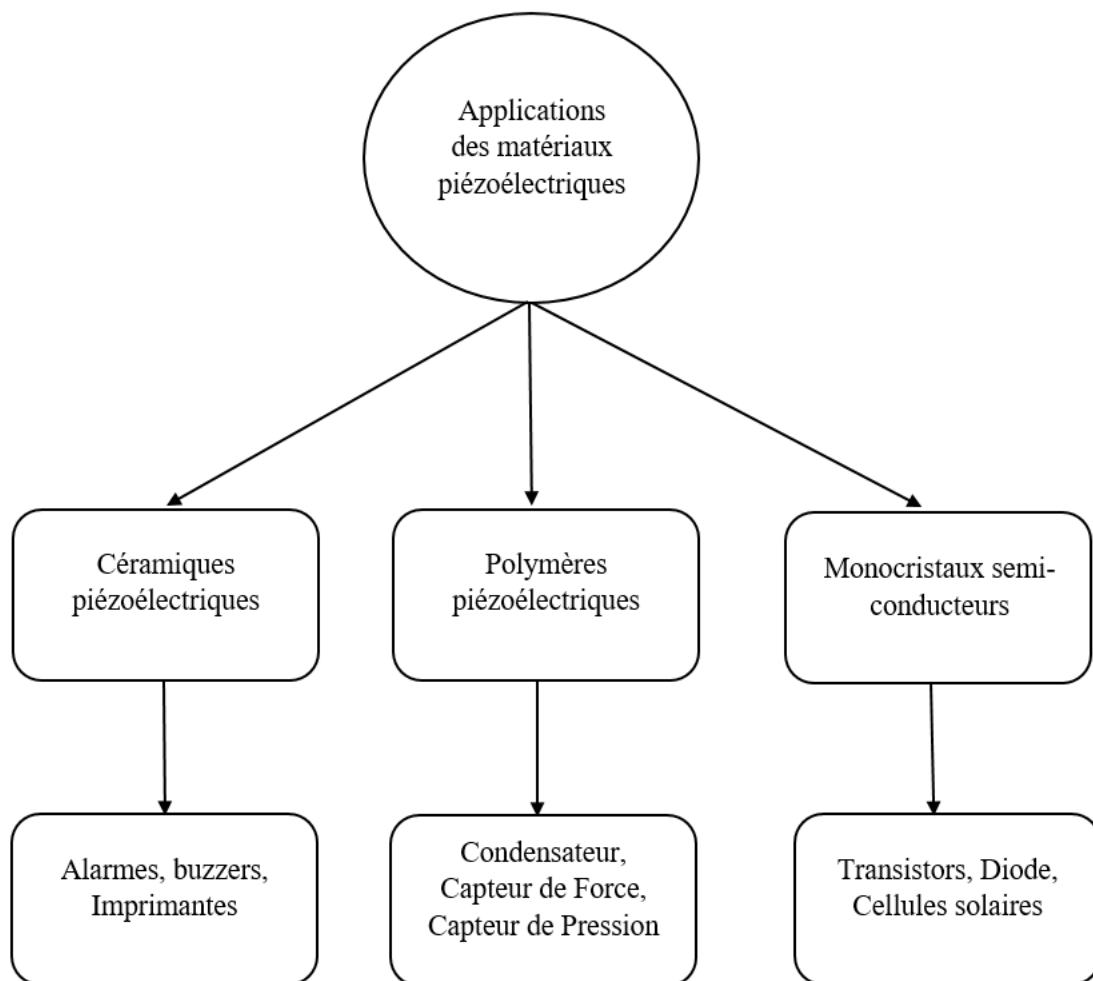


Figure 1.19 – Schéma montrant quelques applications des différents matériaux piézoélectriques [28, 29, 30].

1.9 Avantages et inconvénients des matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques offrent plusieurs avantages qui en font des choix attrayants pour de nombreuses applications [31] :

- Densité énergétique importante.
- Grande bande passante.
- Hautes fréquences.
- Faible puissance de mise en action.

Malgré ces avantages, les matériaux piézoélectriques présentent également des inconvénients :

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

1.10 Comparaison entre les différents matériaux piézoélectriques

Le tableau 1.4 qui suit permet d'illustrer les principales différences en termes de propriétés piézoélectriques et mécaniques des matériaux piézoélectriques.

	Quartz	LiNbO3	BaTiO3	PVDF	PZT	ZnO	AlN
Densité (g/cm ²)	2.65	4.64	5.7	1.76	7.5	5.06	3.05
Constante diélectrique ϵ_{11}	4.5	40	1700	12	200-400	8.7	/
Constante de charge d_{31}	/	-7.4	-78	-23	-120	-5	-2
Constante de charge d_{33}	2	6	180	20	40-750	5.9	3.9
Constante de tension g_{33}	50	20	17	190	15-40	/	/
Température de Curie (°C)	573	12010	130	180	<350	1975	2200

Table 1.4 – Propriétés des matériaux piézoélectriques [26, 32, 33, 34, 35].

Les paramètres piézoélectriques que l'on trouve le plus dans la littérature, sur lesquels énormément de travaux ont été menés et qui permettent de caractériser les performances des matériaux piézoélectriques sont les coefficients piézoélectriques d_{33} et d_{31} . Nous

pouvons remarquer ici que ces coefficients piézoélectriques sont les plus élevés pour le PZT par rapport aux autres matériaux. C'est justement pour cette raison que le PZT est très utilisé. C'est sur cette base que nous avons orienté notre choix vers un composant utilisant un matériau PZT pour notre application.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques sources d'énergies ambiantes dans notre environnement et des généralités sur la récupération d'énergie à grande ou à petite échelle. Nous avons cité par la suite quelques modes de transduction permettant la récupération d'énergies pour chaque type d'énergie ambiante. Après cela, nous nous sommes intéressés à la récupération d'énergie à petite échelle, car c'est ce qui nous intéresse dans notre application ici. À partir de là, nous avons cité les quelques techniques de transduction pouvant nous servir avant de faire un choix sur la transduction piézoélectrique. Nous avons conclu ce chapitre par le choix d'un composant piézoélectrique à base de PZT, car c'est le matériau avec les coefficients piézoélectriques les plus élevés. Dans le chapitre qui suit, nous allons entamer quelques simulations sous le logiciel Comsol Multiphysics afin d'avoir une idée sur les tensions et puissances que nous pouvons générer d'un tel matériau.

Simulation sous Comsol Multiphysics d'un capteur piézoélectrique

Sommaire

2.1	Introduction	24
2.2	Présentation du Logiciel Comsol Multiphysics	24
2.2.1	Création d'un programme sous Comsol Multiphysics	24
2.2.2	Fenêtre principale de Comsol Multiphysics	25
2.3	Composant choisi pour la modélisation sous Comsol Multiphysics	27
2.3.1	Paramètre du Modèle	27
2.3.2	Modélisation d'un capteur piézoélectrique sous logiciel Comsol Multiphysics	28
2.3.3	Dessin du capteur piézoélectrique	28
2.3.4	Matériaux du capteur piézoélectrique	31
2.3.5	Étude de la physique	33
2.3.6	Le Maillage	35
2.3.7	Partie étude	35
2.3.8	Résultats	36
2.4	Analyse comparative sur la puissance électrique et la tension sous Comsol Multiphysics	39
2.4.1	Étude sur L'accélération	39
2.4.2	Étude sur les épaisseurs du capteur piézoélectrique	40
2.5	Conclusion	41

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons un logiciel très intéressant appelé Comsol Multiphysics. Nous suivrons une méthodologie structurée pour modéliser notre modèle piézoélectrique, en suivant les différentes étapes. Nous observerons le taux de déformation de ce matériau et analyserons son comportement dans le domaine des fréquences. Notre objectif est de générer un maximum de puissance électrique à partir des contraintes exercées sur ce matériau. Nous avons effectué une étude, analysé les résultats et procédé à une comparaison pour voir comment en augmente cette puissance électrique, À la fin, nous mentionnerons les avantages et les inconvénients de ce logiciel.

2.2 Présentation du Logiciel Comsol Multiphysics

Le logiciel Comsol Multiphysics est un programme d'analyse structurelle, développé par la société Suédoise Comsol®, qui permet de résoudre des problèmes de physique et d'ingénierie par éléments finis : mécanique des structures, électromagnétisme hautes et basses fréquences, écoulement, transfert de chaleur, réactions chimiques, optique, acoustique, et plus encore. Il permet aussi le couplage entre ces différents phénomènes physiques, d'où l'appellation Multiphysics. Il présente aussi l'avantage de fournir une interconnexion à plusieurs outils très connus, comme MATLAB®, SolidWorks®, Autodesk AutoCad® et Inventor®, Catia®, etc. permettant une variété de fonctions de programmation, de pré et post-traitement. Ce logiciel présente aussi l'avantage d'être multiplateformes (Windows, Mac, Linux).

2.2.1 Création d'un programme sous Comsol Multiphysics

Pour créer un programme sur logiciel Comsol Multiphysics, nous allons suivre les étapes suivantes (Figure 2.1) :

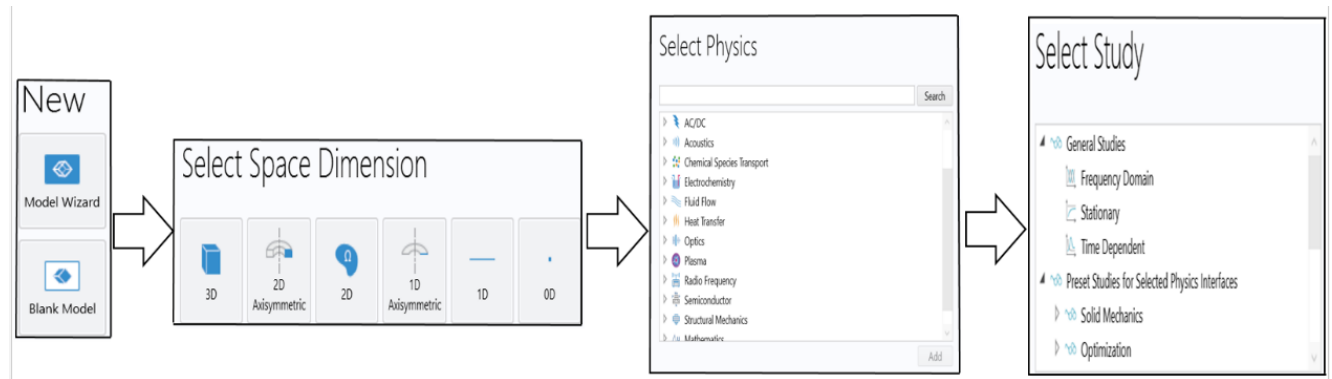


Figure 2.1 – Étapes de création d'un programme sous Comsol Multiphysics.

1. En appuyant sur le bouton « Model Wizard », nous utiliserons l'assistant de création de programmes de Comsol Multiphysics. En appuyant par contre sur le bouton « Blank Model », nous créerons un modèle vierge, dans ce cas toutes les étapes sont faites manuellement.
2. Définir la dimension dans laquelle nous souhaitons créer notre modèle : 0D, 1D, 2D, 3D, 2D ou 2D axisymétrique.
3. Choisir la physique à utiliser dans le modèle et par la physique, on entend le phénomène physique intervenant dans notre composant, par exemple piézoélectrique, mécanique des structures, etc.
4. La dernière étape consiste à choisir le domaine d'étude pour la simulation du modèle système comme : fréquentielle, temporelle, stationnaire, fréquence propre, etc.

2.2.2 Fenêtre principale de Comsol Multiphysics

La fenêtre principale de logiciel comporte 5 volets comme le montre la figure 2.2 ci-dessous.

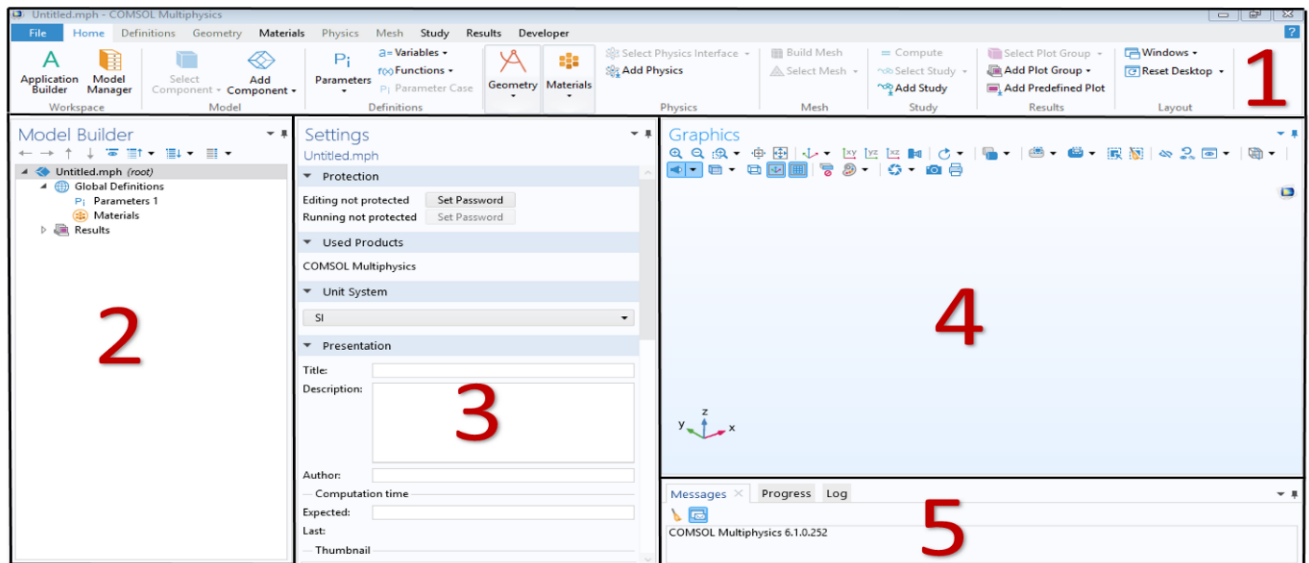


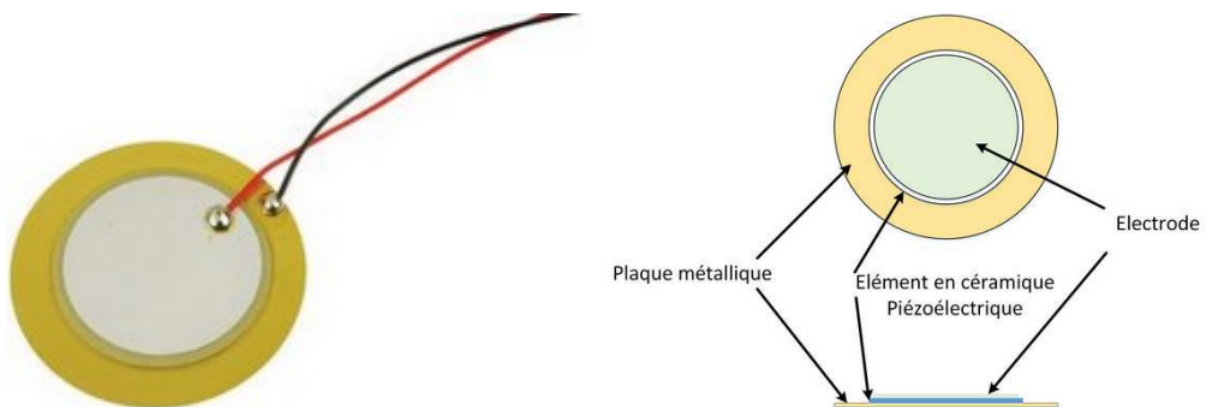
Figure 2.2 – La fenêtre principale de Comsol Multiphysics.

1. La barre d'outils « TOOLBAR » : qui contient tous les outils en lien avec la simulation, à savoir, la géométrie, la physique, le maillage, les matériaux, l'étude, etc.
2. Le volet « Model Builder » : contient les différents composants et les fonctions liés à la simulation (la géométrie, l'étude, les résultats, les matériaux et la physique).
3. Le volet « settings » : permet d'afficher les paramètres de chaque composant du « Model Builder ».
4. Le volet « Graphics » : pour la visualisation du modèle et afficher les résultats de simulation.
5. Le volet « Log/Messages/Progress » : est divisée en 3 principales parties :
 - Messages : qui contient les informations utiles après les opérations.
 - Progress : qui affiche la progression de l'évaluation du modèle.
 - Log : qui contient les informations des exécutions des précédentes études.

Maintenant, nous allons présenter notre modèle et le modéliser sous logiciel Comsol Multiphysics en suivant ces différentes étapes.

2.3 Composant choisi pour la modélisation sous Comsol Multiphysics

L'objectif de cette modélisation est de mettre en évidence le comportement du composant piézoélectrique lorsqu'il est soumis à certaines contraintes. Dans notre cas, nous nous sommes tournés vers un capteur piézoélectrique (piézo buzzer) à base de céramique PZT (Zirconate Titanate de Plomb). Ce choix est justifié par la disponibilité et le faible coût de tels composants. Il existe de très nombreuses compositions différentes de céramiques qui font que les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement (formes, tailles et différentes orientations de la polarisation) de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière. [14]



2.3.1 Paramètre du Modèle

Les capteurs piézoélectriques que nous avons acquis ont un diamètre de 20 mm. Néanmoins, les épaisseurs des différentes couches ne sont pas fournies avec le composant. Nous avons donc recherché auprès des différents vendeurs de composants électroniques les épaisseurs disponibles pour ces diamètres. Les dimensions trouvées sont présentées dans le tableau 2.1 qui suit :

/	Diamètre	Épaisseur 1	Épaisseur 2	Épaisseur 3
Cercle 1 (Laiton)	20 mm	0.20 mm	0.10 mm	0.02 mm
Cercle 2 (PZT)	14 mm	0.22 mm	0.12 mm	0.03 mm

Table 2.1 – Dimensions disponibles sur le marché pour des piézo buzzer de 20 mm.

Nous choisissons pour la simulation la première épaisseur. Nous proposons une accélération de $0,3 \text{ m/s}^2$.

2.3.2 Modélisation d'un capteur piézoélectrique sous logiciel Comsol Multiphysics

Pour modéliser le capteur piézoélectrique dans le logiciel Comsol Multiphysics, nous avons suivi les étapes de modélisations citées précédemment, à savoir :

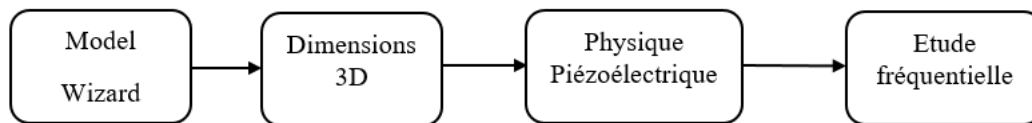


Figure 2.4 – Schéma bloc pour les étapes de modélisation.

La fenêtre principale de Comsol Multiphysics s'affiche ensuite et il restera à configurer les différents paramètres de la simulation.

2.3.3 Dessin du capteur piézoélectrique

Pour notre modèle, nous avons deux cercles avec des valeurs différentes. Pour les concevoir, nous suivons les étapes suivantes :

1. Dans le « Model Builder », nous faisons un clic droit sur « Geometry », puis nous choisissons « Work Plane », ensuite, nous cliquons sur « Plane Geometry » et nous choisissons « Circle » (Figure 2.5), Nous répétons les mêmes étapes pour le deuxième cercle. Cette méthode permet de simplifier le dessin sous Comsol Multiphysics en

créant un dessin en 2D et en le transformant comme nous le verrons par la suite en 3D grâce à une simple fonction.

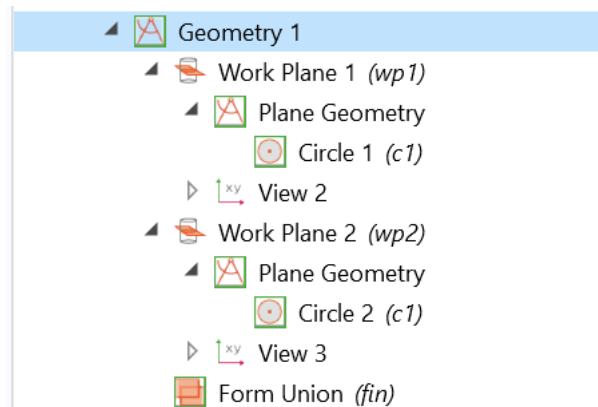


Figure 2.5 – Paramètre du volet « Geometry ».

2. Dans la fenêtre des paramètres « Settings », nous entrons le diamètre et l'épaisseur de deux cercles (Figure 2.6).

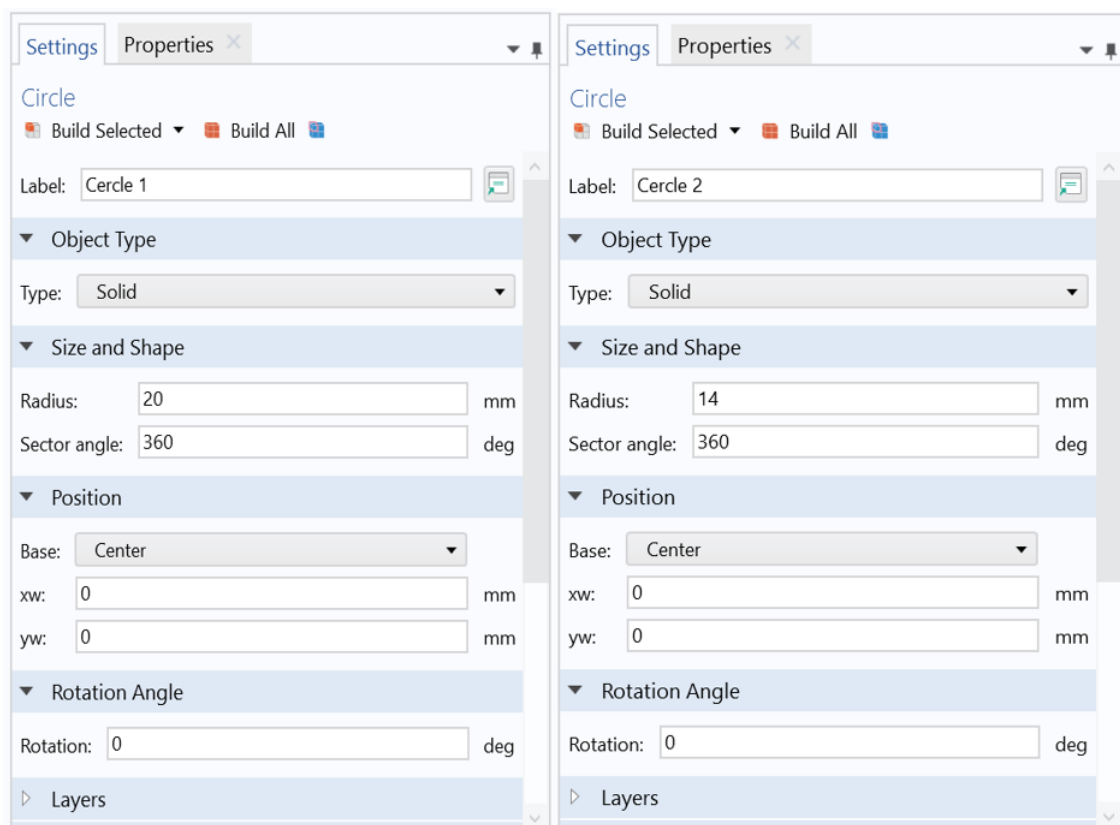


Figure 2.6 – Fenêtre des paramètres des deux cercles.

3. Pour générer le dessin dans la fenêtre « Graphics », Il nous suffit de cliquer sur le bouton « Build All » comme le montre la (figure 2.7).

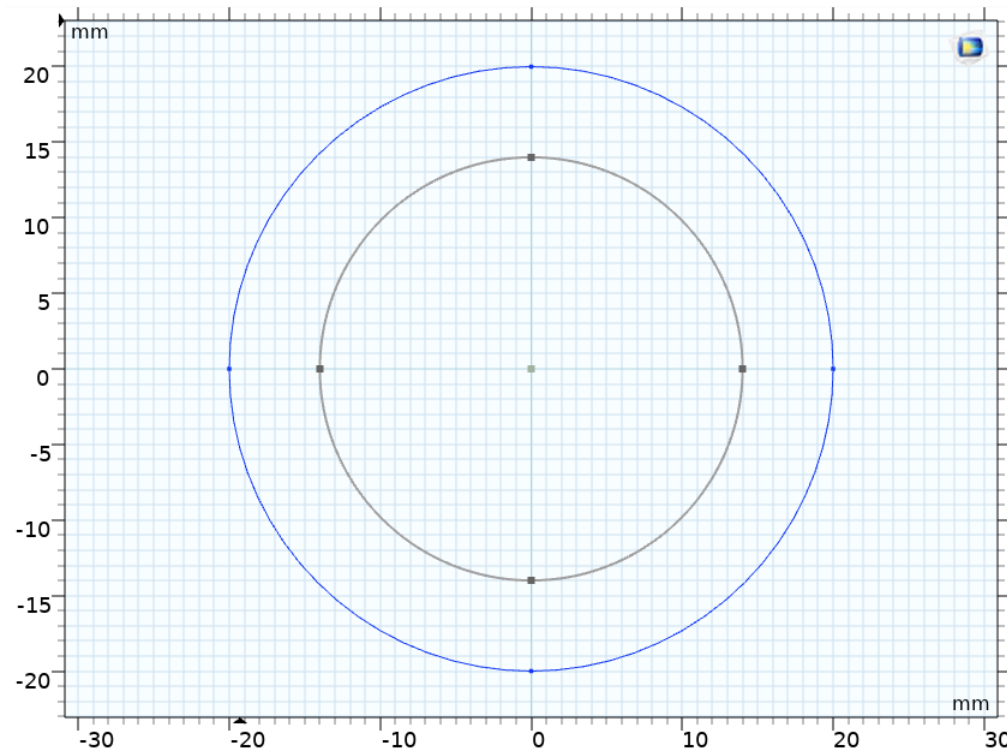


Figure 2.7 – Structure 2D du capteur piézoélectrique (Piézo buzzer).

4. Jusqu'à présent, ces deux cercles forment deux entités différentes dans notre modélisation. Pour que le capteur piézoélectrique soit assimilé à une seule entité, il faut utiliser la fonction « form Union/Assembly » (Figure 2.8). Cette fonction est présente par défauts dans « Geometry ».

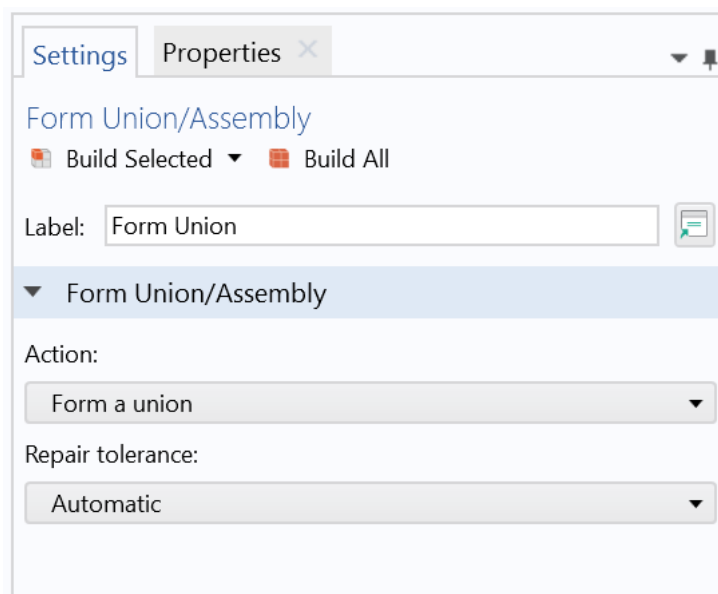


Figure 2.8 – Paramètres du volet « Union ».

5. Pour obtenir une structure en 3D, nous utiliserons la fonction « Extrude ». Cette fonction permet de faire passer un dessin 2D en 3D en lui donnant une épaisseur. Pour réaliser cette opération, nous faisons un clic droit sur la géométrie, puis nous sélectionnons « Extrude » (Figure 2.9). Notons par ailleurs que cette opération doit être faite pour les deux cercles, car chaque cercle est créé sur un plan de travail différent.

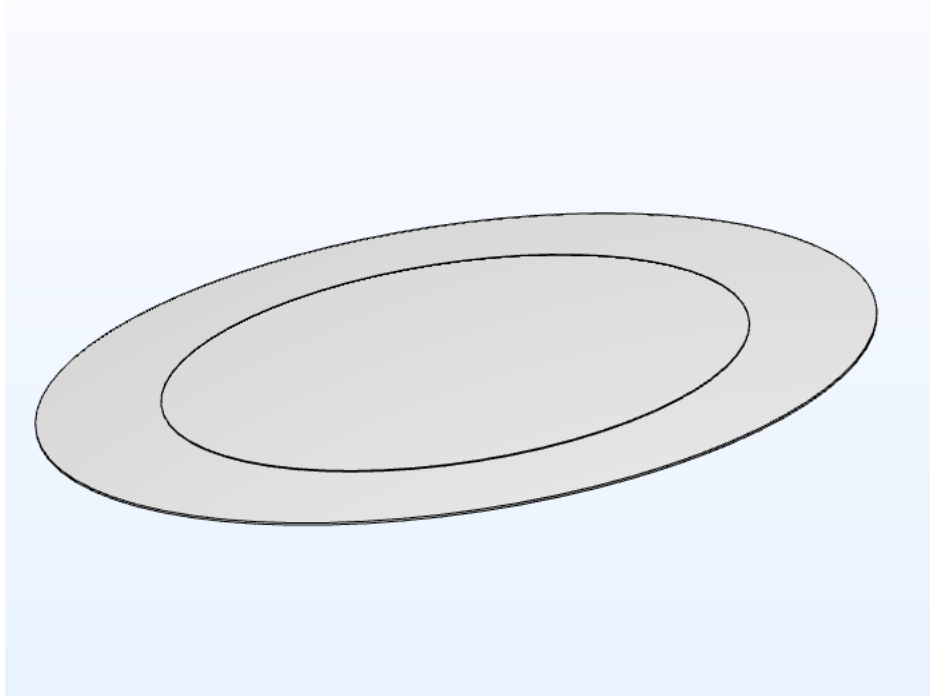


Figure 2.9 – Structure 3D du capteur piézoélectrique.

2.3.4 Matériaux du capteur piézoélectrique

Comsol Multiphysics dispose d'une bibliothèque riche de matériaux par défaut qui est installée avec le logiciel. Il permet néanmoins la création d'un nouveau matériau lorsque celui-ci n'est pas disponible dans cette bibliothèque. Pour Choisir la nature des matériaux qui composent notre modèle, nous allons suivre les étapes suivantes :

1. Dans la fenêtre de « Model Builder », nous cliquons avec le bouton droit sur « Material » et sélectionnons « Add Material From Library ». Une petite fenêtre s'affiche, permettant aux utilisateurs d'accéder à une bibliothèque prédéfinie de matériaux dans Comsol Multiphysics (Figure 2.10).

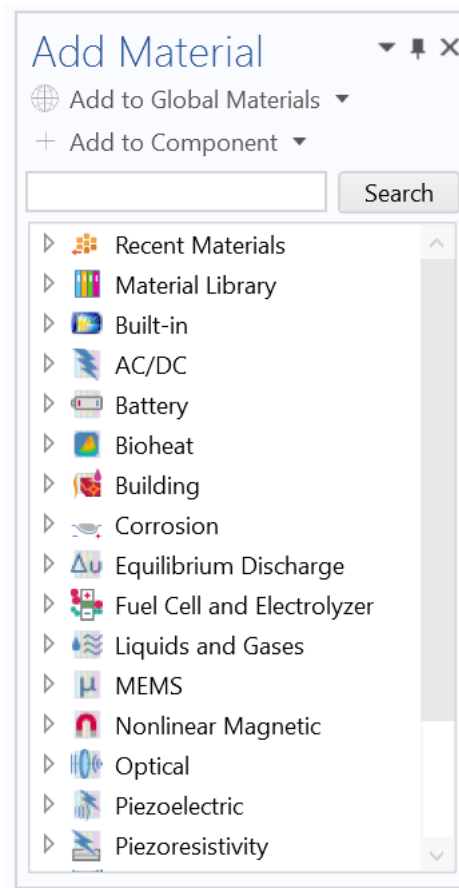


Figure 2.10 – Bibliothèque des matériaux dans Comsol Multiphysics.

2. Il faudra ensuite chercher le matériau adéquat et l'affecter à la bonne partie du capteur piézoélectrique, dans notre cas, le cuivre « CU » pour le premier cercle et PZT-5H pour le deuxième cercle comme le montre la (figure 2.11).

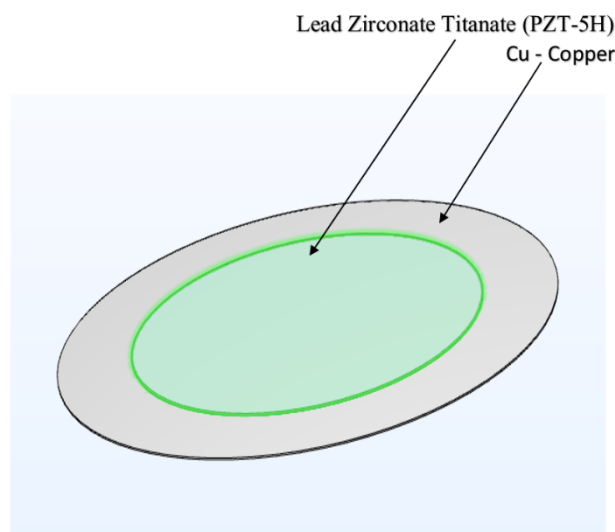


Figure 2.11 – Matériaux composants notre capteur piézoélectrique.

2.3.5 Étude de la physique

Cette partie permet de définir les paramètres des différents phénomènes physiques intervenant dans notre modélisation, à savoir dans notre cas, la mécanique du solide, circuit électrique, la piézoélectricité et le couplage entre eux. Cette partie avec la partie matériaux est plus connue sous la partie conditions aux limites.

2.3.5.1 Mécanique du solide

Dans cette partie, nous avons (figure 2.12) :

1. Défini quelles sont les parties du capteur piézoélectrique concernées par cette partie mécanique, à savoir les deux cercles.
2. Nous avons défini un matériau élastique linéaire « Linear Elastic Material » qui est le grand cercle en cuivre.
3. Nous avons aussi défini la partie piézoélectrique comme étant appliquée uniquement au petit cercle PZT-5H.
4. Nous avons ensuite défini l'encastrement du capteur piézoélectrique « Fixed Constraint ». Dans notre cas, le capteur est fixé sur ses bordures extérieures. Haut du formulaire
5. Enfin, dans cette partie, il faut aussi définir le type de forces ou contraintes à appliquer au capteur piézoélectrique pour qu'il génère de l'électricité.

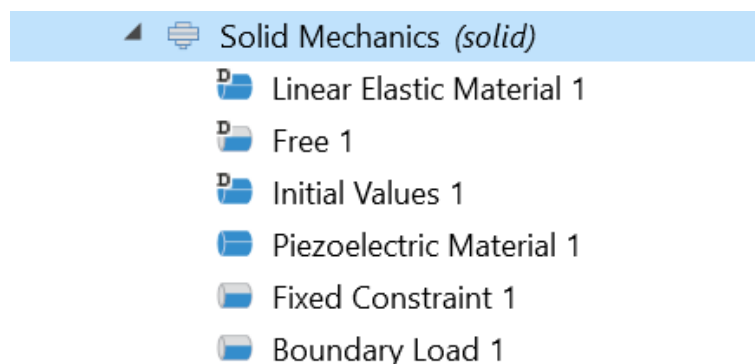


Figure 2.12 – Partie mécanique du solide de la simulation.

2.3.5.2 Électrostatique

Ici, il est question de paramétrer le comportement électrique du capteur piézoélectrique. Cette partie concerne uniquement le petit cercle composé du matériau PZT-5H. Tous les paramètres sont laissés par défaut, il nous faudra juste rajouter (figure 2.13) :

1. « Terminal » : Ce paramètre représente l'électrode positive du PZT-5H.
2. « Ground » : Ce paramètre représente l'électrode négative du PZT-5H.

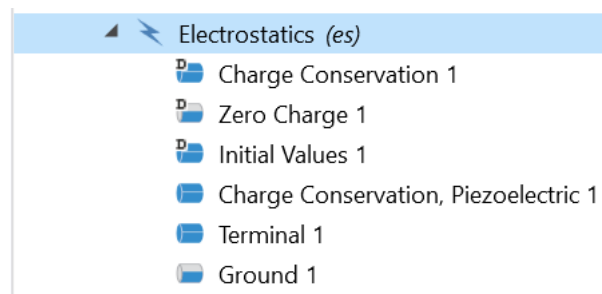


Figure 2.13 – Partie électrostatique.

2.3.5.3 Le circuit électrique et le couplage multiphysiques

La partie « Electrical Circuit » permet de modéliser le circuit de récupération d'énergie et d'analyser les signaux électriques générés par le capteur. Quant à la partie Multiphysics, elle assure le couplage entre les phénomènes électriques, mécaniques et piézoélectriques. Cette fonctionnalité est souvent activée par défaut pour garantir une simulation complète et précise du capteur (figure 2.14).

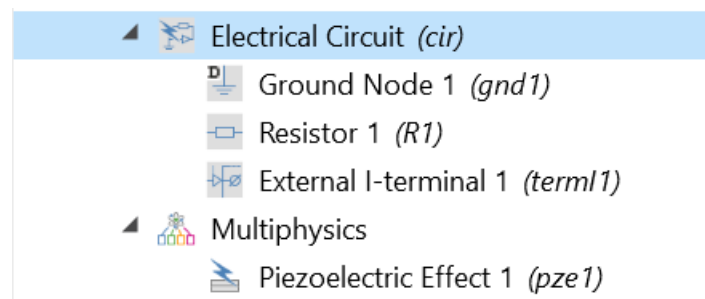


Figure 2.14 – Partie de circuit électrique et multiphysiques.

2.3.6 Le Maillage

Le maillage est un paramètre très important dans n'importe quelle simulation par éléments finis. Il permet de définir la précision des résultats de simulation et le temps de calcul. Le plus souvent, on cherche à optimiser le maillage et à trouver le bon compromis entre ces deux points. Dans notre cas, nous avons choisi un maillage « Free Triangle » comme le montre la figure 2.15.

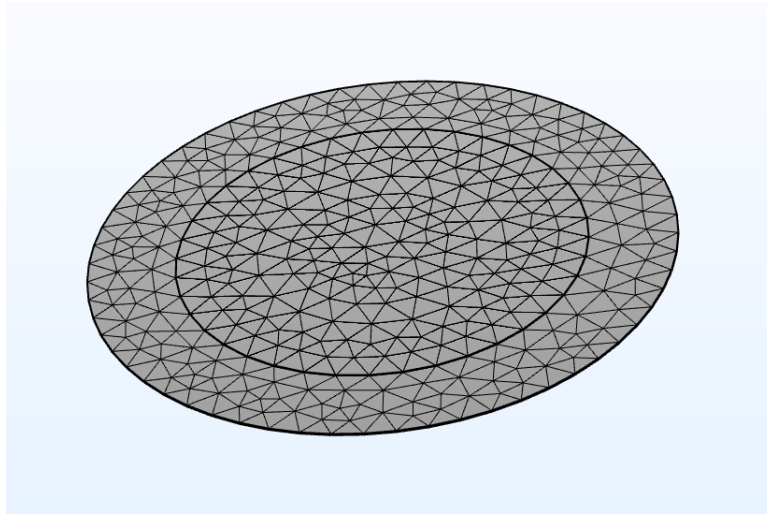


Figure 2.15 – Maillage utilisé dans notre simulation.

2.3.7 Partie étude

Cette partie permet de définir le domaine d'étude de la simulation. Dans notre cas, nous avons choisi une étude fréquentielle « Frequency Domain » pour analyser le comportement en fréquence du capteur piézoélectrique. Pour réaliser cela, nous avons établi une plage de fréquences allant de 400 à 700 Hz avec un pas de 15 Hz et regardons à quelle fréquence la puissance et la tension générées sont les plus élevées(Figure 2.16).

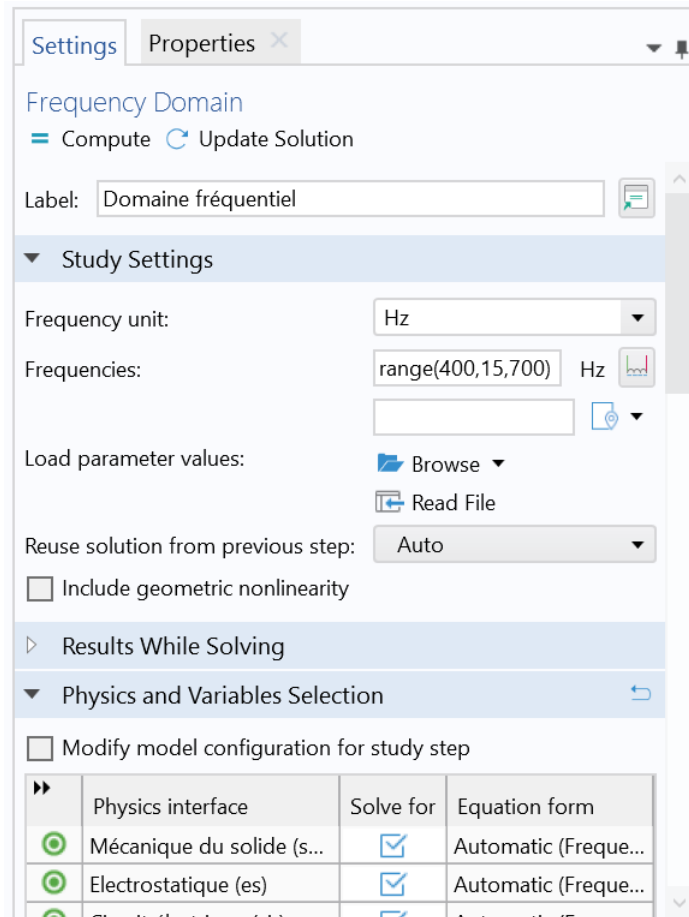


Figure 2.16 – Paramètre de l'étude fréquentielle.

2.3.8 Résultats

Cette partie permet de faire un post-traitement des résultats de simulation et d'afficher d'autres paramètres qui ne sont pas disponibles par défaut après simulation. Ainsi, par exemple, dans notre cas, les trois paramètres qui sont disponibles par défaut après simulation concernent la contrainte, le potentiel électrique et norme du champ électrique comme le montre la (figure 2.17).

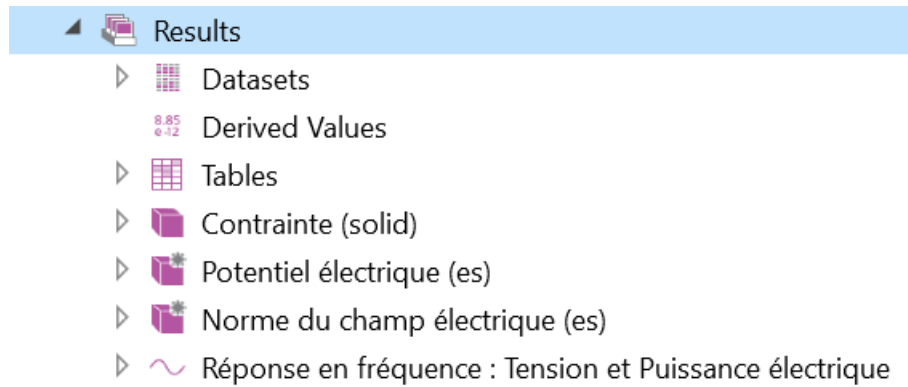


Figure 2.17 – Partie résultats sous Comsol Multiphysics

Bien sûr, même si ces paramètres sont affichés par défaut dans Comsol Multiphysics après simulation, il y a toujours possibilité de les modifier. Par ailleurs, pour afficher la déformation totale du capteur piézoélectrique, il suffit d'aller dans la section « contraintes (solid) » et paramétrer cette dernière de telle sorte qu'elle affiche une déformation et non pas la contrainte mécanique.

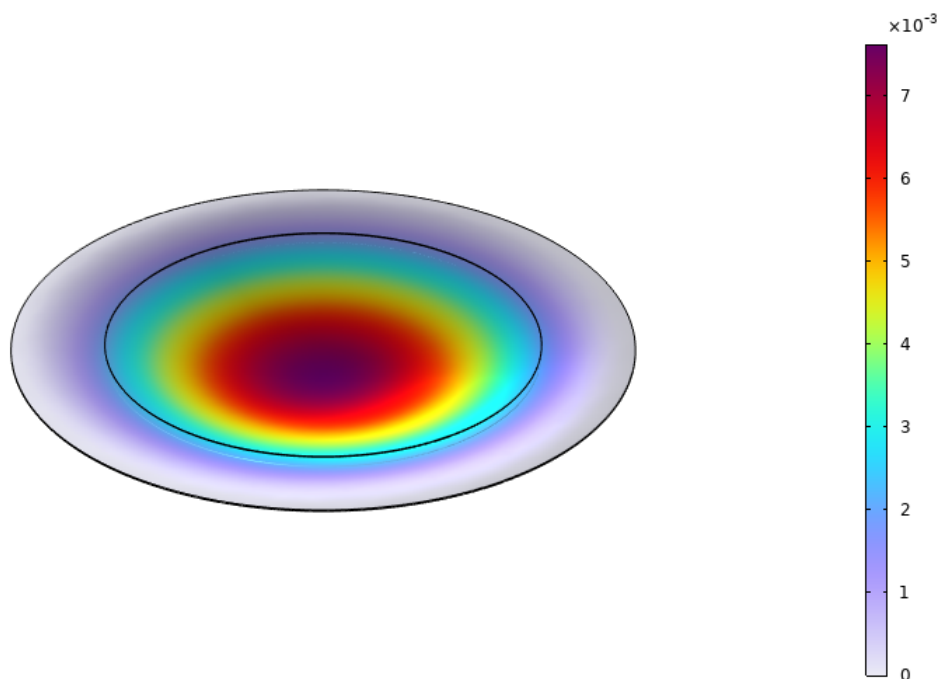


Figure 2.18 – Déformation du capteur piézoélectrique à une fréquence de 535 Hz.

La Figure 2.18 montre une déformation totale de 7.5×10^{-3} mm du capteur piézoélectrique à une fréquence de résonance de 535 Hz Sous une accélération de $0,3 \text{ m/s}^2$. Bien que légère,

cette déformation est jugée acceptable, tenant compte des dimensions du capteur et des conditions de simulation. Après avoir observé la déformation du capteur piézoélectrique, nous allons créer un graphique montrant la quantité de puissance électrique et la tension générées par le capteur piézoélectrique. Pour cela, nous faisons un clic droit sur « Results », nous sélectionnant ensuite « 1D Plot Group ». Nous introduisons ensuite les paramètres à afficher qui sont les deux courbes : la puissance électrique et la tension (Figure 2.19).

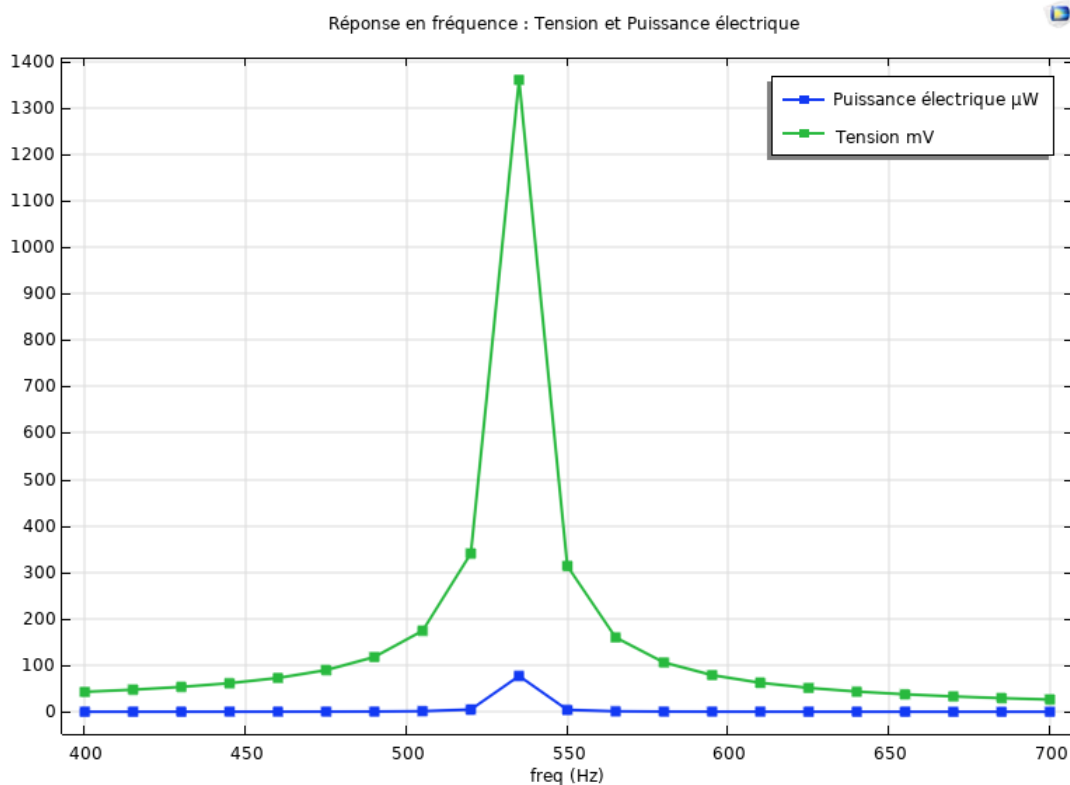


Figure 2.19 – Courbes de la puissance électrique et de la tension en fonction de la fréquence.

La figure 2.19 montre une variation de la puissance et de la tension relativement faible de 400 à 500 Hz. Cette variation s'accroît au fur et à mesure que l'on s'approche de la résonance autour de 535 Hz environ, dans ce cas, nous atteignons une puissance et tension maximales respectives de 90 μW et 1380 mV. À partir de ces résultats, nous nous sommes posés la question de qu'en est-il de l'impact de l'accélération et des épaisseurs du capteur piézoélectrique sur la puissance et la tension générées. Pour cela, nous avons décidé de mener une petite étude sur ces paramètres.

2.4 Analyse comparative sur la puissance électrique et la tension sous Comsol Multiphysics

2.4.1 Étude sur L'accélération

Nous avons fixé le diamètre et l'épaisseur de notre modèle, nous avons fait ensuite varier l'accélération et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.2.

Accélération (m/s ²)	Puissance électrique (μW)	Tension (mV)
0.3	90	1 360
0.6	190	1 870
0.8	300	2 500
1	400	3 100

Table 2.2 – Variation de la puissance électrique et de la tension pour diverses Valeurs d'Accélération.

Pour avoir une meilleure visibilité de ces résultats, nous les avons tracés sous forme de courbes d'évolution de la puissance et de la tension en fonction de l'accélération (figure 2.20).

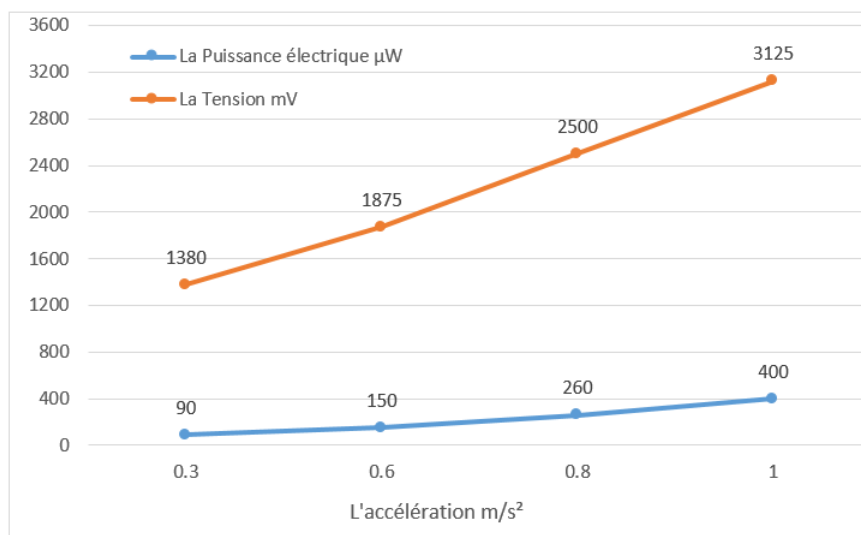


Figure 2.20 – Courbe de la puissance électrique et la tension en fonction de l'accélération.

La puissance et la tension augmentent de manière proportionnelle à l'accélération. En effet, pour une accélération de 0,3 m/s², la puissance est de 90 μW et la tension est de

1380 mV, tandis que pour une accélération de 1 m/s^2 , la puissance et la tension sont au maximum, atteignant respectivement $400 \text{ }\mu\text{W}$ et $3\,125 \text{ mV}$. Cela signifie que doubler l'accélération double la puissance et la tension. L'évolution de la puissance et de la tension est linéaire, car le graphique de ces valeurs en fonction de l'accélération forme une droite.

2.4.2 Étude sur les épaisseurs du capteur piézoélectrique

Ici, nous avons fixé l'accélération à $0,3 \text{ m/s}^2$, et nous avons fait varier les épaisseurs en fonction de celles disponibles sur le marché. Le Tableau 2.3 qui suit montre les résultats obtenus.

Épaisseur (mm)	Puissance électrique (μW)	Tension (mV)
0.02 (Laiton) - 0.03 (PZT)	18	660
0.10 (Laiton) - 0.12 (PZT)	36	940
0.20 (Laiton) - 0.22 (PZT)	40	967

Table 2.3 – Variation de la puissance électrique et de la tension pour diverses Valeurs d'épaisseurs.

Pour avoir une meilleure lecture de ces résultats, nous allons reprendre ce que nous avons fait pour l'accélération, à savoir, tracer sous forme de courbes d'évolution de la puissance et de la tension en fonction des différentes épaisseurs du capteur piézoélectrique (figure 2.21).

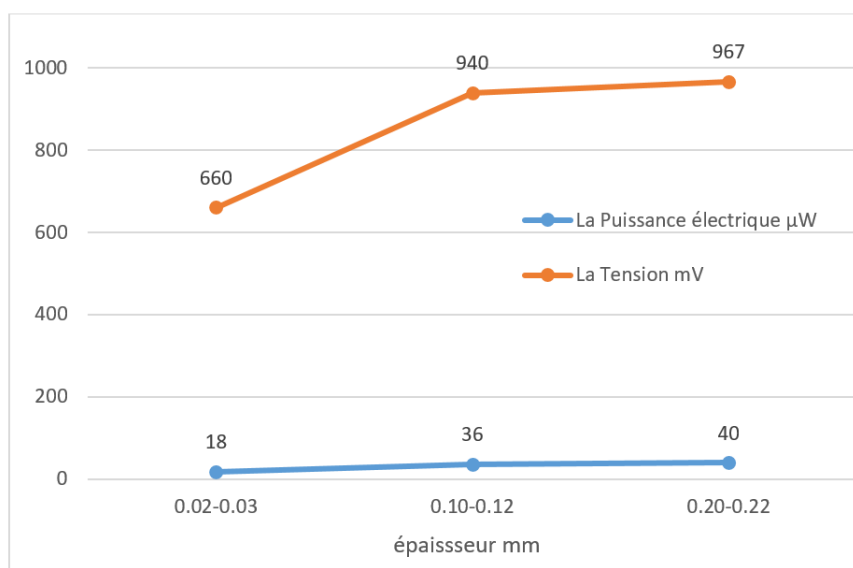


Figure 2.21 – Courbe de la puissance électrique et la tension en fonction des épaisseurs du capteur piézoélectrique.

La puissance et la tension augmentent de manière proportionnelle à l'épaisseur. En effet, pour une épaisseur de [0.02-0.03], la puissance est de 18 μW et la tension est de 660 mV, tandis que pour une épaisseur de [0.20-0.22], la puissance et la tension sont au maximum, atteignant respectivement 40 μW et 967 mV. Cela signifie que l'augmentation de l'épaisseur double la puissance et la tension. L'évolution de la puissance et de la tension est linéaire, car le graphique de ces valeurs en fonction de l'épaisseur forme une droite.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la simulation sous le logiciel Comsol Multiphysics d'un capteur piézoélectrique commercial (piézo buzzer). L'objectif était de démontrer l'impact des différents paramètres tels que les épaisseurs du capteur piézoélectrique, l'accélération et la fréquence sur le comportement du capteur et par conséquent sur sa capacité à récupérer de l'énergie. Les résultats obtenus montrent non seulement une amélioration significative de la quantité d'énergie récupérée au fur et à mesure que l'accélération augmente, de 90 μW à 400 μW pour la puissance et de 1 380 mV à 3 125 mV pour la tension, pour une variation de l'accélération de 0.7, mais aussi une dépendance des épaisseurs du capteur piézoélectrique, qui varie de 18 μW à 40 μW pour la puissance et 660 mV à 967 mV pour la tension. À partir de là, nous allons entamer la réalisation pratique et démontrer le bon fonctionnement de notre système de récupération d'énergie.

Système de récupération d'énergie proposé

Sommaire

3.1	INTRODUCTION	43
3.2	Système de récupération d'énergie proposé	43
3.2.1	Disposition des Capteurs Piézoélectriques dans la Semelle . . .	44
3.2.2	La Tension Mesurée par les Capteurs Piézoélectriques lors d'un Test de Marche	44
3.2.3	Le Circuit électronique pour la récupération d'énergie de la marche	45
3.2.4	Étage des capteurs piézoélectriques	46
3.2.5	Étage de redressement (pont de diode)	47
3.2.6	Étage du condensateur de Filtrage	49
3.2.7	Étage de régulation variable LM317	50
3.2.8	Batterie rechargeable	52
3.3	Test final et résultats	53
3.4	Résultats obtenues	53
3.5	Conclusion	54

3.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de réaliser un prototype de chaussures dont les semelles intègrent des capteurs piézoélectriques (piézo buzzer). Ces derniers ont pour but de récupérer de l'énergie électrique issue de la force qui leur est appliquée lorsqu'une personne marche. Nous détaillerons les étapes que nous avons suivies pour réaliser ce prototype, et nous verrons quel circuit nous avons choisi pour récupérer cette énergie et la stocker sur une batterie. Enfin, les résultats obtenus seront présentés et discutés.

3.2 Système de récupération d'énergie proposé

Le schéma bloc des différents composants de notre système de récupération d'énergie est présenté en figure 3.1.



Figure 3.1 – Schémas de bloc du système de récupération d'énergie.

Dans un premier temps, il s'agit de récupérer un signal électrique issu de la force appliquée sur les capteurs piézoélectriques lors de la marche. Ce signal étant sinusoïdal, il ne peut pas être stocké sur une batterie. Pour cela, il doit être redressé par un pont de diodes, ensuite filtré par un condensateur pour le lissage entre autres de la sortie redressée, puis régulé par un régulateur de tension avant d'être envoyé vers la batterie pour être stocké. Avant de réaliser notre prototype, nous avons fait une petite recherche bibliographique pour voir la disposition optimale des points de pression sur le pied humain, et donc la disposition des capteurs piézoélectriques. Par la suite, nous avons effectué quelques tests de marches en utilisant trois capteurs piézoélectriques branchés en parallèle, et sur lesquels nous avons branché un pont redresseur, un condensateur et une DEL.

3.2.1 Disposition des Capteurs Piézoélectriques dans la Semelle

Pour déterminer la disposition optimale des capteurs piézoélectriques dans la semelle, nous nous sommes appuyés sur une étude de L. Calverie, qui a segmenté le pied en plusieurs zones de pression [36]. En suivant les conclusions de cette étude, nous avons identifié trois zones A, B et C ; ces dernières sont représentées sur la figure 3.2 qui suit.

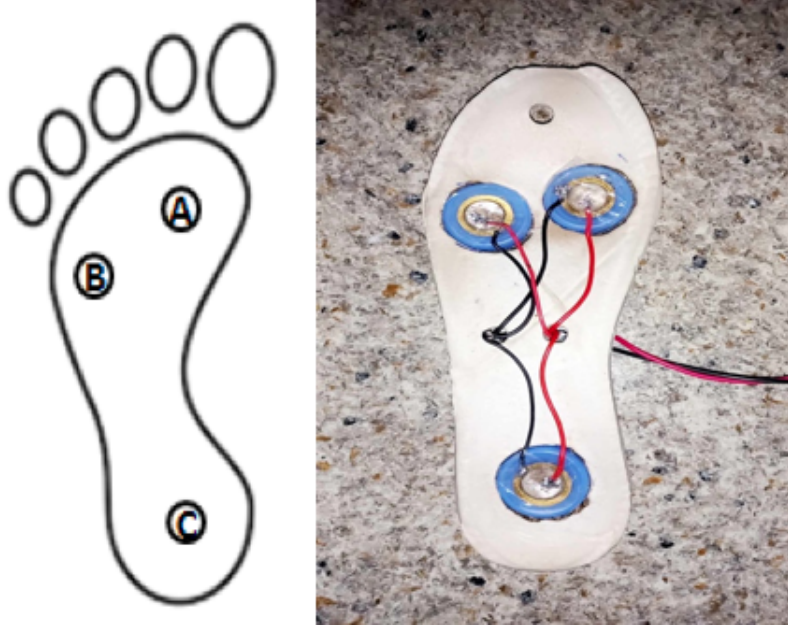


Figure 3.2 – Les points de pression du pied

Selon l'étude de L. Calverie, les zones A et B représentent chacune 20 % de la pression totale du pied, alors que la zone C représente 30 % de la pression totale du pied. En conséquence, nous prévoyons d'installer les trois capteurs piézoélectriques sur ces zones-là.

3.2.2 La Tension Mesurée par les Capteurs Piézoélectriques lors d'un Test de Marche

Nous avons entrepris un test de marche auprès de plusieurs personnes (femmes et enfants), de divers poids et âges, chacun parcourant une distance de 100 pas. L'objectif était de définir la corrélation entre le poids et la tension mesurée par les capteurs piézoélectriques. Les résultats de ces tests sont synthétisés dans le tableau suivant :

Personnes	Âge	Poids	Tension Obtenue
Personne 1	22 ans	71,5 Kg	1,15 V
Personne 2	34 ans	62 Kg	0,6 V
Personne 3	11 ans	40 Kg	0,30 V

Table 3.1 – Tableau des Données de Santé des Participants

On remarque que la tension mesurée est directement liée au poids, ce qui n'est pas une surprise en soi. En effet, pour la personne présentant le poids le plus important, la tension générée est la plus élevée et représente 1,15 V pour 100 pas, tandis que la personne présentant le poids le plus faible a généré une plus faible de 0,30 V. La personne dont le poids est de 62 kg arrive à générer une tension de 0,6 V.

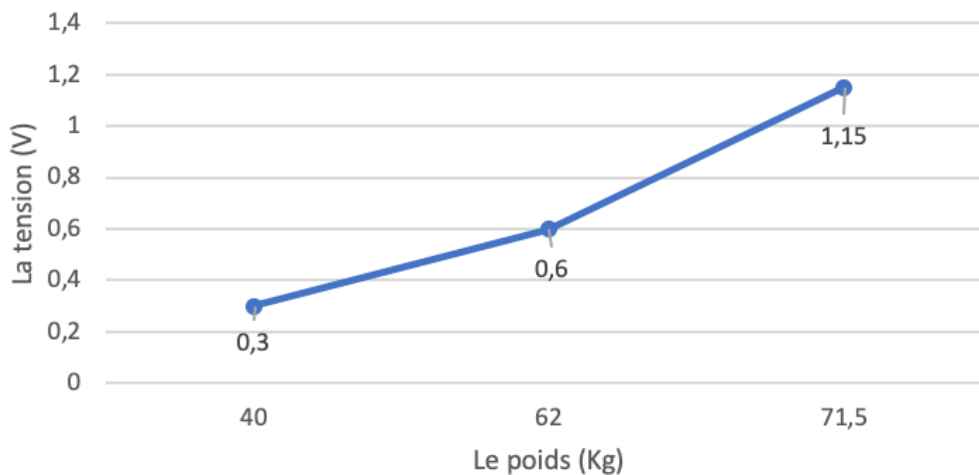


Figure 3.3 – la tension en fonction de poids

Les résultats montrent une tendance claire où l'augmentation du poids entraîne une augmentation de la tension. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une personne avec un poids plus important exerce une pression plus importante, ce qui implique que la tension générée par les capteurs piézoélectriques sera plus élevée.

3.2.3 Le Circuit électronique pour la récupération d'énergie de la marche

Le circuit proposé pour la récupération d'énergie de la marche est illustré dans la figure 3.4 qui suit.

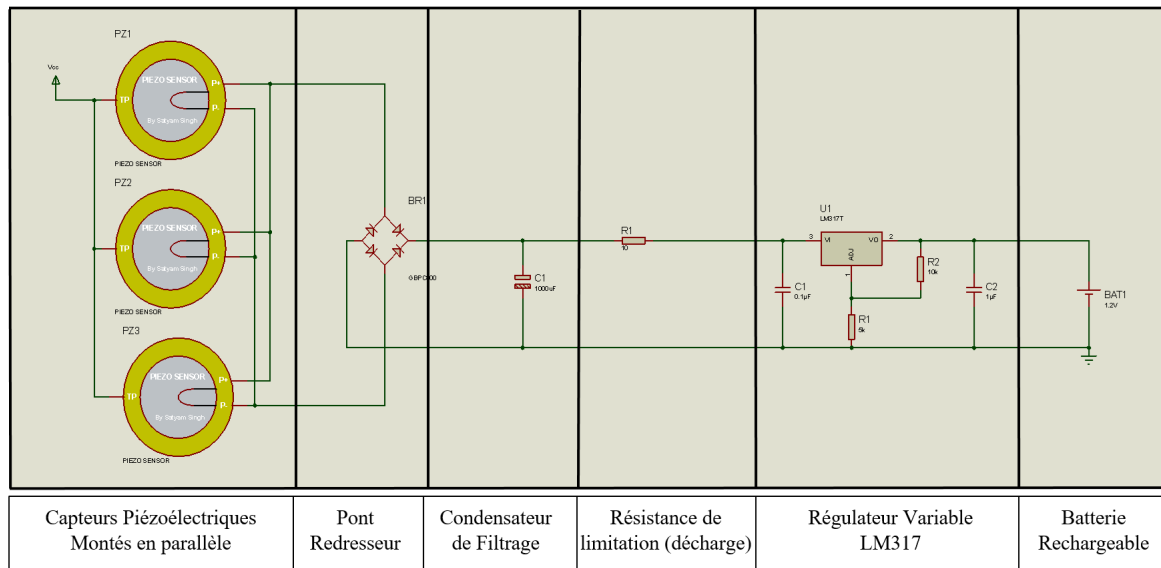


Figure 3.4 – Le circuit électronique proposé pour la récupération d'énergie de la marche.

Comme nous pouvons le constater, ce dernier se compose de :

- Trois capteurs piézoélectriques dont les dimensions ont été présentées dans le chapitre II (20 mm, 14 mm)
- Un pont de diodes composé de quatre diodes 1N4002.
- Un condensateur de filtrage polarisé 1000 µF/16 V.
- Un régulateur de tension positive linéaire ajustable.
- Une batterie rechargeable 1.2 V.

Par souci de bonne marche de notre circuit, nous avons testé en premier juste l'étage piézoélectrique et au fur et à mesure que nous obtenions les résultats souhaités, nous rajoutions l'étage suivant.

3.2.4 Étage des capteurs piézoélectriques

Afin de vérifier le bon fonctionnement des capteurs piézoélectriques, nous avons commencé par un petit test sur une diode DEL. L'objectif est qu'en utilisant un seul capteur piézoélectrique et en appliquant une pression dessus, on puisse faire allumer cette diode DEL, comme le montre la figure 3.5.



Figure 3.5 – Test d'alimentation d'une diode DEL par un seul capteur piézoélectrique.

Le même test a été reproduit pour les deux autres capteurs afin de vérifier leur bon fonctionnement. Après avoir vérifié le bon fonctionnement de ces trois capteurs piézoélectriques, nous les avons reliés en parallèle avec une diode DEL afin d'augmenter la tension comme le montre la figure 3.6.

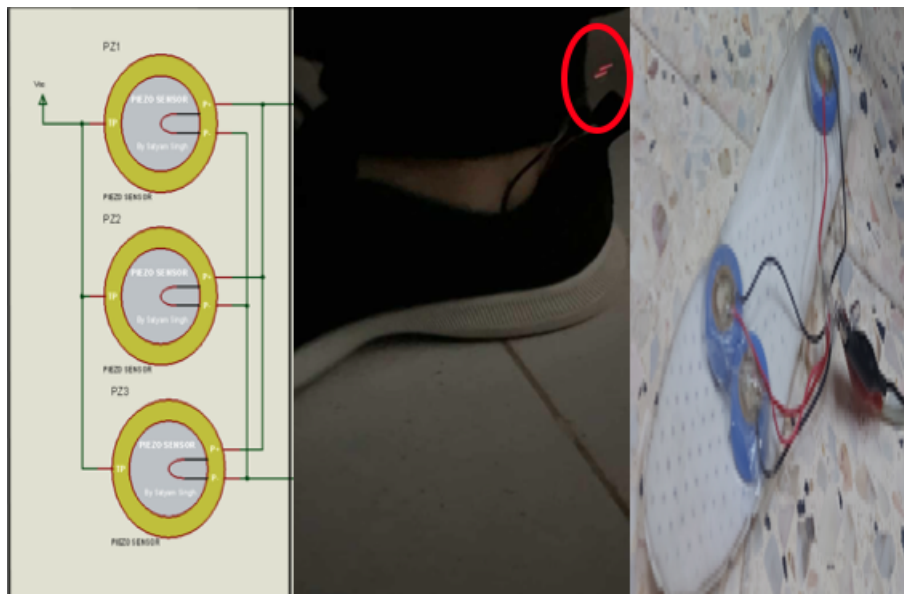


Figure 3.6 – Test d'alimentation d'une diode DEL par trois capteur piézoélectrique.

3.2.5 Étage de redressement (pont de diode)

L'une des premières étapes permettant la conversion d'une tension alternative en tension continue est le redressement. Dans notre cas, le signal alternatif provenant des trois capteurs piézoélectriques est redressé en utilisant le pont diode composé de quatre diodes

1N4002. L'objectif ici est d'éliminer l'alternance négative générée par les trois capteurs piézoélectriques.

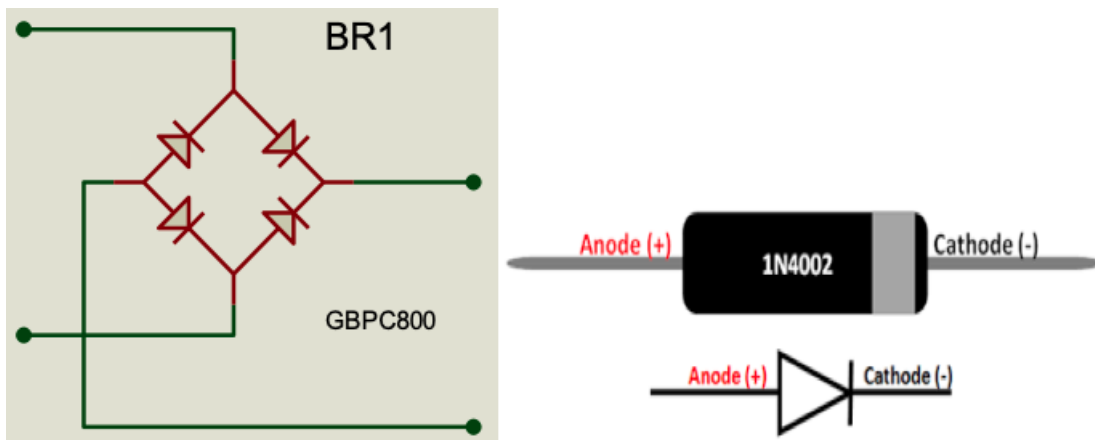


Figure 3.7 – Pont redresseur utilisant quatre diodes 1N4002.

Le pont de diode branché avec les trois capteurs piézoélectriques est présenté en figure 3.8.

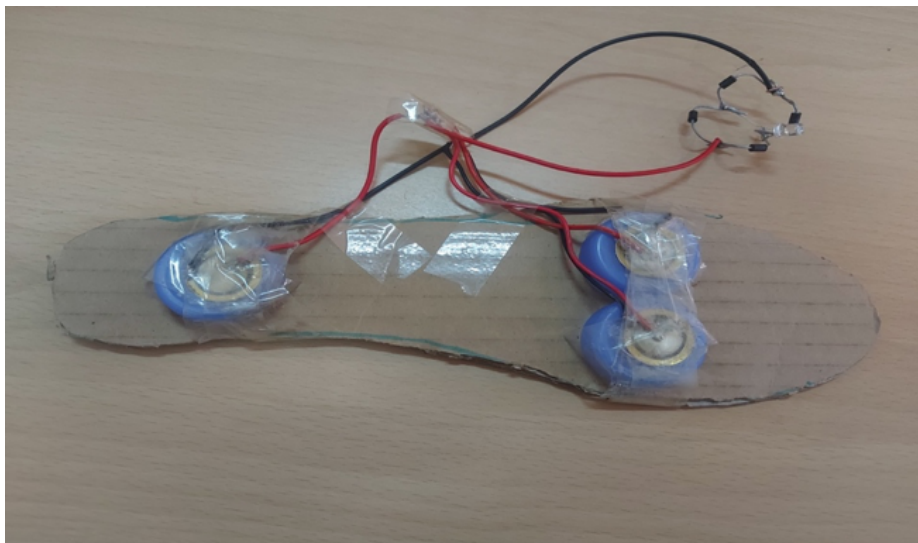


Figure 3.8 – Pont redresseur branché avec les capteurs piézoélectriques.

En appliquant des forces en marchants sur les capteurs piézoélectriques, nous avons obtenu le signal présenté en figure 3.9 qui suit.

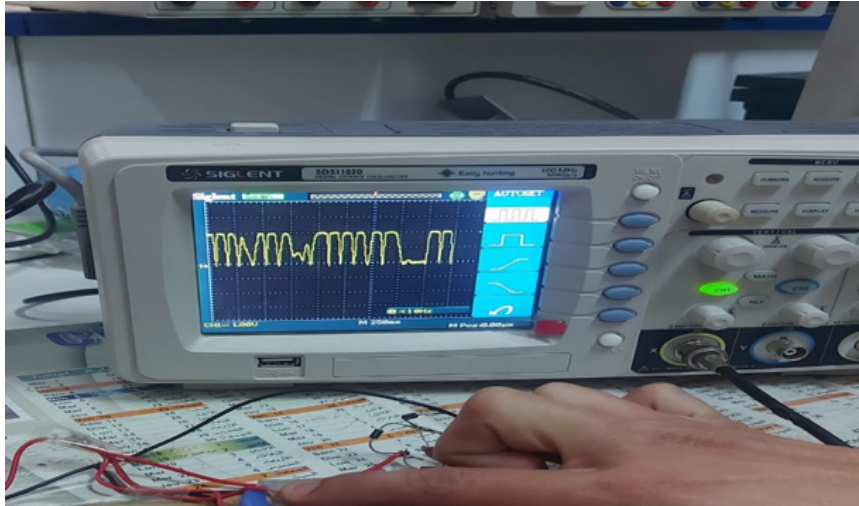


Figure 3.9 – Le signal de l'oscilloscope obtenu du pont redresseur.

Nous pouvons ici constater que nous sommes en présence d'alternances positives uniquement, les alternances négatives ayant été supprimées.

3.2.6 Étage du condensateur de Filtrage

Le condensateur joue plusieurs rôles importants dans le processus de conversion du signal alternatif vers continu. Nous pouvons citer ici quelques-uns comme : lissage de la tension, amélioration de la régulation de tension, filtrage, réduction de la tension d'ondulation, etc. Nous avons considéré dans notre cas un condensateur polarisé 1000 μF /16 V.

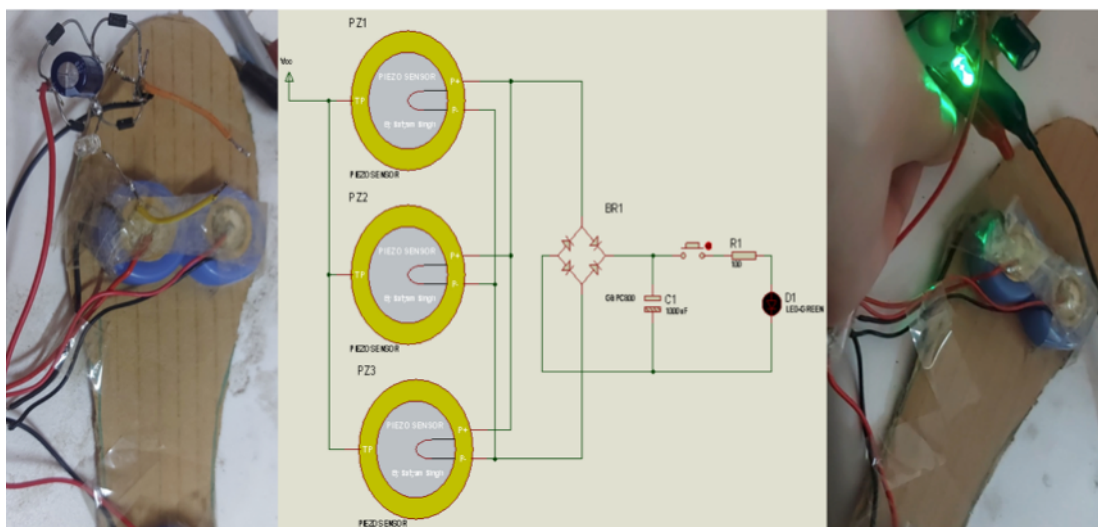


Figure 3.10 – Capteurs piézoélectriques branchés avec le pont redresseur et le condensateur.

Première constatation sur la figure 10 de droite, c'est qu'en utilisant le condensateur, la diode DEL se maintient allumée pendant un temps très court. Ceci est dû au fait que le condensateur met un peu de temps à se décharger.



Figure 3.11 – Le signal obtenu aux bornes du condensateur.

La figure 3.11 montre le signal filtré après redressement et qui se présente sous la forme d'un signal continu. Les deux pics constatés ici sont dus au fait qu'à ces instants, nous avons appuyé sur le bouton poussoir, ce qui a fait décharger pendant une très courte période le condensateur. Après avoir vérifié le bon fonctionnement de notre circuit jusqu'à présent, nous avons décidé d'introduire le régulateur LM317.

3.2.7 Étage de régulation variable LM317

le LM317 est un régulateur de tension polyvalent à trois bornes qui peut être ajusté pour délivrer une tension de sortie allant de 1,25 V à 37 V. Pour régler la tension de sortie, seules deux résistances externes sont nécessaires. De plus, il est équipé de fonctionnalités de sécurité essentielles telles que la limitation de courant, la protection contre les surcharges thermiques . Ce choix est justifié par la disponibilité du composant et du fait qu'il peut avoir une plage de tension variable à son entrée.

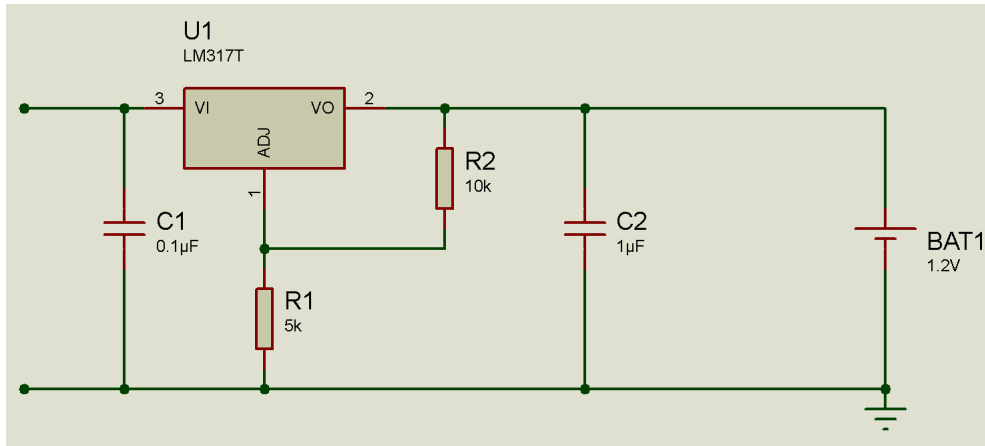


Figure 3.12 – Circuit de régulateur LM317.

Le montage que nous avons réalisé est présenté sur la figure 3.13 qui suit.

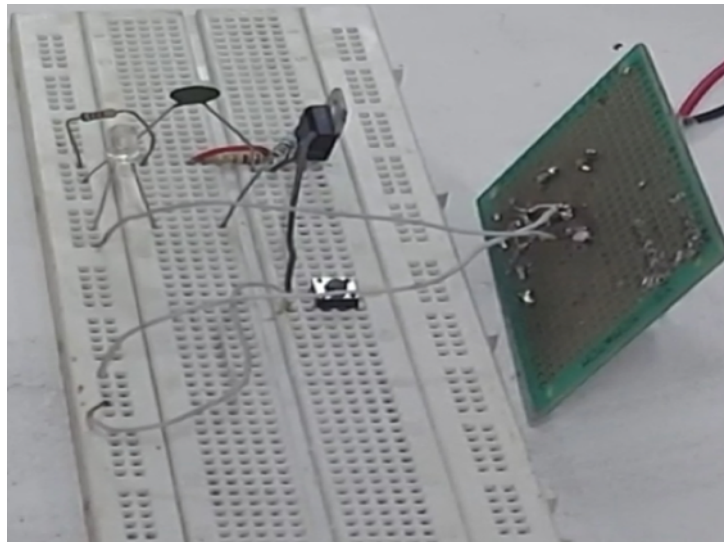


Figure 3.13 – Branchement du régulateur avec le circuit précédent.

Afin de connaître la tension de sortie pouvant être générée par le régulateur LM317, il est nécessaire de jouer sur les deux résistances R1 et R2. L'équation permettant de calculer le V_{out} est donnée dans l'équation (1) suivante et est fournie dans le datasheet du LM317 :

$$V_{out} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \cdot R_2$$

Typiquement, I_{adj} est d'environ 50 μA et est négligeable dans la plupart des applications [37]. Nous avons choisi comme valeurs de résistance R1 et R2 respectivement 10 k Ω et 5

$K\Omega$. Ceci nous permet d'avoir un V-out de :

$$V_{out} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{5}{10}\right) + (50 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3) = 2,125V$$

Nous avons quand même mesuré pratiquement la valeur V-out à la sortie du régulateur et nous avons trouvé :

$$V_{out(mesur)} = 2V$$

3.2.8 Batterie rechargeable

Pour cette partie, nous avons considéré une pile rechargeable traditionnelle que l'on trouve dans le commerce. C'est une pile Lithium-Ion rechargeable de 1.2 V et 3200 mAh et elle est présentée dans la figure 3.14 qui suit.



Figure 3.14 – Partie stockage en utilisant une batterie Lithium-Ion .

Après avoir vu notre circuit et testé ce dernier étage par étage, nous avons entamé le test final en insistant sur la charge de la batterie.

3.3 Test final et résultats

La figure 3.15 qui suit montre le circuit final assemblé sur une chaussure et sur lequel seront menés les tests pratiques.

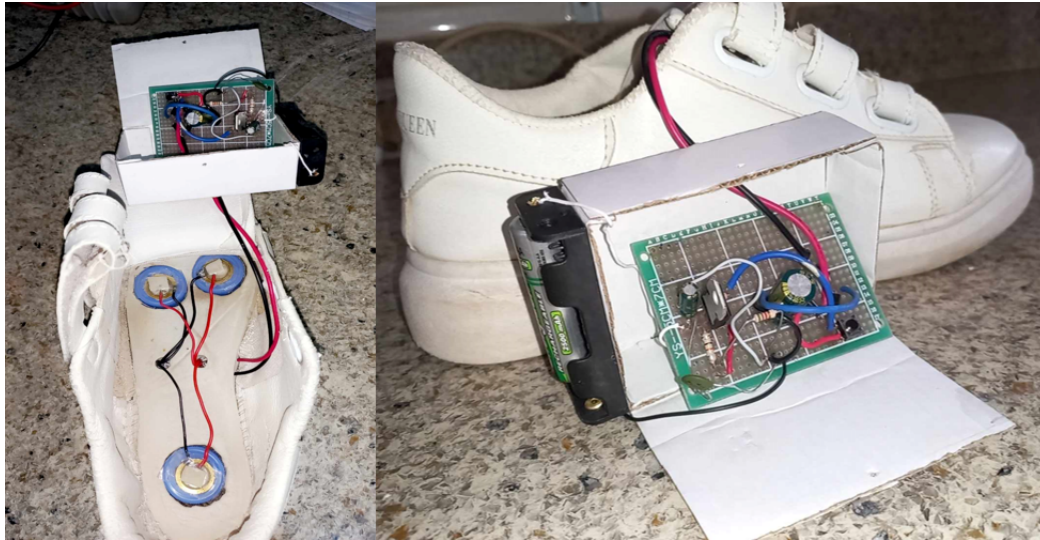


Figure 3.15 – Système de récupération d'énergie réalisé.

L'objectif ici est de faire des cycles de marche et mesurer la variation de charge de la batterie.

3.4 Résultats obtenues

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant, pour différents nombres de pas (260, 190 et 226 pas) :

Tension à l'entrée du régulateur	État initial de la batterie	État final de la batterie	Énergie récupérée
3,10 mV	10,5 mV	13,5 mV	3 mV
1,98 mV	25,2 mV	27,4 mV	2,2 mV
2,16 mV	12,8 mV	15,4 mV	2,6 mV

Table 3.2 – Résultats pratiques obtenus.

Nous pouvons ici dire que la tension récupérée est faible, environ 3 mV sur la batterie. Néanmoins, précisons que ces tests ont été effectués en statique, c'est-à-dire que l'on

marchait et on revenait ensuite faire une mesure à l'arrêt. Or, pour que le système récupère plus efficacement l'énergie, il faudra le faire sur une marche plus longue et une mesure en temps réel de l'état de la batterie, chose que nous n'avons malheureusement pas traité dans ce mémoire. Néanmoins, nous pouvons dire que ces résultats sont très prometteurs et une étude plus approfondie pourra mener à de meilleurs résultats. Des suggestions et perspectives seront d'ailleurs données à la fin de ce mémoire.

3.5 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre présenté le circuit électronique proposé pour la récupération d'énergie de la marche. Chaque étage de ce circuit a été présenté et testé avant d'entamer les mesures finales. Les résultats obtenus montrent une récupération d'énergie de 3 mV environ pour 260 pas. Ces résultats, même s'ils sont relativement faibles, sont très prometteurs et ont permis de poser les premières pierres d'un projet qui peut être mené à prendre de l'ampleur et donner de meilleurs résultats à l'avenir.



Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était la réalisation d'un système de récupération d'énergie simple et peu coûteux visant à récupérer l'énergie issue de la marche de l'être humain. Nous avons commencé ce travail en présentant les différents types d'énergies ambiantes pouvant être récupérées et les modes de transductions utilisés à cet effet. Nous avons ensuite mis l'accent sur la piézoélectricité, sachant que nous nous intéressons sur une récupération d'énergie à petite échelle. À partir de là, nous avons entamé quelques simulations sous Comsol Multiphysics, où nous avons pu démontrer l'impacte de l'accélération et des dimensions du capteur piézoélectrique sur les puissances et tensions générées. Les résultats obtenus montrent que nous pouvons obtenir jusqu'à 3 125 mV et 400 μ W avec une accélération de 1 m/s^2 à condition de se placer sur la fréquence de résonance du capteur piézoélectrique. Nous avons ensuite entamé la réalisation pratique où nous avons intégré trois capteurs piézoélectriques positionnés sur des points bien précis sur la semelle d'une chaussure. Ces derniers représentent les points où le maximum de pression est appliqué par le pied sur les capteurs piézoélectriques. Sachant que les capteurs piézoélectriques combinés génèrent un signal sinusoïdal, il a été nécessaire de passer par des étages de redressement, de filtrage et de régulation avant de pouvoir stocker l'énergie récupérée sur une batterie. Ce circuit électronique a été testé et vérifié étage après étage et a montré son bon fonctionnement à chaque étape. Les tests finaux effectués ont permis de montrer une variation de charge de la batterie de 3 mV, ce qui correspond à l'énergie récupérée sur la batterie pour un nombre de pas de 260. Même si les résultats obtenus ne sont pas au niveau de nos attentes, cela

nous a permis d'entamer un travail qui sera mené à progresser et évoluer. Ceci nous amène donc à proposer quelques perspectives et recommandations pour les travaux futurs :

- Augmenter le nombre de capteurs piézoélectriques pour augmenter la quantité d'énergie récupérée.
- Dans ce mémoire, par manque de composants, nous avons testé notre système de récupération d'énergie sur un seul pied. Il serait judicieux de rajouter aussi l'autre pied.
- Changer les capteurs piézoélectriques que nous avons utilisés par d'autres du même type, mais pouvant générer plus d'énergie.
- Utiliser une électronique plus adaptée pour cette récupération d'énergie, par exemple, l'utilisation du module LTC 3588 qui est un module conçu spécifiquement pour la récupération d'énergie.
- Utiliser des boosters de tensions tels que les circuits TPS61200, LTC3525, L6920.
- Utiliser ce qu'on appelle « capacitor-based boosting » tel que le circuit TPS61090.

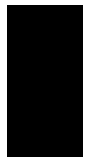
299450774/figure/tbl1/AS:614216063008773@1523451929584/

ENERGY-HARVESTING-SOURCES-AND-THEIR-CAPABILITIES.png.

- [9] Géothermie [Le chauffage - PAC], May 2019. Consulté le 21 mars 2024. Disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-par-pompe-a-chaaleur2/geothermie/>.
- [10] Rendement des éoliennes, May 2010. Consulté le 21 mars 2024. Disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/>.
- [11] Biomasse énergie. Consulté le 21 mars 2024. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/biomasse-energie>.
- [12] Abbes Dhaker. Énergies renouvelables.
- [13] Mahidur R. Sarker, Sabariah Julai, Mohd Faizul Mohd Sabri, Suhana Mohd Said, Md. Mainul Islam, and Muhammad Tahir. Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system. *Sensors and Actuators A : Physical*, 300 :111634, December 2019.
- [14] Samia ADRAR. *Semelle piézoélectrique connectée pour applications médicales*. PhD thesis, Nantes université, 2022.
- [15] Albert Einstein. « La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. 2018.
- [16] Guide sur les bases des microphones - Que fait un microphone? | Audio-Technica.
- [17] Comment nettoyer capsule micro électrostatique Neumann - Audio vintage/Hi-Fi, April 2022. Section : Audio vintage/Hi-Fi.
- [18] André Dompierre. DEVELOPMENT OF MEMS PIEZOELECTRIC VIBRATION ENERGY HARVESTERS WITH WAFER-LEVEL INTEGRATED TUNGSTEN PROOF-MASS FOR ULTRA LOW POWER AUTONOMOUS WIRELESS SENSORS. February 2019.
- [19] Hichem NOUIRA. CONTRIBUTION Á LA CONCEPTION D'UN MICRCONVERTISSEUR D'ÉNERGIE MÉCANIQUE VIBRATOIRE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. 2008.

- [20] Louanes HAMZIOUI. *Effet de P2O5 sur les propriétés diélectriques et piézoélectriques de la solution solide Pb0.98Ca0.02[(Zr0.52Ti0.48)0.98(Cr3+ 0.5, Ta5+ 0.5)0.02]O3*. PhD thesis, 2007.
- [21] Claire JEAN-MISTRAL et Skandar BASROUR. Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques pour générer de l'électricité, 2010.
- [22] Gilles Feld, E. Labouré, Emmanuel Hoang, and Bertrand Revol. Mesure de la déformation d'un matériau piézoélectrique par interférométrie. *J3ea*, 7, January 2008.
- [23] Constantes piézoélectriques | Accelerometer tutorial.
- [24] 5 types de matériaux piézoélectriques les plus courants, May 2023.
- [25] Linda Serairi. *Elaboration et conception des dispositifs de la récupération d'énergie à base de nanofils de ZnO et de microfibres de PVDF-TrFE*. PhD thesis, May 2017.
- [26] M. BENAÏSSA Alaeddine. *Analyse De La Modélisation Et Le Contrôle D'une Pompe Piézoélectrique*. PhD thesis, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2018.
- [27] Nicolas Jamond. Des nanofils Nitrure à la génération piézoélectrique. 2016.
- [28] Applications of Piezoelectric Ceramics | Medical, Communications, Automotive. Consulté le 2 avril 2024. Disponible sur : <https://piezodirect.com/applications-of-piezoelectric-ceramics/>.
- [29] sensors. Consulté le 2 avril 2024. Disponible sur : https://www.mdpi.com/sensors/sensors-20-05214/article_deploy/html/images/sensors-20-05214-g016.png.
- [30] Applications of single crystals. Consulté le 2 avril 2024. Disponible sur : https://images.slideplayer.com/14/4215794/slides/slide_3.jpg.
- [31] BENDINE KOUIDER. *Contrôle actif de vibration par les Matériaux piézoélectriques*. PhD thesis, UNIVERSITE DE SIDI BEL ABBES, 2012.
- [32] Zhengbao Yang, Shengxi Zhou, Jean Zu, and Daniel Inman. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *Joule*, 2(4) :642–697, April 2018. Number : 4.
- [33] Abdelkader HAFDALLAH. Memoire Online - Etude du dopage des couches minces de ZnO élaborées par spray ultrasonique - Abdelkader HAFDALLAH, 2007.

- [34] Properties of piezoelectric materials : PZT, LiNbO₃ , AlN and ZnO. Consulté le 11 mars 2024. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/Properties-of-piezoelectric-materials-PZT-LiNbO-3-AlN-and-ZnO_tbl2_259656236.
- [35] Rezika BAKRI. *ETUDE DU SYSTEME ZnO-AlN-ZrN*. PhD thesis, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2012.
- [36] L. Claverie, A. Ille, and P. Moretto. Validation of a method for dispatching discrete sensors on an insole for plantar pressure analysis. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(sup1) :1908–1909, October 2015.
- [37] Texas Instruments. *LM317 3-Terminal Adjustable Regulator*, 1997. Rev. 2020.



Annexes

A.1 Datasheet LM317

LM317 3-Terminal Adjustable Regulator

1 Features

- Output voltage range adjustable from 1.25 V to 37 V
- Output current greater than 1.5 A
- Internal short-circuit current limiting
- Thermal overload protection
- Output safe-area compensation

2 Applications

- ATCA solutions
- DLP: 3D biometrics, hyperspectral imaging, optical networking, and spectroscopy
- DVR and DVS
- Desktop PCs
- Digital signage and still cameras
- ECG electrocardiograms
- EV HEV chargers: levels 1, 2, and 3
- Electronic shelf labels
- Energy harvesting
- Ethernet switches
- Femto base stations
- Fingerprint and iris biometrics
- HVAC: heating, ventilating, and air conditioning
- High-speed data acquisition and generation
- Hydraulic valves
- IP phones: wired and wireless
- Intelligent occupancy sensing
- Motor controls: brushed DC, brushless DC, low-voltage, permanent magnet, and stepper motors
- Point-to-point microwave backhauls
- Power bank solutions
- Power line communication modems
- Power over ethernet (PoE)
- Power quality meters
- Power substation controls
- Private branch exchanges (PBX)
- Programmable logic controllers
- RFID readers
- Refrigerators
- Signal or waveform generators
- Software-defined radios (SDR)
- Washing machines: high-end and low-end
- X-rays: baggage scanners, medical, and dental

3 Description

The LM317 device is an adjustable three-terminal positive-voltage regulator capable of supplying more than 1.5 A over an output-voltage range of 1.25 V to 37 V. It requires only two external resistors to set the output voltage. The device features a typical line regulation of 0.01% and typical load regulation of 0.1%. It includes current limiting, thermal overload protection, and safe operating area protection. Overload protection remains functional even if the ADJUST terminal is disconnected.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM317DCY	SOT-223 (4)	6.50 mm × 3.50 mm
LM317KCS	TO-220 (3)	10.16 mm × 9.15 mm
LM317KCT	TO-220 (3)	10.16 mm × 8.59 mm
LM317KTT	TO-263 (3)	10.16 mm × 9.01 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Battery-Charger Circuit

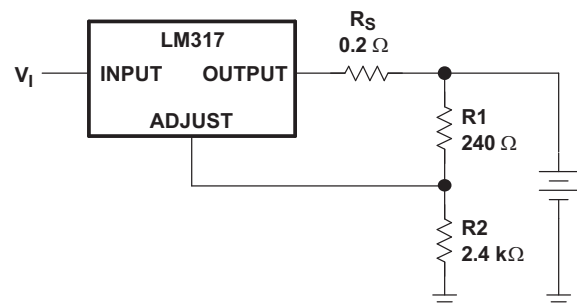


Table of Contents

1 Features	1	8.4 Device Functional Modes	10
2 Applications	1	9 Application and Implementation	11
3 Description	1	9.1 Application Information	11
4 Revision History	2	9.2 Typical Application	11
5 Device Comparison Table	3	9.3 System Examples	12
6 Pin Configuration and Functions	4	10 Power Supply Recommendations	18
7 Specifications	5	11 Layout	18
7.1 Absolute Maximum Ratings	5	11.1 Layout Guidelines	18
7.2 ESD Ratings	5	11.2 Layout Example	18
7.3 Recommended Operating Conditions	5	12 Device and Documentation Support	19
7.4 Thermal Information	5	12.1 Receiving Notification of Documentation Updates	19
7.5 Electrical Characteristics	6	12.2 Support Resources	19
7.6 Typical Characteristics	7	12.3 Trademarks	19
8 Detailed Description	9	12.4 Electrostatic Discharge Caution	19
8.1 Overview	9	12.5 Glossary	19
8.2 Functional Block Diagram	9	13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	19
8.3 Feature Description	9		

4 Revision History

Changes from Revision X (September 2016) to Revision Y	Page
• Added <i>Device Comparison Table</i>	3
• Changed V_{IN} to I_{OUT} in <i>Load Transient Response</i> figures	7
• Added missing caption to second y-axis in second <i>Load Transient Response</i> figure	7
• Changed V_{OUT} and output impedance equations in <i>Battery-Charger Circuit</i> section	14

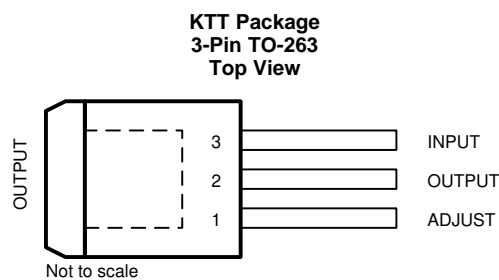
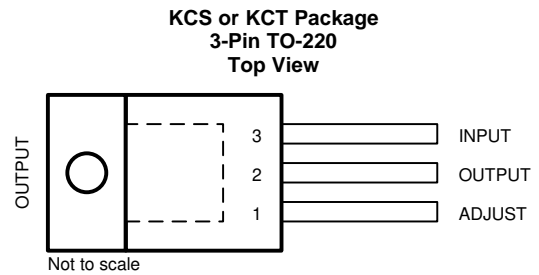
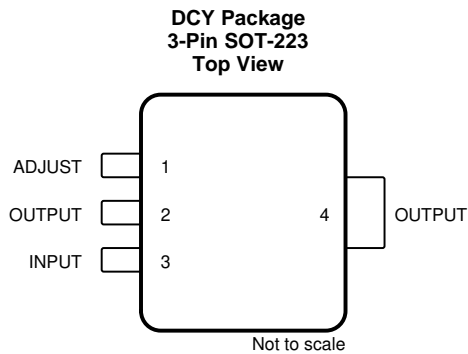
Changes from Revision W (January 2015) to Revision X	Page
• Changed body size dimensions for KCS TO-220 Package on <i>Device information</i> table	1
• Changed body size dimensions for KTT TO-263 Package on <i>Device information</i> table	1
• Changed V_O Output Voltage max value from 7 to 37 on <i>Recommended Operating Conditions</i> table	5
• Added min value to I_O Output Current in <i>Recommended Operating Conditions</i> table	5
• Changed values in the Thermal Information table to align with JEDEC standards	5
• Added KCT package data to <i>Thermal Information</i> table	5
• Deleted Section 9.3.6 "Adjusting Multiple On-Card Regulators with a Single Control"	14
• Updated Adjustable 4-A Regulator Circuit graphic	16
• Added <i>Receiving Notification of Documentation Updates</i> section and <i>Community Resources</i> section	19

Changes from Revision V (February 2013) to Revision W	Page
• Added <i>Applications</i> , <i>Device Information</i> table, <i>Pin Functions</i> table, <i>ESD Ratings</i> table, <i>Thermal Information</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section.	1
• Deleted <i>Ordering Information</i> table.	1

5 Device Comparison Table

I_{OUT}	PARAMETER	LM317	LM317-N	LM317A	LM317HV	UNIT
1.5 A	Input voltage range	4.25 - 40	4.25 - 40	4.25 - 40	4.25 - 60	V
	Load regulation accuracy	1.5	1.5	1	1.5	%
	PSRR (120 Hz)	64	80	80	65	dB
	Recommended operating temperature	0 to 125	0 to 125	-40 to 125	0 to 125	°C
	TO-220 (NDE) T_{JA}	23.5	23.2	23.3	23	°C/W
	TO-200 (KCT) T_{JA}	37.9	N/A	N/A		°C/W
	TO-252 T_{JA}	N/A	54	54		°C/W
	TO-263 T_{JA}	38	41	N/A		°C/W
	SOT-223 T_{JA}	66.8	59.6	59.6		°C/W
TO-92 T_{JA}	N/A	186	186		°C/W	
0.5 A		LM317M				
	Input voltage range	3.75 - 40				V
	Load regulation accuracy	1.5				%
	PSRR (120 Hz)	80				dB
	Recommended operating temperature	-40 - 125				°C
	SOT-223 T_{JA}	60.2				°C/W
TO-252 T_{JA}	56.9				°C/W	
0.1 A		LM317L	LM317L-N			
	Input voltage range	3.75 - 40	4.25 - 40			V
	Load regulation accuracy	1	1.5			%
	PSRR (120 Hz)	62	80			dB
	Recommended operating temperature	-40 to 125	-40 to 125			°C
	SOT-23 T_{JA}	167.8	N/A			°C/W
	SO-8 T_{JA}	N/A	165			°C/W
	DSBGA T_{JA}	N/A	290			°C/W
TO-92 T_{JA}	N/A	180			°C/W	

6 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

NAME	PIN		I/O	DESCRIPTION
	TO-263, TO-220	SOT-223		
ADJUST	1	1	I	Output voltage adjustment pin. Connect to a resistor divider to set V_O
INPUT	3	3	I	Supply input pin
OUTPUT	2	2, 4	O	Voltage output pin

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings

over virtual junction temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
$V_I - V_O$	Input-to-output differential voltage		40	V
T_J	Operating virtual junction temperature		150	°C
	Lead temperature 1,6 mm (1/16 in) from case for 10 s		260	°C
T_{stg}	Storage temperature	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

7.2 ESD Ratings

			MAX	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	2500	V
		Charged device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	1000	

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
(2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

7.3 Recommended Operating Conditions

		MIN	MAX	UNIT
V_O	Output voltage	1.25	37	V
$V_I - V_O$	Input-to-output differential voltage	3	40	V
I_O	Output current	0.01	1.5	A
T_J	Operating virtual junction temperature	0	125	°C

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		LM317				UNIT
		DCY (SOT-223)	KCS (TO-220)	KCT (TO-220)	KTT (TO-263)	
		4 PINS	3 PINS	3 PINS	3 PINS	
$R_{\theta(JA)}$	Junction-to-ambient thermal resistance	66.8	23.5	37.9	38.0	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	43.2	15.9	51.1	36.5	°C/W
$R_{\theta JB}$	Junction-to-board thermal resistance	16.9	7.9	23.2	18.9	°C/W
Ψ_{JT}	Junction-to-top characterization parameter	3.6	3.0	13.0	6.9	°C/W
Ψ_{JB}	Junction-to-board characterization parameter	16.8	7.8	22.8	17.9	°C/W
$R_{\theta JC(bot)}$	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	NA	0.1	4.2	1.1	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the [Semiconductor and IC package thermal metrics application report](#).

7.5 Electrical Characteristics

over recommended ranges of operating virtual junction temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ⁽¹⁾		MIN	TYP	MAX	UNIT
Line regulation ⁽²⁾	$V_I - V_O = 3\text{ V to }40\text{ V}$		$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.01	0.04	%V
			$T_J = 0^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	0.02	0.07	
Load regulation	$I_O = 10\text{ mA to }1500\text{ mA}$	$C_{ADJ}^{(3)} = 10\ \mu\text{F},$ $T_J = 25^\circ\text{C}$	$V_O \leq 5\text{ V}$		25	mV
			$V_O \geq 5\text{ V}$	0.1	0.5	% V_O
		$T_J = 0^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	$V_O \leq 5\text{ V}$	20	70	mV
			$V_O \geq 5\text{ V}$	0.3	1.5	% V_O
Thermal regulation	20-ms pulse,	$T_J = 25^\circ\text{C}$		0.03	0.07	% V_O/W
ADJUST terminal current				50	100	μA
Change in ADJUST terminal current	$V_I - V_O = 2.5\text{ V to }40\text{ V}, P_D \leq 20\text{ W}, I_O = 10\text{ mA to }1500\text{ mA}$			0.2	5	μA
Reference voltage	$V_I - V_O = 3\text{ V to }40\text{ V}, P_D \leq 20\text{ W}, I_O = 10\text{ mA to }1500\text{ mA}$		1.2	1.25	1.3	V
Output-voltage temperature stability	$T_J = 0^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$			0.7		% V_O
Minimum load current to maintain regulation	$V_I - V_O = 40\text{ V}$			3.5	10	mA
Maximum output current	$V_I - V_O \leq 15\text{ V},$	$P_D < P_{MAX}^{(4)}$	1.5	2.2		A
	$V_I - V_O \leq 40\text{ V},$	$P_D < P_{MAX}^{(4)},$ $T_J = 25^\circ\text{C}$	0.15	0.4		
RMS output noise voltage (% of V_O)	$f = 10\text{ Hz to }10\text{ kHz},$	$T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		% V_O
Ripple rejection	$V_O = 10\text{ V},$	$f = 120\text{ Hz}$	$C_{ADJ} = 0\ \mu\text{F}^{(3)}$	57		dB
			$C_{ADJ} = 10\ \mu\text{F}^{(3)}$	62	64	
Long-term stability	$T_J = 25^\circ\text{C}$			0.3	1	%/1k hr

- (1) Unless otherwise noted, the following test conditions apply: $|V_I - V_O| = 5\text{ V}$ and $I_{O\text{MAX}} = 1.5\text{ A}, T_J = 0^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$. Pulse testing techniques are used to maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.
- (2) Line regulation is expressed here as the percentage change in output voltage per 1-V change at the input.
- (3) C_{ADJ} is connected between the ADJUST terminal and GND.
- (4) Maximum power dissipation is a function of $T_J(\text{max}), \theta_{JA},$ and T_A . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A) / \theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.

7.6 Typical Characteristics

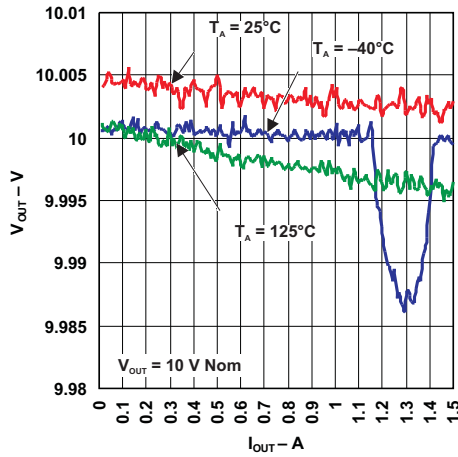


Figure 1. Load Regulation

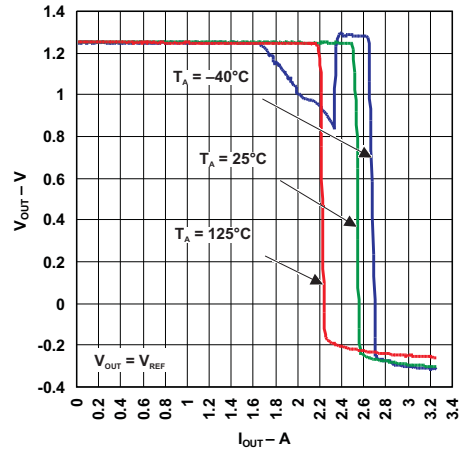


Figure 2. Load Regulation

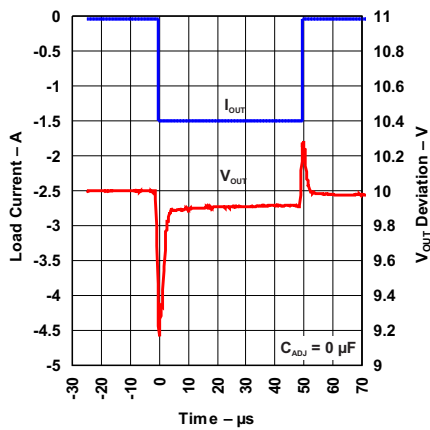


Figure 3. Load Transient Response

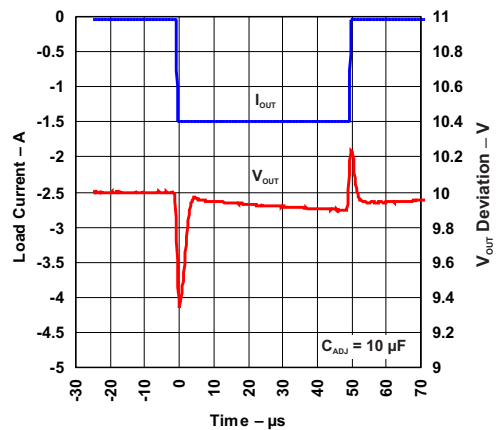


Figure 4. Load Transient Response

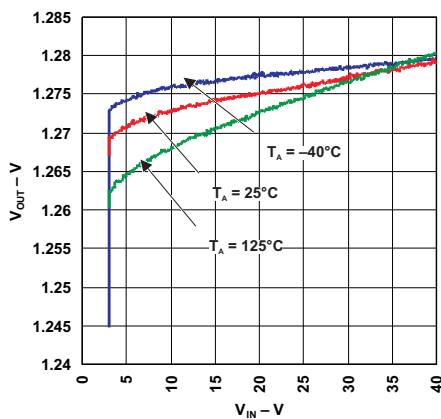


Figure 5. Line Regulation

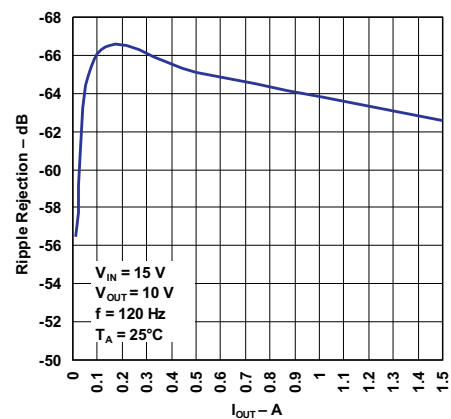


Figure 6. Ripple Rejection vs Output Current

Typical Characteristics (continued)

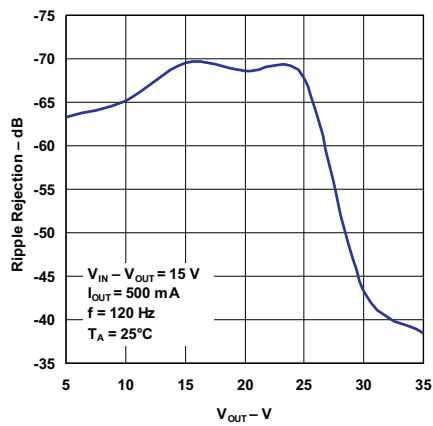


Figure 7. Ripple Rejection vs Output Voltage

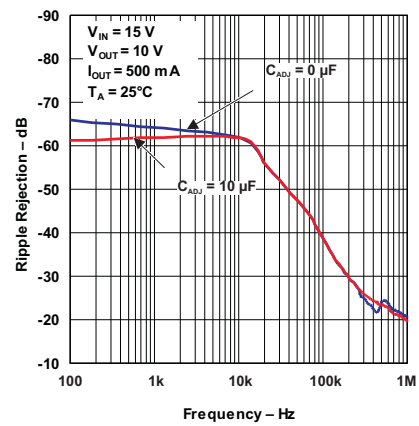


Figure 8. Ripple Rejection vs Frequency

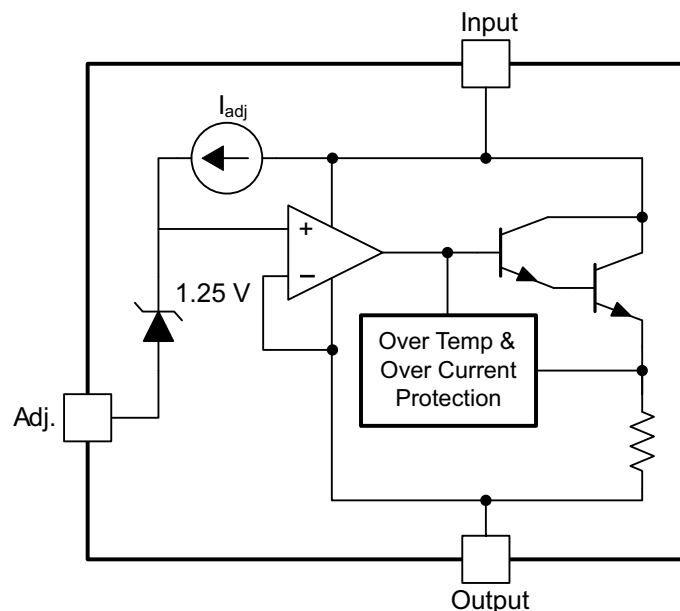
8 Detailed Description

8.1 Overview

The LM317 device is an adjustable three-terminal positive-voltage regulator capable of supplying up to 1.5 A over an output-voltage range of 1.25 V to 37 V. It requires only two external resistors to set the output voltage. The device features a typical line regulation of 0.01% and typical load regulation of 0.1%. It includes current limiting, thermal overload protection, and safe operating area protection. Overload protection remains functional even if the ADJUST terminal is disconnected.

The LM317 device is versatile in its applications, including uses in programmable output regulation and local on-card regulation. Or, by connecting a fixed resistor between the ADJUST and OUTPUT terminals, the LM317 device can function as a precision current regulator. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The ADJUST terminal can be bypassed to achieve very high ripple-rejection ratios, which are difficult to achieve with standard three-terminal regulators.

8.2 Functional Block Diagram



8.3 Feature Description

8.3.1 NPN Darlington Output Drive

NPN Darlington output topology provides naturally low output impedance and an output capacitor is optional. 3-V headroom is recommended ($V_I - V_O$) to support maximum current and lowest temperature.

8.3.2 Overload Block

Over-current and over-temperature shutdown protects the device against overload or damage from operating in excessive heat.

8.3.3 Programmable Feedback

Op amp with 1.25-V offset input at the ADJUST terminal provides easy output voltage or current (not both) programming. For current regulation applications, a single resistor whose resistance value is $1.25 V/I_O$ and power rating is greater than $(1.25 V)^2/R$ should be used. For voltage regulation applications, two resistors set the output voltage.

8.4 Device Functional Modes

8.4.1 Normal Operation

The device OUTPUT pin will source current necessary to make OUTPUT pin 1.25 V greater than ADJUST terminal to provide output regulation.

8.4.2 Operation With Low Input Voltage

The device requires up to 3-V headroom ($V_I - V_O$) to operate in regulation. The device may drop out and OUTPUT voltage will be INPUT voltage minus drop out voltage with less headroom.

8.4.3 Operation at Light Loads

The device passes its bias current to the OUTPUT pin. The load or feedback must consume this minimum current for regulation or the output may be too high. See the [Electrical Characteristics](#) table for the minimum load current needed to maintain regulation.

8.4.4 Operation In Self Protection

When an overload occurs the device shuts down Darlington NPN output stage or reduces the output current to prevent device damage. The device will automatically reset from the overload. The output may be reduced or alternate between on and off until the overload is removed.

9 Application and Implementation

NOTE

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

9.1 Application Information

The flexibility of the LM317 allows it to be configured to take on many different functions in DC power applications.

9.2 Typical Application

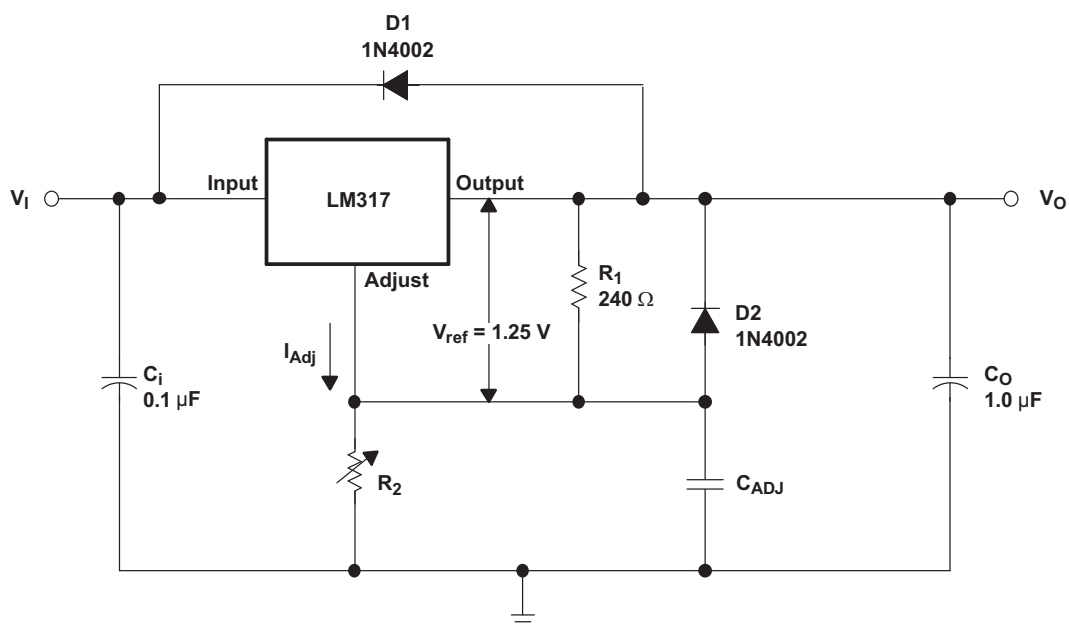


Figure 9. Adjustable Voltage Regulator

9.2.1 Design Requirements

- R1 and R2 are required to set the output voltage.
- C_{ADJ} is recommended to improve ripple rejection. It prevents amplification of the ripple as the output voltage is adjusted higher.
- C_i is recommended, particularly if the regulator is not in close proximity to the power-supply filter capacitors. A 0.1-μF or 1-μF ceramic or tantalum capacitor provides sufficient bypassing for most applications, especially when adjustment and output capacitors are used.
- C_O improves transient response, but is not needed for stability.
- Protection diode D2 is recommended if C_{ADJ} is used. The diode provides a low-impedance discharge path to prevent the capacitor from discharging into the output of the regulator.
- Protection diode D1 is recommended if C_O is used. The diode provides a low-impedance discharge path to prevent the capacitor from discharging into the output of the regulator.

9.2.2 Detailed Design Procedure

V_O is calculated as shown in Equation 1. I_{ADJ} is typically 50 μA and negligible in most applications.

$$V_O = V_{REF} (1 + R_2 / R_1) + (I_{ADJ} \times R_2) \quad (1)$$

LM317

SLVS044Y – SEPTEMBER 1997 – REVISED APRIL 2020

www.ti.com

Typical Application (continued)

9.2.3 Application Curves

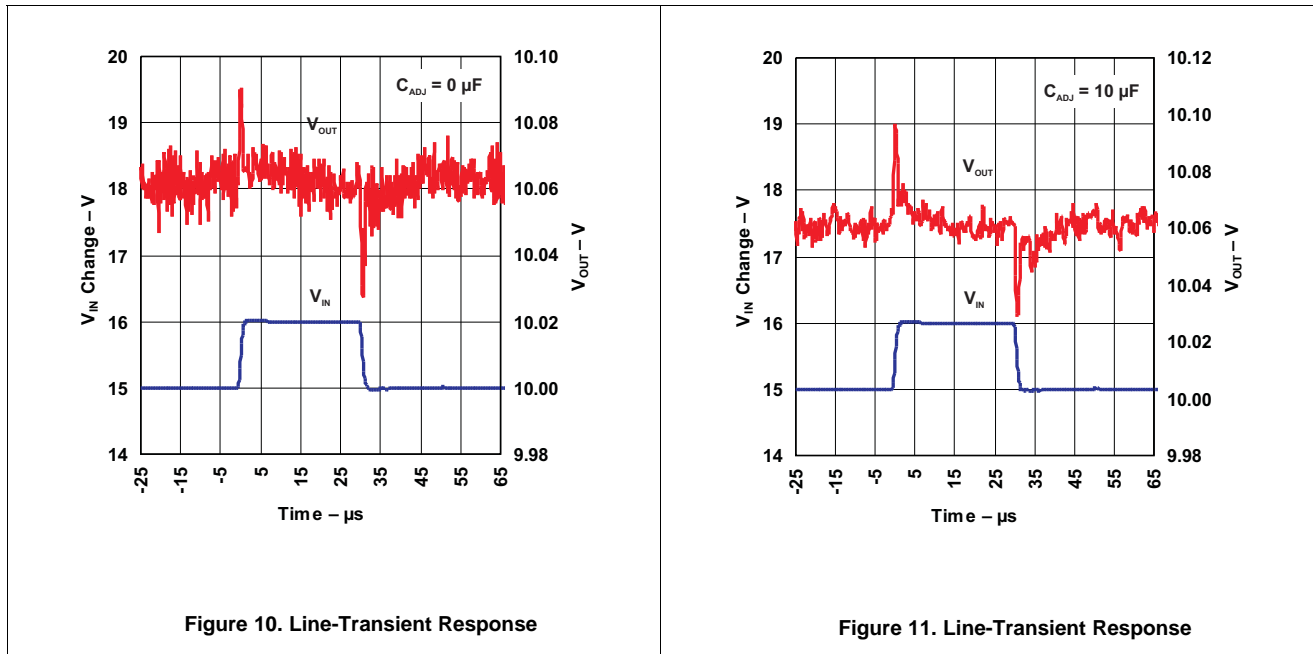


Figure 10. Line-Transient Response

Figure 11. Line-Transient Response

9.3 System Examples

9.3.1 0-V to 30-V Regulator Circuit

Here, the voltage is determined by
$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right) - 10V$$

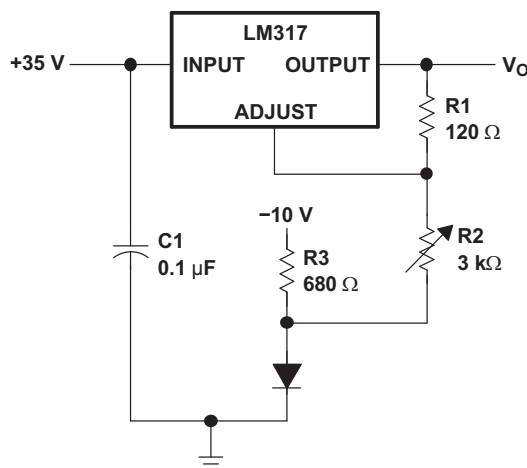


Figure 12. 0-V to 30-V Regulator Circuit

System Examples (continued)

9.3.2 Adjustable Regulator Circuit With Improved Ripple Rejection

C2 helps to stabilize the voltage at the adjustment pin, which helps reject noise. Diode D1 exists to discharge C2 in case the output is shorted to ground.

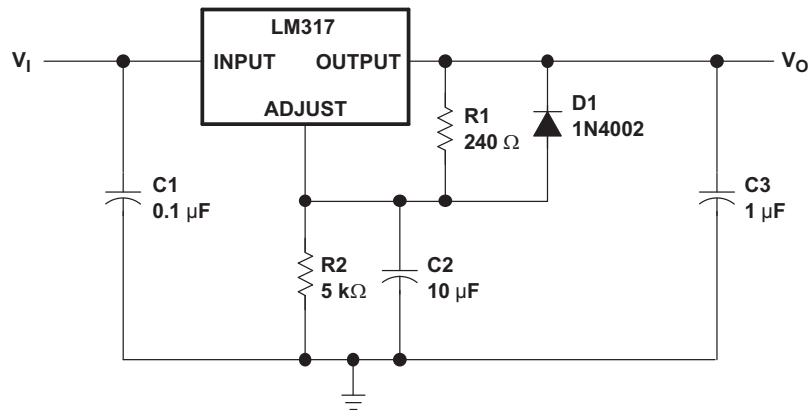


Figure 13. Adjustable Regulator Circuit with Improved Ripple Rejection

9.3.3 Precision Current-Limiter Circuit

This application limits the output current to the I_{LIMIT} in the diagram.

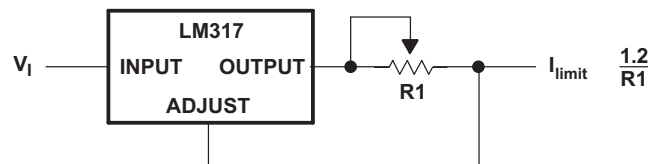


Figure 14. Precision Current-Limiter Circuit

9.3.4 Tracking Preregulator Circuit

This application keeps a constant voltage across the second LM317 in the circuit.

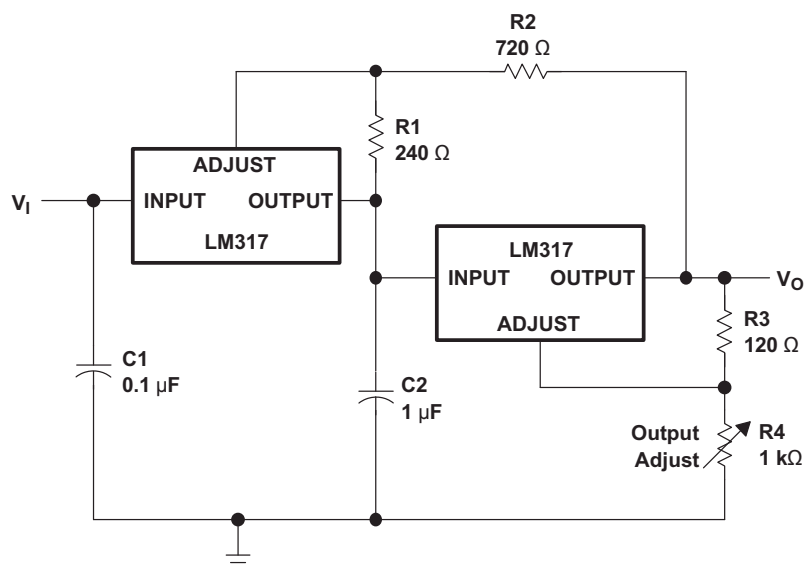


Figure 15. Tracking Preregulator Circuit

System Examples (continued)

9.3.5 1.25-V to 20-V Regulator Circuit With Minimum Program Current

Because the value of V_{REF} is constant, the value of R_1 determines the amount of current that flows through R_1 and R_2 . The size of R_2 determines the IR drop from ADJUSTMENT to GND. Higher values of R_2 translate to higher V_{OUT} .

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right) - 10 \text{ V} \quad (2)$$

$$(R_1 + R_2)_{min} = Vol_{reg(min)} \quad (3)$$

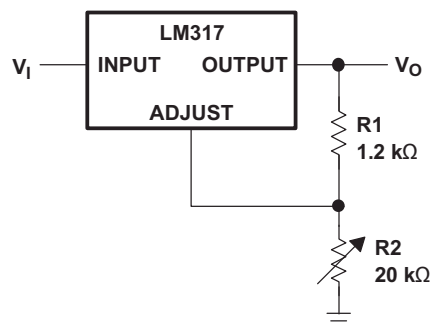


Figure 16. 1.25-V to 20-V Regulator Circuit With Minimum Program Current

9.3.6 Battery-Charger Circuit

The series resistor limits the current output of the LM317, minimizing damage to the battery cell.

$$V_{OUT} = 1.25 \text{ V} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4)$$

$$I_{OUT(short)} = \frac{1.25 \text{ V}}{R_S} \quad (5)$$

$$\text{Output Impedance} = R_S \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6)$$

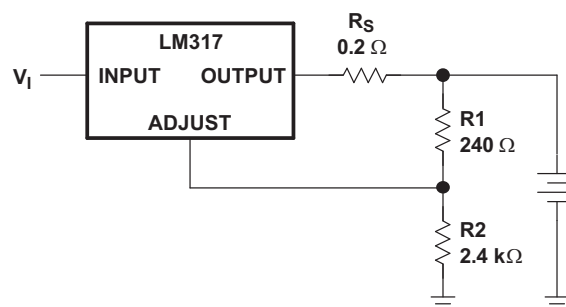


Figure 17. Battery-Charger Circuit

System Examples (continued)

9.3.7 50-mA Constant-Current Battery-Charger Circuit

The current limit operation mode can be used to trickle charge a battery at a fixed current. $I_{CHG} = 1.25 \text{ V} \div 24 \Omega$. V_I should be greater than $V_{BAT} + 4.25 \text{ V}$. (1.25 V [V_{REF}] + 3 V [headroom])

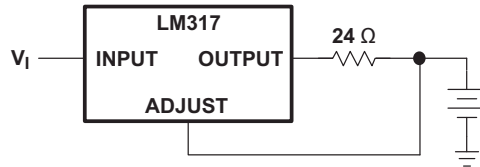


Figure 18. 50-mA Constant-Current Battery-Charger Circuit

9.3.8 Slow Turn-On 15-V Regulator Circuit

The capacitor C1, in combination with the PNP transistor, helps the circuit to slowly start supplying voltage. In the beginning, the capacitor is not charged. Therefore output voltage starts at $V_{C1} + V_{BE} + 1.25 \text{ V} = 0 \text{ V} + 0.65 \text{ V} + 1.25 \text{ V} = 1.9 \text{ V}$. As the capacitor voltage rises, V_{OUT} rises at the same rate. When the output voltage reaches the value determined by R1 and R2, the PNP will be turned off.

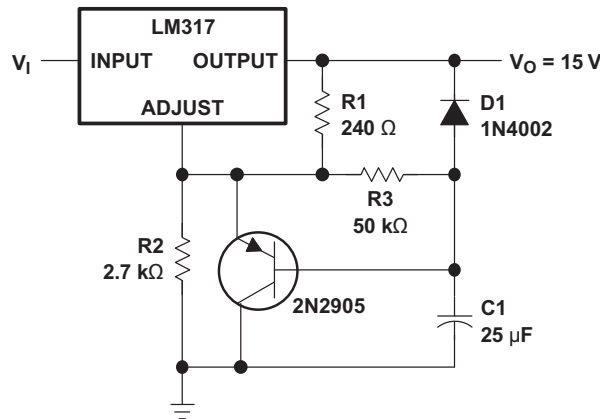


Figure 19. Slow Turn-On 15-V Regulator Circuit

9.3.9 AC Voltage-Regulator Circuit

These two LM317s can regulate both the positive and negative swings of a sinusoidal AC input.

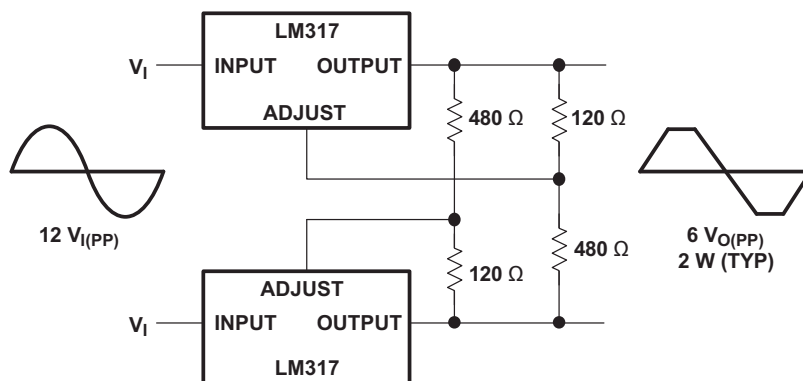


Figure 20. AC Voltage-Regulator Circuit

System Examples (continued)

9.3.10 Current-Limited 6-V Charger Circuit

As the charge current increases, the voltage at the bottom resistor increases until the NPN starts sinking current from the adjustment pin. The voltage at the adjustment pin drops, and consequently the output voltage decreases until the NPN stops conducting.

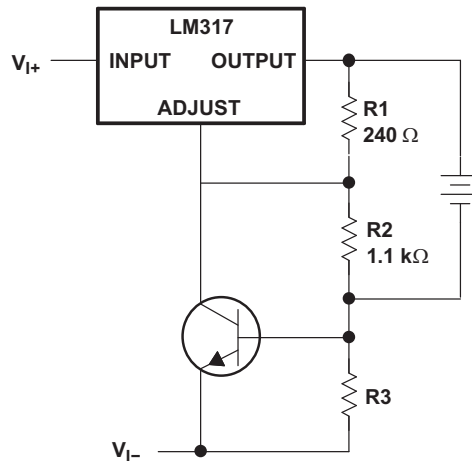


Figure 21. Current-Limited 6-V Charger Circuit

9.3.11 Adjustable 4-A Regulator Circuit

This application keeps the output current at 4 A while having the ability to adjust the output voltage using the adjustable (1.5 kΩ in schematic) resistor.

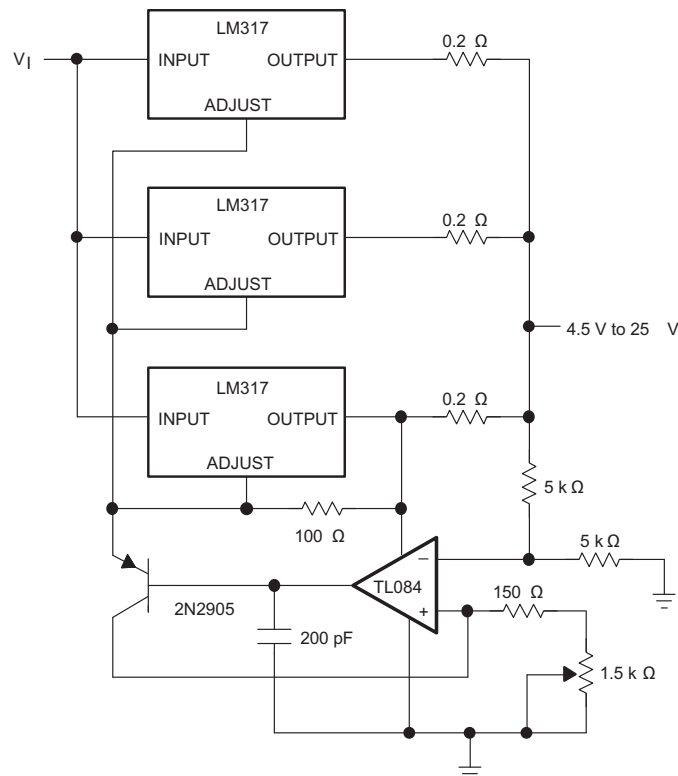


Figure 22. Adjustable 4-A Regulator Circuit

System Examples (continued)

9.3.12 High-Current Adjustable Regulator Circuit

The NPNs at the top of the schematic allow higher currents at V_{OUT} than the LM317 can provide, while still keeping the output voltage at levels determined by the adjustment pin resistor divider of the LM317.

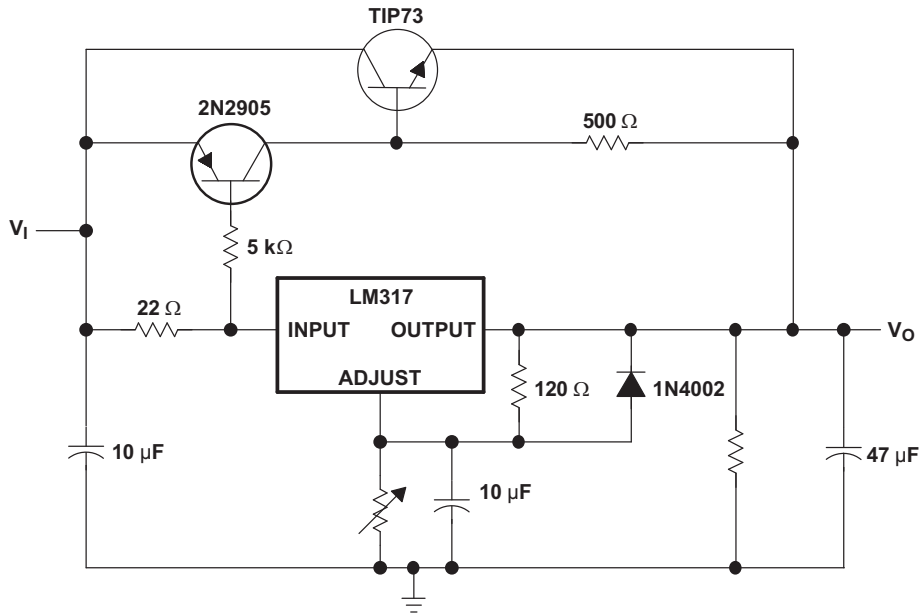


Figure 23. High-Current Adjustable Regulator Circuit

10 Power Supply Recommendations

The LM317 is designed to operate from an input voltage supply range between 1.25 V to 37 V greater than the output voltage. If the device is more than six inches from the input filter capacitors, an input bypass capacitor, 0.1 μF or greater, of any type is needed for stability.

11 Layout

11.1 Layout Guidelines

- TI recommends that the input terminal be bypassed to ground with a bypass capacitor.
- The optimum placement is closest to the input terminal of the device and the system GND. Take care to minimize the loop area formed by the bypass-capacitor connection, the input terminal, and the system GND.
- For operation at full rated load, TI recommends to use wide trace lengths to eliminate $I \times R$ drop and heat dissipation.

11.2 Layout Example

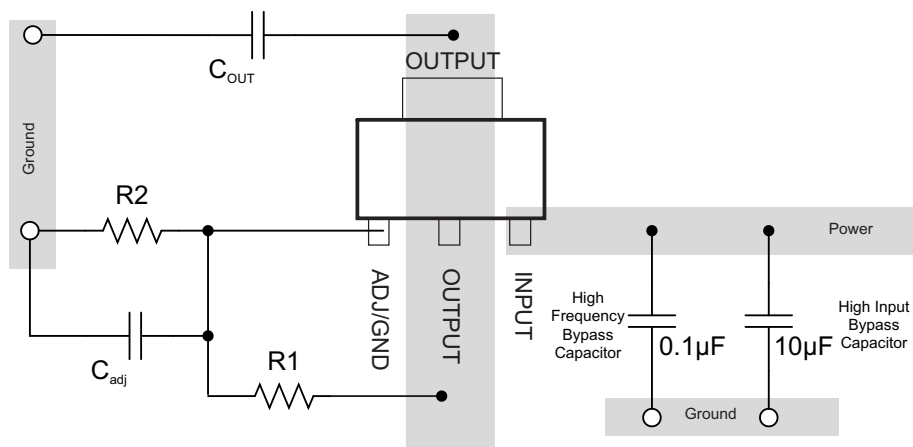


Figure 24. Layout Example

12 Device and Documentation Support

12.1 Receiving Notification of Documentation Updates

To receive notification of documentation updates, navigate to the device product folder on ti.com. In the upper right corner, click on *Alert me* to register and receive a weekly digest of any product information that has changed. For change details, review the revision history included in any revised document.

12.2 Support Resources

[TI E2E™ support forums](#) are an engineer's go-to source for fast, verified answers and design help — straight from the experts. Search existing answers or ask your own question to get the quick design help you need.

Linked content is provided "AS IS" by the respective contributors. They do not constitute TI specifications and do not necessarily reflect TI's views; see TI's [Terms of Use](#).

12.3 Trademarks

E2E is a trademark of Texas Instruments.

All other trademarks are the property of their respective owners.

12.4 Electrostatic Discharge Caution



This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

12.5 Glossary

[SLYZ022](#) — *TI Glossary*.

This glossary lists and explains terms, acronyms, and definitions.

13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information

The following pages include mechanical, packaging, and orderable information. This information is the most current data available for the designated devices. This data is subject to change without notice and revision of this document. For browser-based versions of this data sheet, refer to the left-hand navigation.

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead finish/ Ball material (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
LM317DCY	ACTIVE	SOT-223	DCY	4	80	RoHS & Green	SN	Level-2-260C-1 YEAR	0 to 125	L3	Samples
LM317DCYG3	ACTIVE	SOT-223	DCY	4	80	RoHS & Green	SN	Level-2-260C-1 YEAR	0 to 125	L3	Samples
LM317DCYR	ACTIVE	SOT-223	DCY	4	2500	RoHS & Green	SN	Level-2-260C-1 YEAR	0 to 125	L3	Samples
LM317DCYRG3	ACTIVE	SOT-223	DCY	4	2500	RoHS & Green	SN	Level-2-260C-1 YEAR	0 to 125	L3	Samples
LM317KCS	ACTIVE	TO-220	KCS	3	50	RoHS & Green	SN	N / A for Pkg Type	0 to 125	LM317	Samples
LM317KCS E3	ACTIVE	TO-220	KCS	3	50	RoHS & Green	SN	N / A for Pkg Type	0 to 125	LM317	Samples
LM317KTTR	ACTIVE	DDPAK/ TO-263	KTT	3	500	RoHS & Green	SN	Level-3-245C-168 HR	0 to 125	LM317	Samples
LM317KTTRG3	ACTIVE	DDPAK/ TO-263	KTT	3	500	RoHS & Green	SN	Level-3-245C-168 HR	0 to 125	LM317	Samples

(1) The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

(2) **RoHS:** TI defines "RoHS" to mean semiconductor products that are compliant with the current EU RoHS requirements for all 10 RoHS substances, including the requirement that RoHS substance do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, "RoHS" products are suitable for use in specified lead-free processes. TI may reference these types of products as "Pb-Free".

RoHS Exempt: TI defines "RoHS Exempt" to mean products that contain lead but are compliant with EU RoHS pursuant to a specific EU RoHS exemption.

Green: TI defines "Green" to mean the content of Chlorine (Cl) and Bromine (Br) based flame retardants meet JS709B low halogen requirements of <=1000ppm threshold. Antimony trioxide based flame retardants must also meet the <=1000ppm threshold requirement.

(3) MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

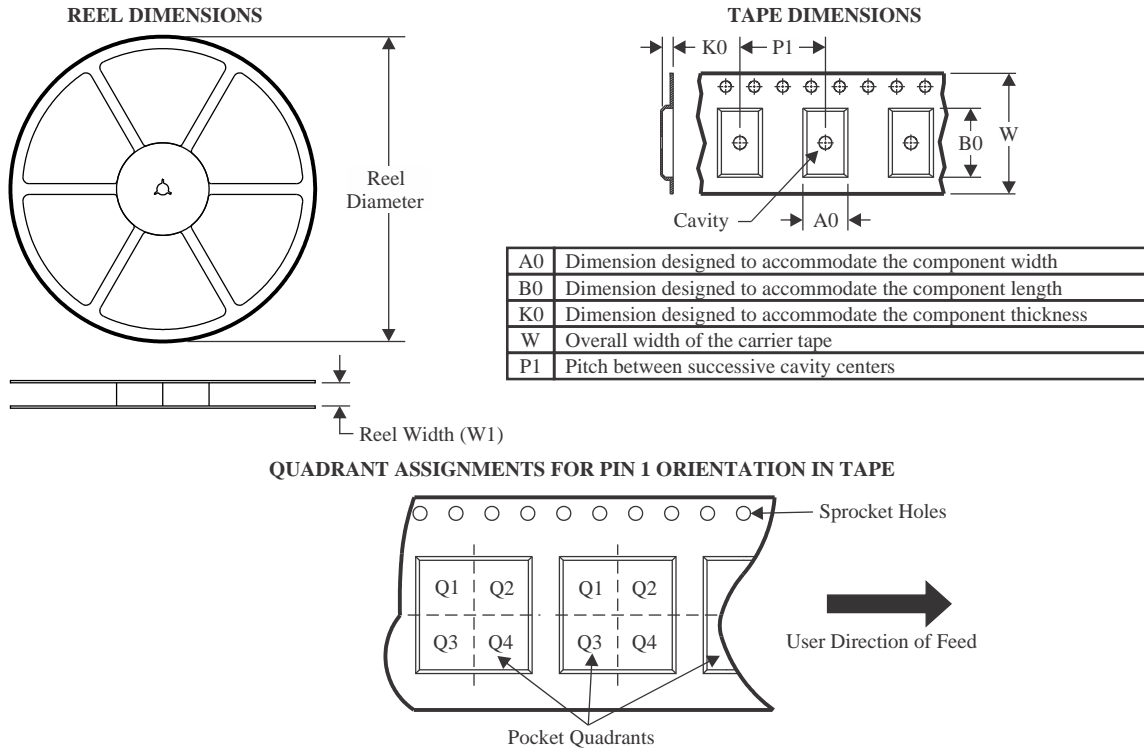
(4) There may be additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category on the device.

(5) Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "-" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

⁽⁶⁾ Lead finish/Ball material - Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

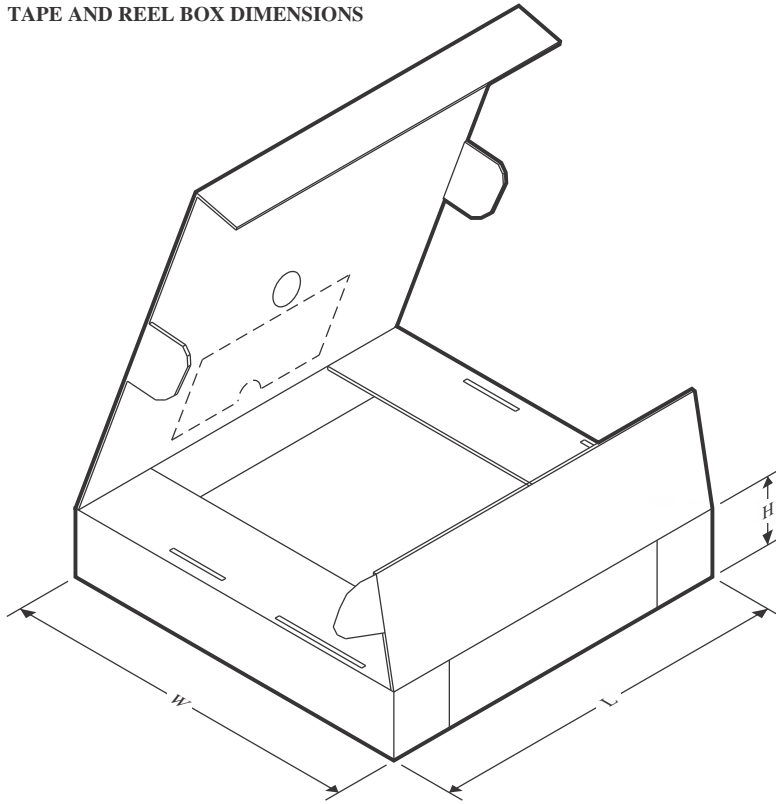
In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION


*All dimensions are nominal

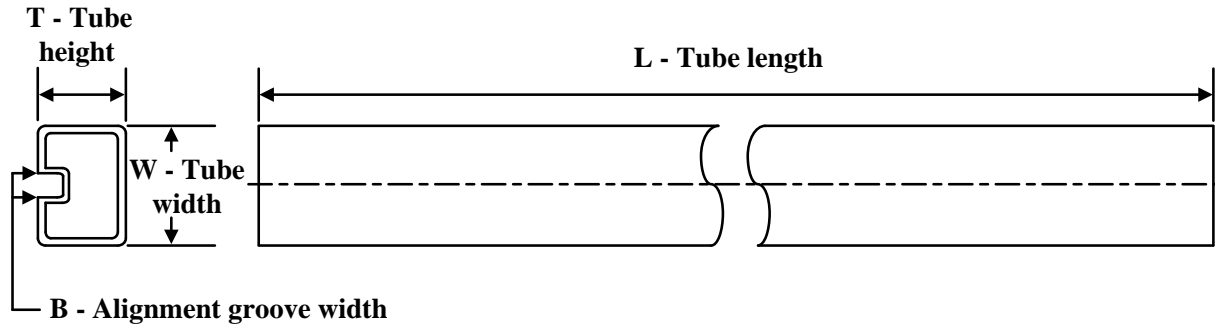
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
LM317DCYR	SOT-223	DCY	4	2500	330.0	12.4	7.05	7.4	1.9	8.0	12.0	Q3
LM317DCYR	SOT-223	DCY	4	2500	330.0	12.4	6.55	7.25	1.9	8.0	12.0	Q3
LM317KTTR	DDPAK/ TO-263	KTT	3	500	330.0	24.4	10.8	16.1	4.9	16.0	24.0	Q2
LM317KTTR	DDPAK/ TO-263	KTT	3	500	330.0	24.4	10.8	16.3	5.11	16.0	24.0	Q2

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
LM317DCYR	SOT-223	DCY	4	2500	340.0	340.0	38.0
LM317DCYR	SOT-223	DCY	4	2500	336.0	336.0	48.0
LM317KTTR	DDPAK/TO-263	KTT	3	500	350.0	334.0	47.0
LM317KTTR	DDPAK/TO-263	KTT	3	500	340.0	340.0	38.0

TUBE


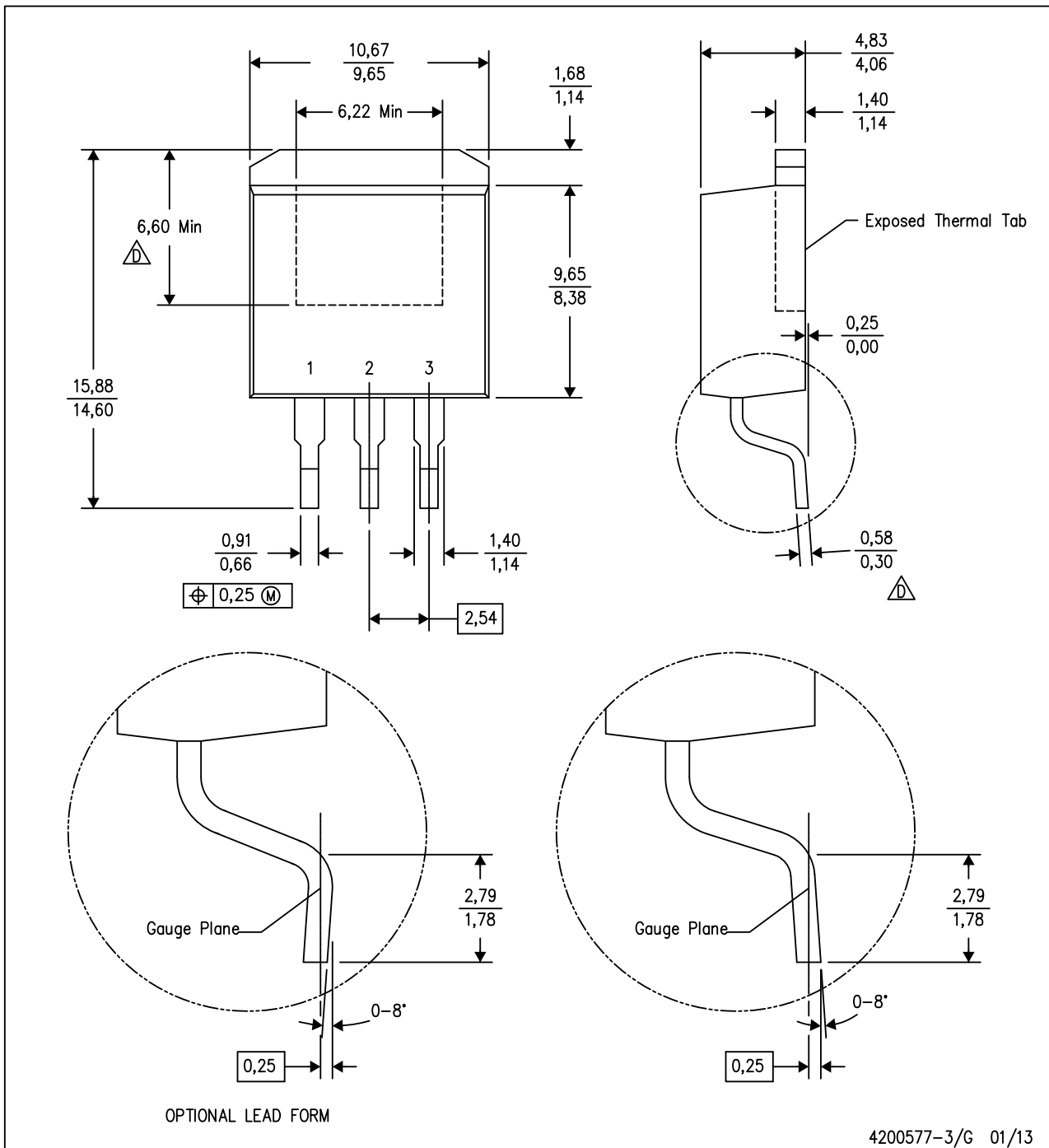
*All dimensions are nominal

Device	Package Name	Package Type	Pins	SPQ	L (mm)	W (mm)	T (μm)	B (mm)
LM317DCY	DCY	SOT-223	4	80	559	8.6	500	3.6
LM317DCY	DCY	SOT-223	4	80	542.9	8.6	3606	2.67
LM317DCYG3	DCY	SOT-223	4	80	559	8.6	500	3.6
LM317DCYG3	DCY	SOT-223	4	80	542.9	8.6	3606	2.67
LM317KCS	KCS	TO-220	3	50	532	34.1	700	9.6
LM317KCS	KCS	TO-220	3	50	532	34.1	700	9.6
LM317KCSE3	KCS	TO-220	3	50	532	34.1	700	9.6
LM317KCSE3	KCS	TO-220	3	50	532	34.1	700	9.6

MECHANICAL DATA

KTT (R-PSFM-G3)

PLASTIC FLANGE-MOUNT PACKAGE

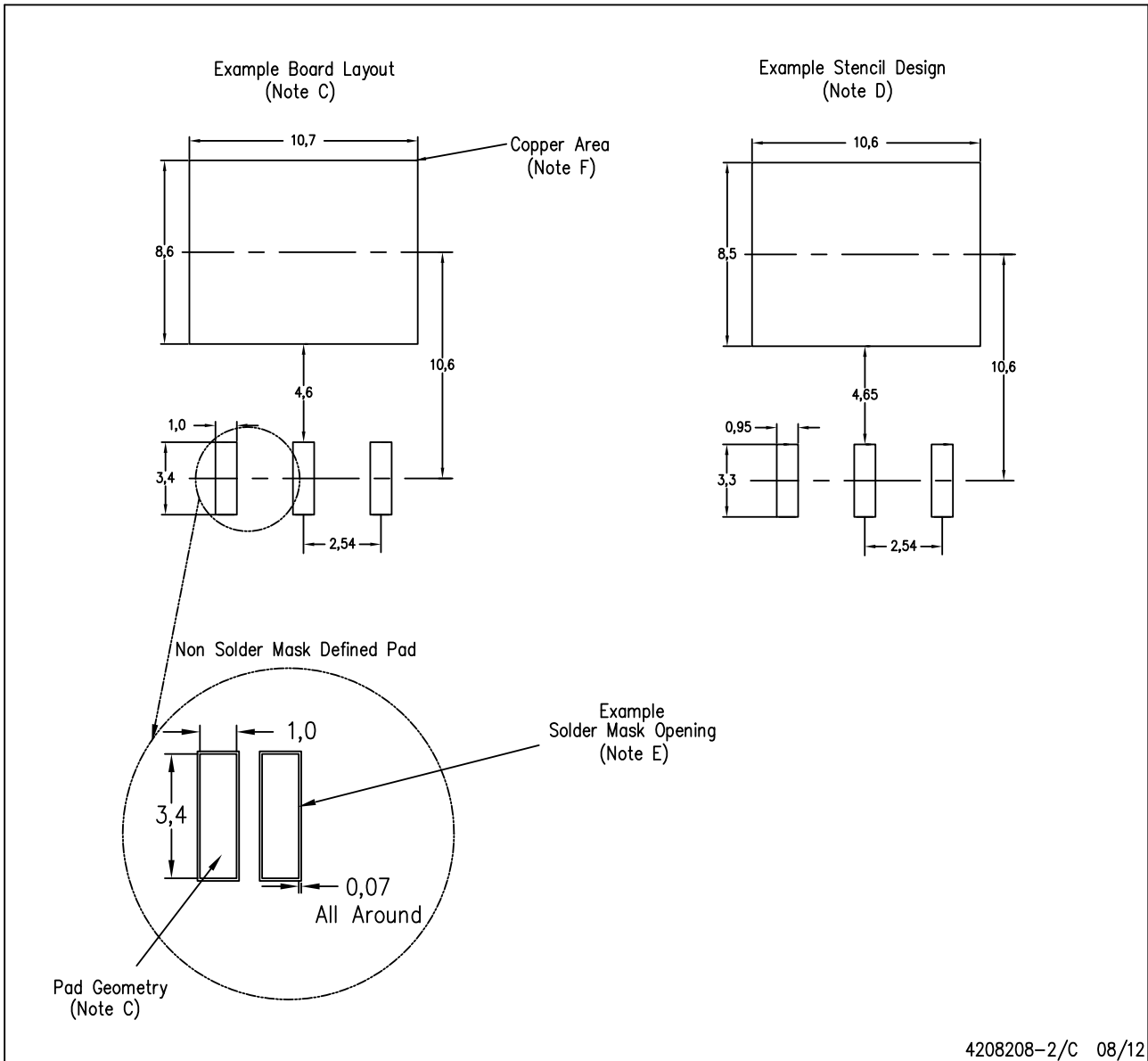


- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion. Mold flash or protrusion not to exceed 0.005 (0,13) per side.
 - \triangle Falls within JEDEC TO-263 variation AA, except minimum lead thickness and minimum exposed pad length.

LAND PATTERN DATA

KTT (R-PSFM-G3)

PLASTIC FLANGE-MOUNT PACKAGE



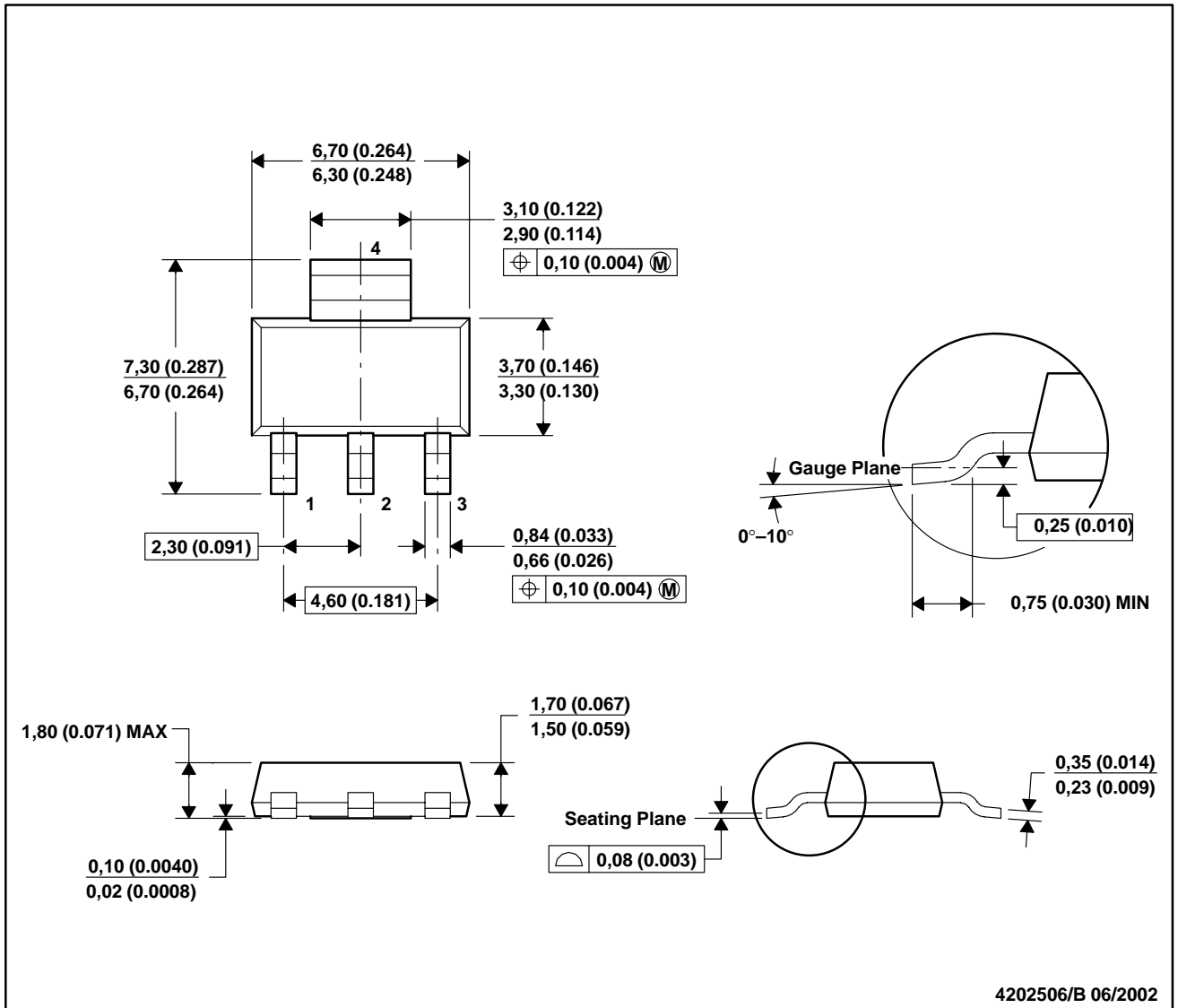
- NOTES:
- All linear dimensions are in millimeters.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Publication IPC-SM-782 is recommended for alternate designs.
 - Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525.
 - Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.
 - This package is designed to be soldered to a thermal pad on the board. Refer to the Product Datasheet for specific thermal information, via requirements, and recommended thermal pad size. For thermal pad sizes larger than shown a solder mask defined pad is recommended in order to maintain the solderable pad geometry while increasing copper area.

MECHANICAL DATA

MPDS094A – APRIL 2001 – REVISED JUNE 2002

DCY (R-PDSO-G4)

PLASTIC SMALL-OUTLINE



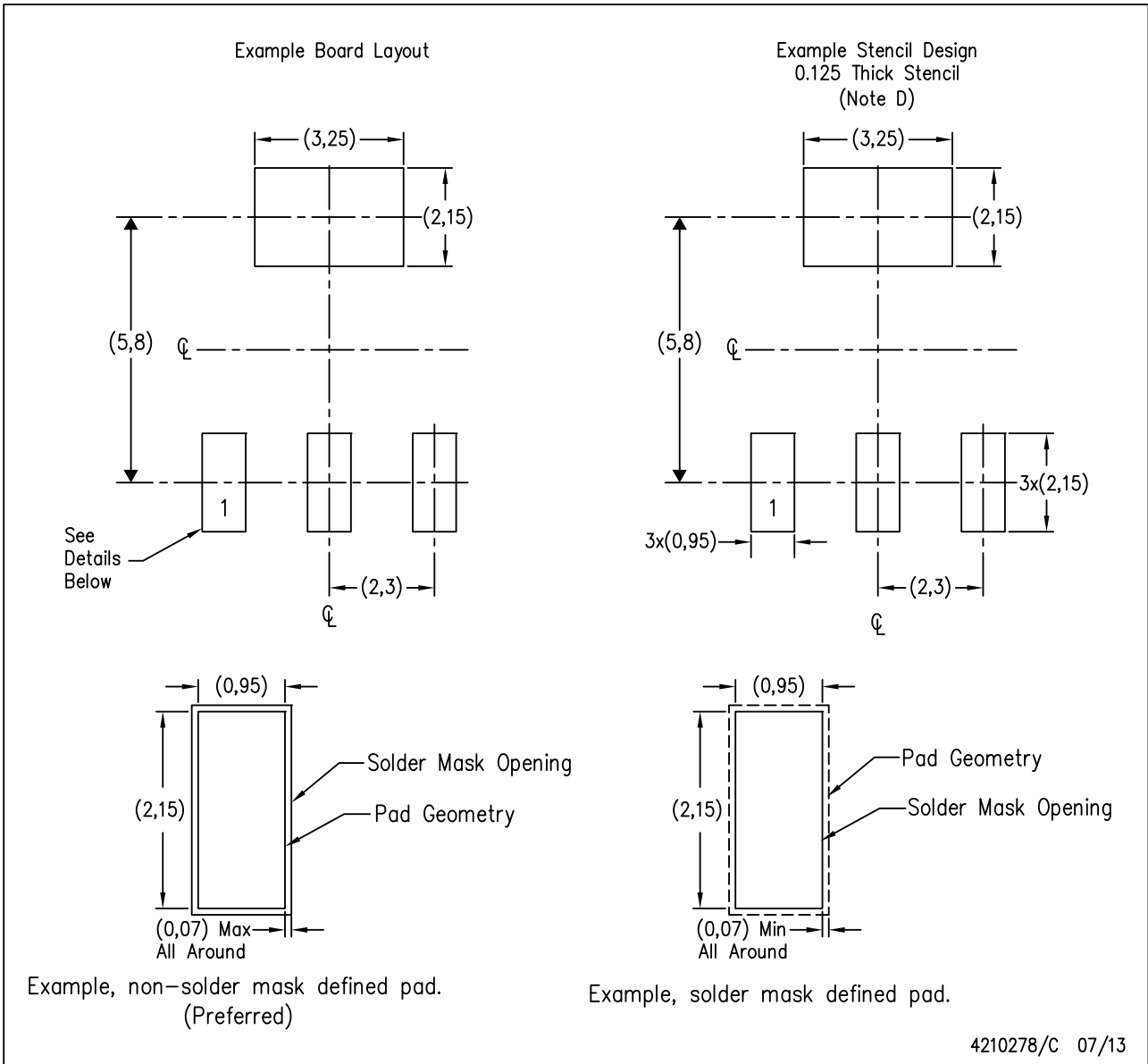
- NOTES: A. All linear dimensions are in millimeters (inches).
 B. This drawing is subject to change without notice.
 C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion.
 D. Falls within JEDEC TO-261 Variation AA.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

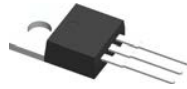
DCY (R-PDSO-G4)

PLASTIC SMALL OUTLINE



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Publication IPC-7351 is recommended for alternate designs.
 - D. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil recommendations. Refer to IPC 7525 for stencil design considerations.

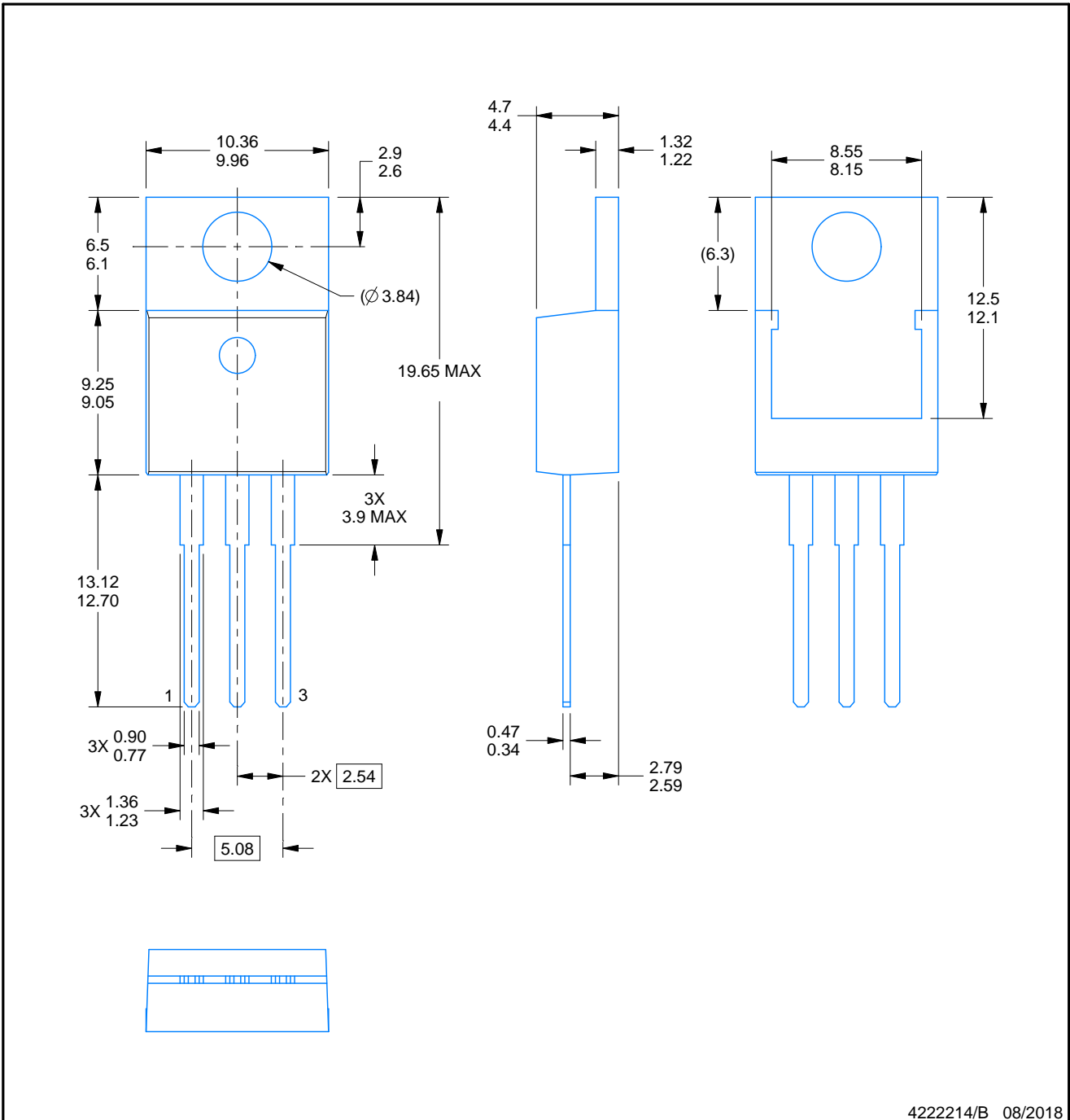
KCS0003B



PACKAGE OUTLINE

TO-220 - 19.65 mm max height

TO-220



4222214/B 08/2018

NOTES:

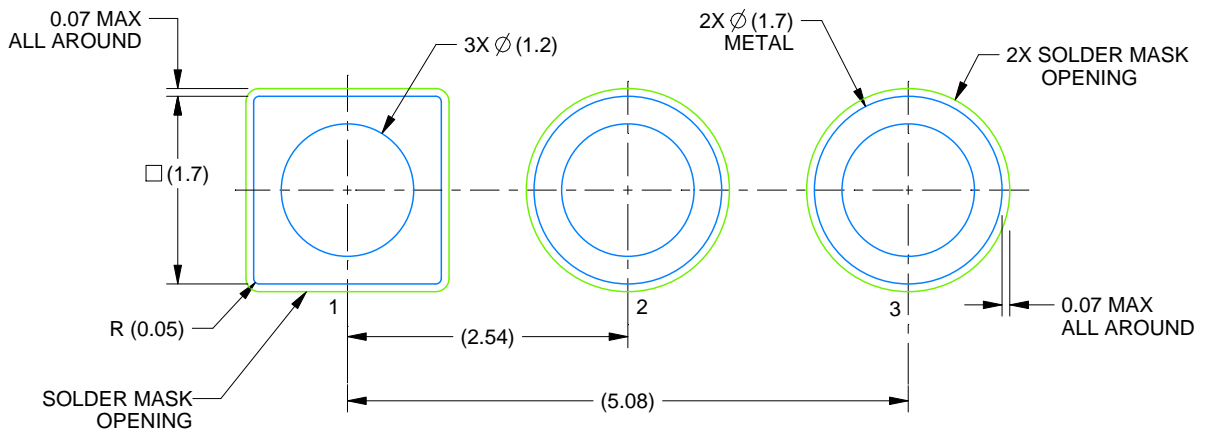
1. Dimensions are in millimeters. Any dimension in brackets or parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.
3. Reference JEDEC registration TO-220.

EXAMPLE BOARD LAYOUT

KCS0003B

TO-220 - 19.65 mm max height

TO-220



LAND PATTERN EXAMPLE
NON-SOLDER MASK DEFINED
SCALE:15X

4222214/B 08/2018

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated



Résumé

La récupération d'énergie ambiante est devenue en quelques décennies un axe de recherche et de développement majeur, car elle permet de transformer une énergie vibratoire en électricité. Il existe plusieurs techniques de transduction permettant la récupération d'énergie, allant de l'échelle industrielle à petite échelle, c'est justement cette dernière qui nous intéresse. Ainsi, l'objectif de ce travail est de concevoir un système de récupération d'énergie de petites dimensions, faible coût, simple à réaliser et permettant de récupérer l'énergie provenant de la marche de l'être humain. Pour cela, nous nous basons sur trois piézo buzzer piézoélectriques placés sur des endroits bien déterminés sur une semelle de chaussure. Un circuit permettant le redressement, le filtrage, la régulation et la charge d'une batterie est couplé aux trois piézo buzzers, assurant ainsi toutes les étapes nécessaires à la récupération d'énergie. Les résultats obtenus sont très prometteurs. Nous avons ainsi pu récupérer une tension de 3 mV en faisant 260 pas. Ces résultats, même s'ils sont relativement faibles, sont très prometteurs et ont permis de poser les premières pierres d'un projet qui peut être mené à prendre de l'ampleur et donner de meilleurs résultats à l'avenir.

Mots clés : Récupération d'énergie, Piézo buzzer, Piézoélectrique, Comsol Multiphysics, Redressement.



Abstract

In the span of just a few decades, ambient energy harvesting has become a major area of research and development, as it enables vibratory energy to be converted into electricity. There are several transduction techniques for energy harvesting, ranging from industrial to small-scale, and it is the latter that interests us. The aim of this work is to design an energy harvesting system that is small, low-cost, simple to manufacture, and capable of recovering energy from human walking. To achieve this, we utilize three piezoelectric buzzers placed at specific points on the sole of a shoe. The three piezo buzzers are coupled to a circuit that rectifies, filters, regulates and charges a battery, thus ensuring all the necessary steps for energy harvesting. The results obtained are very promising. We were able to recover a voltage of 3 mV in 260 steps on battery. These results, although relatively low, are very promising and have laid the foundations for a project that can be scaled up and deliver better results in the future.

Keywords : Energy harvesting, Piezo buzzer, Piezoelectric, Comsol Multiphysics, rectification.

المخلص

في غضون عقود قليلة، أصبح استرداد الطاقة المحيطة مجالاً رئيسياً للبحث والتطوير، حيث يتيح تحويل الطاقة الاهتزازية إلى طاقة كهربائية. هناك العديد من تقنيات التحويل لاسترداد الطاقة، بدءاً من النطاق الصناعي إلى النطاق الصغير، وهذه الأخيرة هي التي تهتمنا. الهدف من هذا العمل هو تصميم نظام لاستعادة الطاقة يكون صغير الحجم ومنخفض التكلفة وسهل البناء وقادر على استعادة الطاقة من المشي البشري. ولتحقيق ذلك، اعتمدنا في تصميمنا على ثلاثة أجهزة طنين كهروضغطية موضوعة في نقاط محددة على نعل الحذاء. وتقترن دائرة لتصحيح وتصفية وتنظيم وشحن البطارية بالطنان الثلاثة التي تعمل بالبيزو لضمان جميع المراحل اللازمة لاستعادة الطاقة. النتائج واعدة للغاية. فقد تمكنا من استرداد جهد 3 مللي فولت من خلال 260 خطوة. على الرغم من أن هذه النتائج منخفضة نسبياً، إلا أنها واعدة جداً ومكنتنا من وضع أسس مشروع يمكن توسيعه لإعطاء نتائج أفضل في المستقبل.

الكلمات المفتاحية : استعادة الطاقة، جرس بيزو، كهروضغطية، كومسول متعدد الفيزياء، التصحيح.