

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option CONSTRUCTION MECANIQUE

Présenté par :

ALLAL Ali & BENDJOUDI Abdelhak

Thème

Conception et réalisation d'un Système de génération d'énergie piézoélectrique

Soutenu le Septembre 2025 devant le jury composé de

ZAOUI Moussa

Professeur

Président

BENHAMADOUCHE Lamia

MCA

Encadrant

MEZAACHE Hatem

MAA

Co-encadrant

GHADBANE Tahar

MAA

Examineur

MOUSSA Mohamed El Amine

MCB

**Représentant de
l'incubateur**

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier « ALLAH » Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience de finir ce travail.

Ce travail a été accompli sous la supervision de Dr. Benhamadouche Lamia et Mr. Mezaache Hatem, nous leurs exprimons notre gratitude et nous les remercions chaleureusement pour leurs aides précieuses et leurs disponibilités et leurs conseils.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait, en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous remercions l'ingénieur Mr. Gherbi Nouredine pour ses aides pendant la période de notre stage pratique.

Un grand merci à nos familles d'avoir toujours été présentes.

Nous exprimons nos sincères remerciements à nos frères, amis, collègues, enseignants et professeurs qui nous ont soutenus tout au long de notre parcours académique, que ce soit de près ou de loin.

Ali & Abdelhak

Dédicaces

*Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai pu achever ce
modeste travail que je dédie :*

*A mon très cher père qui a toujours garni mes chemins
avec force et lumière.*

*A ma tendre mère la plus belle perle du monde. Pour sa
patience, son amour, son soutien et ses
encouragements.*

A mes frères que j'aime beaucoup

A mes amis pour une sincérité si merveilleuse.

*A toute personne qui nous a aidé à franchir les
difficultés dans la vie.*

Allal Ali

اهداء

من قال أنا لها . . . نالها

وأنا لها وان أبت رغما عنها أتيت بها

وصلت رحلتي الجامعية الى نهايتها بعد تعب ومشقة ،لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون
،لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق محفوفا بالتسهيلات لكنني فعلتها ونلتها ،وما كنت
أفعل لولا فضل الله فالحمد لله عند البدء وعند الختام.

إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب ،من دعمني بلا حدود وأعطى بلا مقابل إلى من علمني
أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة ،داعمي الأول في مسيرتي وسندي وقوتي وملأذي
بعد الله والدي.

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضني قلبها قبل يدها وسهلت لي الشدائد بدعائها إلى
التي ساندتني ووقفت بجانبتي وقدمت لي الدعم لمواصلة طريقي والدي.
إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي ،إلى من شددت عضدي بهم فكانوا لي ينباع أرتوي منهم
اخوتي.

لكل من كان عوننا وسندا في هذه الطريق ،للأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين وأصحاب
الشدائد والأزمات.

إلى أساتذتي الكرام ممن لم يتوانوا في مد يد العون لنا . . يا من صنعتم لنا المجد.
أهديكم تخرجي وفرحتي وثمره نجاحي الذي لطالما تمنيته . . ها أنا اليوم أتممت أول
ثمراته بفضل من الله عز وجل فالحمد لله على ما وهبني ،وانطوى الدرب بما حوى
من الثقال .

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Fondements de la piézoélectricité et applications aux énergies renouvelables

I. 1. Introduction.....	3
I. 2. Types de matériaux piézoélectriques	3
I. 2. 1. Matériaux piézoélectrique naturelles	3
1. 2. 1. 1. Quartz	3
I. 2. 1. 2. Topaze	4
I. 2. 1. 3. Les caractéristiques des matériaux naturelles	4
I. 2. 2. Matériaux piézoélectrique synthétiques	5
I. 2. 2. 1. Céramiques Piézoélectriques	5
I. 2. 2. 2. Polymères Piézoélectriques	6
I. 2. 2. 3. Matériaux Composites	7
I. 2. 2. 4. Matériaux Moléculaires	8
I. 2. 2. 5. Méthodes de Synthèse	8
I. 2. 2. 6. Applications et Perspectives	9
I. 2. 3. Matériaux électroactifs	10
I. 3. Mécanismes de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	11
I. 3. 1. L'induction électromagnétique :	11
I. 3. 2. Effet piézoélectrique	12
I. 3. 3. Effet triboélectrique.....	12
I. 3. 4. Thermoélectricité.....	13
I. 4. Applications de l'Énergie Piézoélectrique dans les Énergies Renouvelables	13
I. 4. 1. Secteur automobile et infrastructures urbaines.....	13
I. 4. 2. Vêtements et textile intelligent.....	14
I. 5. Intégration de l'énergie piézoélectrique dans les systèmes énergétiques renouvelables... 15	15
I. 5. 1. Récupération d'Énergie Vibratoire.....	15
I. 5. 2. Récupération d'énergie acoustique	16
I. 5. 3. Récupération d'énergie par vibrations induites par les fluides	16

I. 5. 4. Récupération d'Énergie Humaine.....	17
I. 5. 4. 1. La chaleur corporelle.....	17
I. 5. 4. 2. Le souffle.....	17
I. 5. 4. 3. La marche.....	17
I. 6. Avantages et Limites de l'Énergie Piézoélectrique.....	18
I. 6. 1. Avantages.....	18
I. 6. 2. Limites.....	19
I. 7. Conclusion.....	19

Chapitre II

Pression Mécanique, Récupération d'Énergie Vibratoire et Application aux Pavés Intelligents

II. 1. Introduction.....	22
II. 2. Contexte et motivation.....	22
II. 3. Objectifs de l'étude.....	23
II. 2. Fondements Théoriques de la Piézoélectricité.....	23
II. 2. 1. Historique et principe physique.....	23
II. 2. 2. Équations constitutives.....	24
II. 2. 3. Caractérisation des matériaux.....	24
II. 3. Méthodes de Transduction Électromécanique.....	25
II. 3. 1. Transduction piézoélectrique.....	25
II. 3. 2. Transduction électromagnétique.....	26
II. 3. 3. Transduction électrostatique.....	27
II. 3. 4. Comparaison des méthodes de transduction.....	27
II. 4. Matériaux piézoélectriques pour la récupération d'énergie.....	28
II. 4. 1. Propriétés et performances.....	29
II. 4. 2. Comparaison des Propriétés et Performances.....	29
II. 4. 1. 1. Matériaux à base de plomb (PZT).....	29
II. 4. 1. 2. Matériaux sans plomb.....	30
II. 5. Systèmes de pavés intelligents.....	31
II. 5. 1. Architecture et conception.....	31
II. 5. 1. 1. Composants architecturaux principaux.....	31
II. 5. 1. 2. Contraintes de conception.....	32
II. 5. 2. Modélisation mécanique.....	32
II. 5. 2. 1. Modélisation par éléments finis.....	32
II. 5. 2. 2. Paramètres critiques.....	32
II. 5. 2. 3. Relations fondamentales.....	32
II. 5. 3. Circuits d'interface électronique.....	33
II. 5. 4. Optimisation énergétique.....	33
II. 5. 4. 1. Stratégies d'optimisation.....	33

II. 5. 4. 2. Optimisation structurelle :	34
II. 5. 4. 3. Gestion intelligente :	34
II. 6. Applications et Performances	34
II. 6. 1. Études de cas industriels	34
II. 6. 2. Analyse comparative des technologies	36
II. 6. 3. Défis techniques et économiques	37
II. 6. 3. 1 Défis techniques :	37
II. 6. 3. 2. Défis économiques :	37
II. 6. 4. Perspectives d'avenir	38
II. 6. 4. 1. Innovations matériaux :	38
II. 6. 4. 2. Applications émergentes :	38
II. 7. Conclusion	39

Chapitre III

Conception et Réalisation

III. 1. Introduction	42
III. 2. Outils de Conception - SolidWorks	42
III. 2. 1. Présentation de SolidWorks	42
III. 2. 2. Fonctionnalités principales	42
III. 2. 3. Bonnes pratiques de conception	43
III. 3. Conception du Système Piézoélectrique (Pavé Intelligent)	44
III. 3. 1. Architecture du Système	44
III. 3. 2. Composants du système	44
III. 3. 2. 1. Composants structurels	44
III. 3. 2. 2. Composants électroactifs	44
III. 3. 2. 3. Composants énergétiques et de signalisation	44
III. 3. 3. Conception 3D sous SolidWorks	44
III.3.4. Spécifications techniques des composants	46
III. 3. 5. Dessin de définition des pièces	48
III. 3. 6. Méthodologie d'assemblage	52
III. 3. 7. Présentation d'assemblages du pavé intelligent en 3D sous-SolidWorks	53
III. 3. 8. Principe de fonctionnement optimisé	53
III. 4. Caractéristiques Techniques Détaillées	54
III. 4. 1. Pavé en béton	54
III. 4. 1. 1. Composition optimisée	54
III. 4. 1. 2. Propriétés mécaniques [60]	54
III. 4. 1. 3. Propriétés physiques	54
III. 4. 2. Plaque de polyuréthane [61]	54
III. 4. 2. 1. Propriétés mécaniques	54
III. 4. 2. 2. Propriétés physiques	54

III. 4. 2. 3. Propriétés électriques.....	55
III. 5. Réalisation du Prototype	55
III. 5. 1. Méthodologie de fabrication.....	55
III. 5. 1. 1. Phase de modélisation.....	55
III. 5. 1. 2. Phase de fabrication des composants	55
III. 5. 1. 3. Phase d'assemblage.....	55
III. 5. 2. Validation expérimentale.....	57
III. 5. 2. 2. Tests de génération d'énergie	58
III. 5. 2. 3. Validation du système complet	58
III. 6. Perspectives d'amélioration et optimisation	59
III. 6. 1. Optimisations techniques identifiées	59
III. 6. 2. Intégration dans l'infrastructure urbaine	59

Chapitre IV

Évaluation de la performance énergétique du modèle expérimental et analyse des résultats en environnement réel

IV. 1. Introduction.....	61
IV. 2. Analyse approfondie de l'influence des paramètres physiques	61
IV. 2. 1. Analyse statistique de l'influence du poids.....	61
IV. 2. 2. Caractérisation électrique et résistance interne	62
IV. 2. 3. Prédictions pour des charges étendues	62
IV. 3. Optimisation des paramètres de fonctionnement	62
IV. 3. 1. Influence du nombre de pas et fréquence.....	62
IV. 3. 2. Analyse comparative des conditions expérimentales	62
IV. 4. Étude prévisionnelle avancée - Faculté de Technologie de M'Sila	62
IV. 4. 1. Méthodologie d'estimation raffinée	63
IV. 4. 1. Applications énergétiques concrètes.....	63
IV. 5. Analyse comparative avec les technologies existantes	64
IV. 5. 1. Matériaux piézoélectriques performants.....	64
IV. 5. 2. Benchmarking international.....	64
IV. 6. Optimisations techniques recommandées	64
IV. 6. 1. Améliorations de conception mécanique	64
IV. 6. 2. Innovations dans les matériaux	64
IV. 6. 3. Circuits de conditionnement avancés	64
IV. 7. Analyse environnementale et durabilité.....	65
IV. 7. 1. Impact environnemental.....	65
IV. 7. 2. Intégration urbaine	65
IV. 8. Analyse économique détaillée.....	65
IV. 8. 1. Coûts et retour sur investissement.....	65
IV. 8. 2. Modèle économique alternatif	65

IV. 9. Perspectives d'extension et applications futures	65
IV. 9. 1. Intégration dans des écosystèmes énergétiques	65
IV. 9. 2. Applications émergentes	65
IV. 10. Recommandations stratégiques	66
IV. 10. 1. Phase de développement immédiate	66
IV. 10. 2. Déploiement à moyen terme	66
IV. 10. 3. Vision à long terme	66
IV. 11. Conclusion.....	66
<i>Conclusion générale</i>	69
Perspectives.....	70
Références bibliographiques	71
Résumé	

Liste des figures

Figure I. 1. Structure cristalline PZT.....	6
Figure I. 2. Céramiques PZT.....	6
Figure I. 3. Structure moléculaire du PVDF.....	7
Figure I. 4. Composite piézoélectrique 1-3.....	8
Figure I. 5. Principe de l'effet piézoélectrique direct et inverse	12
Figure I. 6. Première route piézoélectrique.....	14
Figure I. 7. Prototype des vêtements piézoélectrique.....	15
Figure I. 8. Sources potentielles d'énergie du corps humain.....	18
Figure II. 1. Coefficients piézoélectriques d33 des principaux matériaux utilisés pour la récupération d'énergie.....	25
Figure II. 2. Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité	26
Figure II. 3. Effet piézoélectrique direct et inverse.....	26
Figure II. 4. Schéma architectural d'un système de pavé piézoélectrique intelligent.....	31
Figure II. 5. Installation de dalles Pavegen sur une allée piétonne.....	34
Figure II. 6. Voies ferrées piézoélectriques récupèrent l'énergie produite par le passage des trains..	35
Figure II. 7. Comparaison des performances énergétiques des principaux systèmes de pavés piézoélectriques.....	36
Figure II. 8. Illustrations de la récupération d'énergie piézoélectrique (vision d'avenir).....	39
Figure III. 1. Logo SOLIDWORKS [58].....	43
Figure III. 2. Modèle 3D complet du pavé intelligent sous SolidWorks	45
Figure III. 3. Plans de définition des composants principaux.....	51
Figure III. 4. Séquence d'assemblage virtuel	52
Figure III. 5. Assemblage (1) (Pièce 1 + Pièce 2).....	53
Figure III. 6. Composants réels du prototype.....	56
Figure III. 7. Assemblage de pavé et piézoélectrique	57
Figure III. 8. Assemblage de pavé et plaque du polyuréthane.....	57
Figure III. 9. Prototype final assemblé.....	58

Liste des tableaux

Tableau II. 1. Comparaison des Méthodes de Transduction.....	28
Tableau II. 2. Tableau récapitulatif et comparatif des propriétés des différents types de matériaux piézoélectriques pour la récupération d'énergie.	30
Tableau IV. 1. Influence du poids sur l'énergie produite	61

Introduction générale

Introduction générale

Le présent mémoire s'inscrit dans le contexte de la transition énergétique et explore la conversion de pressions et vibrations mécaniques en électricité via des matériaux piézoélectriques, avec un focus applicatif sur des pavés intelligents capables de récupérer l'énergie du trafic piétonnier et urbain. Cette thématique répond à un double enjeu scientifique et sociétal en proposant une alimentation locale et durable pour des dispositifs électroniques et capteurs d'infrastructure, là où l'accès au réseau est contraint et où l'autonomie énergétique devient stratégique pour les villes intelligentes.

La problématique centrale consiste à transformer une énergie mécanique diffuse et souvent perdue en une électricité utile, stable et stockable, en maîtrisant le couplage électromécanique des matériaux, l'architecture mécanique des pavés et l'électronique d'interface pour maximiser le rendement global du système. Pour y répondre, la démarche adoptée combine un cadre théorique consolidé sur les matériaux piézoélectriques, une étude bibliographique des solutions de récupération vibratoire pour chaussées et dalles, puis une phase de conception et réalisation d'un prototype de pavé intelligent validé par des essais fonctionnels.

Les objectifs du mémoire sont les suivants : établir les fondements de la piézoélectricité et des mécanismes de conversion d'énergie afin de circonscrire les avantages et limites des différentes familles de matériaux ; analyser les architectures, circuits et stratégies d'optimisation pour la récupération d'énergie appliquée aux pavés ; concevoir, modéliser et assembler un prototype intégrant capteurs piézoélectriques, conditionnement, stockage et signalisation. L'originalité de l'approche tient à l'intégration "système" couplant choix matériaux, design mécanique, CAO/FAO et électronique de puissance, visant une solution robuste et intégrable aux infrastructures urbaines.

Ce travail débute par une analyse approfondie des principes fondamentaux de la piézoélectricité, des matériaux associés (du quartz naturel aux composites polymères et céramiques avancés), et des mécanismes physiques de conversion d'énergie. Il met en lumière le potentiel et les limites de cette technologie dans le paysage des énergies renouvelables, ainsi que l'intégration croissante des capteurs piézoélectriques dans les infrastructures urbaines et les objets connectés.

Le second chapitre propose une étude bibliographique exhaustive sur les mécanismes de récupération d'énergie vibratoire, en se concentrant sur l'application aux pavés intelligents. Les architectures de transduction piézoélectrique, les performances des matériaux, les défis

Introduction générale

techniques, l'optimisation des systèmes et les retours d'expérience industrielle sont analysés. Cette partie permet de comprendre les avancées, les contraintes, mais surtout les perspectives de la récupération d'énergie piézoélectrique pour les villes de demain.

Le troisième chapitre détaille la conception et la réalisation d'un prototype de pavé intelligent intégrant des transducteurs piézoélectriques. Cette étape lie modélisation, choix technologiques, assemblage, et validation expérimentale. Des outils de CAO tels que SolidWorks ont été exploités pour optimiser la géométrie, la durabilité et la performance du système, dont les tests confirment l'intérêt d'une intégration à grande échelle dans les aménagements urbains pour favoriser l'autonomie énergétique locale.

Enfin, dans le quatrième chapitre de notre étude, nous nous pencherons sur l'évaluation de la performance énergétique du modèle expérimental. Nous examinerons en détail comment cette évaluation a été réalisée et comment les résultats peuvent être analysés dans un environnement réel, afin de mieux comprendre l'impact concret de notre recherche.

Chapitre I

**Fondements de la piézoélectricité et
applications aux énergies renouvelables**

I. 1. Introduction

Dans un contexte marqué par la nécessité d'innover dans le secteur énergétique et de promouvoir des alternatives durables, la piézoélectricité apparaît comme une technologie prometteuse pour la conversion directe de déformations mécaniques, telles que pressions et vibrations, en énergie électrique grâce à des matériaux spécialisés. Initialement réservée aux domaines industriels et scientifiques, cette propriété physique suscite un intérêt croissant pour les solutions d'énergie renouvelable et autonome, du fait de ses capacités uniques et de la diversité de ses applications. Ce chapitre explore les principes fondamentaux de la piézoélectricité et présente de manière critique ses applications actuelles et potentielles dans le cadre de la production d'électricité renouvelable. Une attention particulière sera accordée aux systèmes hybrides et intelligents, ainsi qu'aux avantages et défis techniques et économiques liés à leur intégration dans le paysage énergétique contemporain.

I. 2. Types de matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques présentent usuellement une polarisation électrique en réponse à l'application d'une pression externe, et réciproquement. Les substances piézoélectriques sont usuellement classées en deux catégories distinctes : les substances naturelles et les substances de synthèse. Les substances piézoélectriques naturelles englobent le quartz (SiO_2), la topaze, les minéraux appartenant au groupe de la tourmaline, le sel de Rochelle, ainsi que certaines matières organiques naturelles telles que la soie, le bois, le caoutchouc, la dentine, l'os, les cheveux et l'émail. La première substance à manifester des propriétés piézoélectriques fut le sel de Rochelle, dont la caractéristique piézoélectrique a été mise en évidence par les frères Curie en 1880 [1].

I. 2. 1. Matériaux piézoélectrique naturelles

1. 2. 1. 1. Quartz : Le quartz est la forme cristalline la plus courante de la silice (SiO_2), qui existe également sous d'autres variétés comme le silex, l'agate ou la calcédoine. On le trouve exploitable notamment au Brésil, à Madagascar et en Russie. Sa structure stable à température ambiante est dite « forme α » ; lorsqu'il est chauffé à $573\text{ }^\circ\text{C}$, il se transforme en « forme β », beaucoup moins piézoélectrique. Le quartz fond à environ $1750\text{ }^\circ\text{C}$ et possède une dureté de 7 sur l'échelle de Mohs. Il est généralement incolore et transparent, et reste très stable dans la plupart des conditions environnementales [2].

Cristallisé dans le système trigonal (souvent appelé rhomboédrique), le quartz possède un axe de symétrie principal d'ordre 3 et trois axes d'ordre 2. Son cristal forme typiquement un prisme hexagonal terminé par des pyramides complexes. Le quartz existe en deux variantes

structurales, dite « droite » et « gauche » (énantiomorphes), qui peuvent coexister dans le même cristal sous forme de « macles ». Les macles et défauts naturels doivent être supprimés lors de l'usinage pour garantir des propriétés optimales des cristaux [2].

Depuis plusieurs années, il est possible de produire du quartz synthétique en grandes quantités par cristallisation à partir de solutions alcalines sous pression et température élevées, ce qui permet d'obtenir des cristaux orientés selon des axes spécifiques et donc d'optimiser leurs performances après découpe.

Lorsqu'il est utilisé en lames, le quartz permet la réalisation de parallélépipèdes, cylindres ou lentilles, dont les dimensions et l'orientation cristallographique déterminent leurs propriétés vibratoires. L'orientation précise des lames par rapport aux axes du cristal est essentielle pour garantir les performances recherchées [2].

I. 2. 1. 2. Topaze : La topaze est un silicate d'aluminium et de fluor dont la structure cristalline est orthorhombique. Ses différentes teintes naturelles peuvent être modifiées ou intensifiées par traitement thermique ou par application d'un revêtement spécifique. Cette pierre précieuse présente une dureté de 8 sur l'échelle de Mohs et une densité comprise entre 3,4 et 3,5. On la rencontre principalement dans les pegmatites et dans les filons de quartz formés à haute température, au sein de contextes géologiques favorisant la création de ce minéral lumineux et coloré. Les principaux gisements mondiaux se situent au Brésil, au Pakistan, en Russie, au Sri Lanka, en Chine, au Nigeria, au Zimbabwe, en Australie et aux États-Unis [3].

I. 2. 1. 3. Les caractéristiques des matériaux naturels

➤ **Origine naturelle :** Ce sont des matériaux présents naturellement dans l'environnement, tels que le quartz, la topaze ou la tourmaline, et ils peuvent être utilisés sans nécessiter de traitements chimiques complexes ou de synthèse élaborée [4].

➤ **Stabilité thermique et chimique élevée :** Ces matériaux présentent généralement une excellente stabilité thermique et chimique, ce qui leur permet de conserver leurs propriétés piézoélectriques sur de longues périodes, même dans des conditions environnementales difficiles [4].

➤ **Faible coefficient piézoélectrique :** Comparés aux matériaux synthétiques, les matériaux naturels génèrent des tensions plus faibles pour une même déformation mécanique en raison de leurs constantes piézoélectriques modestes [4].

➤ **Structure cristalline bien définie :** La symétrie particulière de leur structure cristalline - responsable du phénomène piézoélectrique - est à l'origine de cette propriété unique.

➤ **Applications limitées** : En raison de leurs performances modérées, leur emploi se limite souvent à des applications où la stabilité prime sur la puissance, telles que les résonateurs à quartz, les montres ou les oscillateurs électronique [4].

I. 2. 2. Matériaux piézoélectrique synthétiques

Les matériaux piézoélectriques synthétiques représentent une catégorie avancée de matériaux intelligents capables de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et vice versa. Contrairement aux matériaux piézoélectriques naturels comme le quartz, ces matériaux sont spécifiquement fabriqués pour améliorer leurs propriétés piézoélectriques et répondre aux exigences d'applications technologiques spécialisées.

I. 2. 2. 1. Céramiques Piézoélectriques

1) Matériaux à Base de Plomb (PZT)

Le titanate de zirconate de plomb (PZT) demeure le matériau piézoélectrique synthétique le plus largement utilisé. Développé vers 1952 à l'Institut de Technologie de Tokyo, le PZT présente une structure cristalline pérovskite avec la formule $Pb [Zr(x)Ti(1-x)] O_3$. Ce matériau offre des coefficients piézoélectriques élevés (d_{33} de 500-600 pC/N), une grande sensibilité et une température de fonctionnement supérieure au titanate de baryum [5].

Les céramiques PZT peuvent être classées en deux catégories principales :

- **PZT "mou"** : utilisé pour les actionneurs et capteurs, caractérisé par des coefficients de couplage élevés et une forte permittivité

- **PZT "dur"** : destiné aux applications ultrasoniques haute puissance, présentant un facteur de qualité mécanique élevé et une excellente stabilité

2) Alternatives Sans Plomb

En raison des préoccupations environnementales liées au plomb, de nombreux matériaux alternatifs ont été développés :

- **Titanate de Baryum (BaTiO₃)**

Le BaTiO₃ fut le premier matériau ferroélectrique découvert et présente des propriétés piézoélectriques intéressantes. Il cristallise dans une structure pérovskite et subit des transitions de phase en fonction de la température. Bien qu'il offre des performances inférieures au PZT, il reste prometteur pour de nombreuses applications.

- **Niobate de Potassium-Sodium (KNN)**

Le KNN (K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃) est considéré comme l'une des alternatives sans plomb les plus prometteuses au PZT. Ce matériau présente des niveaux élevés de piézoélectricité, bien que ses propriétés soient fortement dépendantes de la température.

- Titanate de Bismuth-Sodium (NBT-BT)

Le système (Na, Bi) TiO₃-BaTiO₃ offre des propriétés améliorées aux compositions de frontière de phase morpho tropique, bien qu'elles restent inférieures à celles du PZT[6].

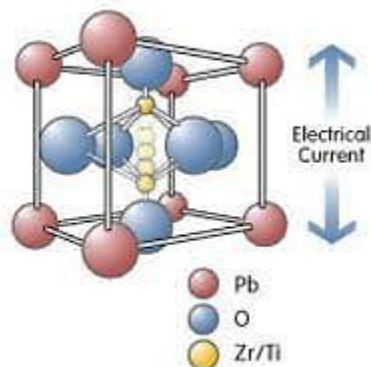


Figure I. 1. Structure cristalline PZT.



Figure I. 2. Céramiques PZT.

I. 2. 2. 2. Polymères Piézoélectriques

Polyvinylidène Fluoride (PVDF)

Le PVDF est le polymère piézoélectrique le plus étudié. Découvert vers 1970 par Dr. Henji Kawai au Japon, ce matériau présente cinq phases cristallines distinctes (α , β , γ , δ , ϵ), dont les phases β , γ et δ exhibent des propriétés piézoélectriques. La phase β , avec sa conformation tout-trans (TTTT), présente la piézoélectricité la plus élevée [7].

Les avantages du PVDF incluent :

- Flexibilité et facilité de mise en forme ;
- Biocompatibilité et non-toxicité ;
- Résistance chimique excellente ;
- Impédance acoustique plus faible que les céramiques.

Plusieurs méthodes permettent d'optimiser les propriétés piézoélectriques du PVDF:

➤ **Copolymérisation** : incorporation de monomères comme le TrFE pour favoriser la phase β

➤ **Traitement thermique et polarisation électrique**

➤ **Étirage mécanique** et techniques de pressage-pliage

➤ **Électro filage** pour créer des nanofibres avec des propriétés améliorées.

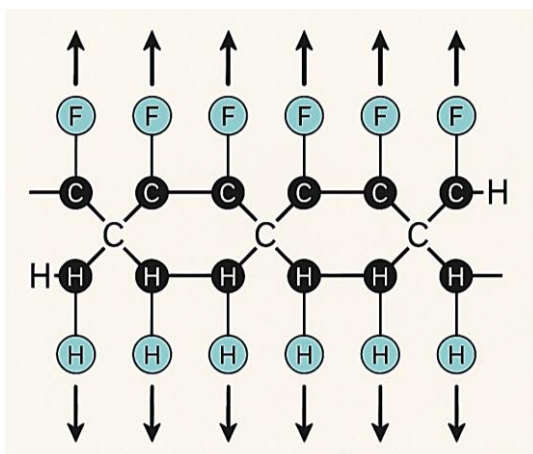


Figure I. 3. Structure moléculaire du PVDF.

I. 2. 2. 3. Matériaux Composites

Composites Céramique-Polymère

Les composites piézoélectriques combinent les avantages des céramiques (coefficients piézoélectriques élevés) et des polymères (flexibilité). La classification des composites suit la connectivité de chaque constituant :

• **Composites 1-3** : piliers céramiques connectés dans une direction, polymère connecté dans trois directions

- Impédance acoustique plus proche des milieux biologiques
- Bande passante fréquentielle améliorée
- Interférences latérales réduites

Nanocomposites

L'incorporation de nanoparticules (ZnO, BaTiO₃, etc.) dans des matrices polymères permet d'améliorer significativement les propriétés piézoélectriques. Ces matériaux présentent une synergie entre les propriétés des nanocharges et de la matrice polymère [8].

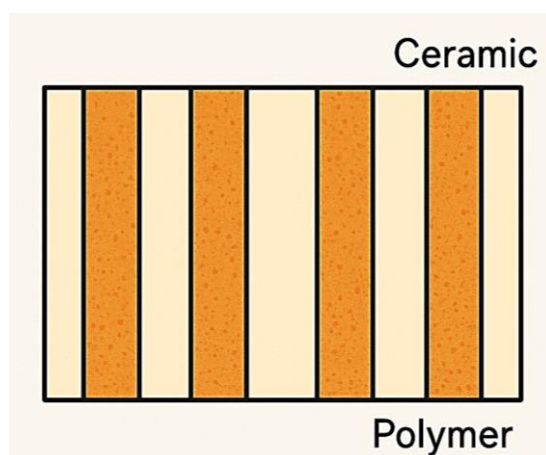


Figure I. 4. Composite piézoélectrique 1-3

I. 2. 2. 4. Matériaux Moléculaires

Cristaux Organiques Piézoélectriques

Une nouvelle classe de matériaux piézoélectriques basés sur des cristaux moléculaires organiques émerge comme alternative prometteuse. Ces matériaux présentent des avantages environnementaux et des propriétés ajustables par design moléculaire [9].

I. 2. 2. 5. Méthodes de Synthèse

1) Sol-Gel

La méthode sol-gel est largement utilisée pour la synthèse de céramiques piézoélectriques. Cette technique offre plusieurs avantages [10] :

- Contrôle précis de la stœchiométrie ;
- Homogénéité chimique dans les systèmes multi-composants ;
- Températures de traitement réduites ;
- Facilité de variation de composition.

Pour les films PZT, le processus implique généralement [10] :

1. Préparation d'une solution précurseur ;
2. Hydrolyse contrôlée pour former un sol ;
3. Dépôt du film par enduction centrifuge ;
4. Cristallisation par traitement thermique.

2) Électro filage

L'électro filage permet de produire des nanofibres piézoélectriques avec des propriétés exceptionnelles. Cette technique offre [11] :

- Maximisation de la surface spécifique
- Structure flexible adaptée aux applications biomédicales
- Formation de phases piézoélectriques favorisée par l'étirement des chaînes polymères

- Possibilité d'incorporation de nanocharges

4) Dépôt en Couches Minces

Les techniques de dépôt de couches minces permettent l'intégration de matériaux piézoélectriques dans des microsystèmes [11] :

- **Pulvérisation magnétron** : pour AlN, ZnO et PZT ;
- **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)** ;
- **Ablation laser pulsé**;
- **HiPIMS synchronisé** : nouvelle technique développée par l'EMPA pour des films de haute qualité à basse température.

I. 2. 2. 6. Applications et Perspectives

1) Applications Actuelles

Les matériaux piézoélectriques synthétiques trouvent des applications dans [12] :

- **Transducteurs ultrasoniques** pour l'imagerie médicale
- **Capteurs et actionneurs** dans l'aérospatiale et l'automobile
- **Récupération d'énergie** à partir de vibrations ambiantes
- **Dispositifs microélectroniques** (filtres RF, oscillateurs)
- **Applications biomédicales** (stimulation tissulaire, surveillance de santé)

2) Défis et Orientations Futures

➤ Transition Sans Plomb

Le défi majeur consiste à développer des alternatives sans plomb offrant des performances comparables au PZT. Les recherches se concentrent sur l'optimisation des compositions et des microstructures pour améliorer les propriétés piézoélectriques.

➤ Matériaux Haute Température

Le développement de matériaux fonctionnant à haute température (>200°C) est crucial pour les applications aérospatiales et automobiles. Les solutions BiFeO₃ et les polymères haute performance comme le polyamide-imide montrent des promesses dans ce domaine [13].

➤ Intelligence Artificielle et Design

L'utilisation de l'intelligence artificielle et des calculs hauts débits accélère la découverte de nouveaux matériaux piézoélectriques. Ces approches permettent de prédire les propriétés avant la synthèse expérimentale [9].

Les matériaux piézoélectriques synthétiques constituent un domaine en pleine expansion, motivé par les exigences environnementales et les applications technologiques avancées. Alors que le PZT reste dominant, les alternatives sans plomb et les nouveaux

matériaux moléculaires ouvrent des perspectives prometteuses. L'innovation dans les méthodes de synthèse, combinée aux approches computationnelles modernes, accélère le développement de matériaux aux propriétés sur mesure pour des applications spécialisées. L'avenir de ce domaine réside dans l'intégration de ces matériaux intelligents dans des systèmes complexes pour des applications allant de la médecine personnalisée aux technologies quantiques.

I. 2. 3. Matériaux électroactifs

Les matériaux électroactifs sont des matériaux intelligents dont les propriétés physiques évoluent sous l'application d'un champ électrique, induisant une déformation (matériaux piézoélectriques, électrostrictifs) ou une polarisation (matériaux ferroélectriques), et comprennent notamment les polymères électroactifs (PEA) qui changent de forme ou de taille lorsqu'ils sont stimulés électriquement, pouvant atteindre jusqu'à 380% de déformation contrairement aux céramiques piézoélectriques conventionnelles limitées à quelques pourcents. Ces matériaux se divisent en deux grandes familles : les polymères électroactifs électroniques (e-EAPs) activés par des forces électrostatiques nécessitant des tensions supérieures à 100 V/ μm incluant les polymères ferroélectriques comme le PVDF, les élastomères diélectriques et les polymères électrostrictifs, et les polymères électroactifs ioniques (i-EAPs) fonctionnant grâce au mouvement d'ions nécessitant des tensions plus faibles (1-2 V) comme les composites polymère-métal ioniques (IPMC), les gels polyélectrolytes et les polymères conducteurs (polypyrrole, polyaniline, PEDOT). Leurs applications s'étendent aux domaines biomédical (dispositifs implantables, ingénierie tissulaire, prothèses, administration contrôlée de médicaments), robotique (muscles artificiels, microactionneurs, robotique adaptative), énergétique (batteries à flux redox, récupération d'énergie, supercondensateurs), et électronique (électronique flexible, capteurs, textiles intelligents). Le marché mondial des polymères électroactifs, évalué entre 3,52 et 5,41 milliards USD en 2023-2024, devrait croître avec un taux annuel de 4,5-7% pour atteindre 8-10,03 milliards USD d'ici 2032-2033, malgré les défis techniques (faible efficacité de conversion, robustesse insuffisante, tensions d'activation élevées) et économiques (coûts de production élevés, manque de standardisation, difficultés de mise à l'échelle), tandis que les recherches futures se concentrent sur les applications biomimétiques, l'intégration multifonctionnelle, la durabilité environnementale et la miniaturisation pour des technologies émergentes comme la réalité étendue (XR), la médecine régénérative et l'intelligence artificielle [14].

I. 3. Mécanismes de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Les principaux mécanismes permettant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique comprennent l'induction électromagnétique, la piézoélectricité, la triboélectricité, les générateurs électrostatiques à capacité variable, la magnétostriction et, pour les fluides conducteurs, la magnétohydrodynamique (générateurs MHD). Chaque procédé exploite des phénomènes physiques spécifiques afin de transformer un mouvement, une vibration ou une contrainte mécanique en charges électriques ou en force électromotrice (FEM), ce par l'intermédiaire de champs magnétiques, de phénomènes de polarisation diélectrique ou de variations de capacité.

Ces différents mécanismes se manifestent à travers diverses réalisations :

- Les machines tournantes (alternateurs et générateurs classiques).
- Les microgénérateurs vibratoires (technologies piézoélectriques, triboélectriques, électrostatiques et magnétostrictives).
- Les systèmes à fluide conducteur (dispositifs MHD, sans pièces mobiles) adaptés selon l'échelle et la fréquence d'utilisation [15].

I. 3. 1. L'induction électromagnétique

L'induction électromagnétique est le phénomène selon lequel un courant électrique est généré dans un conducteur placé dans un champ magnétique variable. Ce principe, établi à la suite de multiples expériences scientifiques, doit son existence aux travaux de Faraday et Maxwell. Deux configurations sont principales : soit un conducteur se déplace à l'intérieur d'un champ magnétique, soit c'est l'aimant qui se déplace autour du conducteur. Ce mécanisme est à la base de la majorité des générateurs électriques industriels [16].

Exemple d'application :

Dans une centrale hydroélectrique, l'eau qui passe à travers une turbine fait tourner celle-ci ; la rotation est transmise à un alternateur. L'alternateur possède un rotor (équipé d'électroaimants) qui tourne à l'intérieur du stator (composé de bobines de cuivre fixes). Le champ magnétique variable engendre un déplacement des électrons dans les bobines, générant ainsi un courant alternatif utilisable pour l'alimentation électrique.

- Stator : Partie fixe contenant les lames piézoélectriques, servant de support et de guide pour transmettre les efforts mécaniques aux matériaux actifs.
- Arbre rotatif : Élément qui reçoit l'énergie mécanique initiale (souvent par le vent, l'eau ou un moteur externe) et porte souvent les aimants permanents générant l'induction dans les bobines.

I. 3. 2. Effet piézoélectrique

Le principe de la piézoélectricité repose sur la capacité de certains matériaux à générer une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique (compression, flexion, torsion). Cet effet, découvert en 1880 par les frères Curie, s'explique par la polarisation des charges électriques internes lors de la déformation du matériau. L'énergie mécanique appliquée est ainsi convertie en une différence de potentiel ou en un courant électrique. Ce phénomène est qualifié de piézoélectricité directe. À l'inverse, l'application d'une tension aux bornes d'un matériau piézoélectrique provoque sa déformation (effet inverse) [17].

Matériaux couramment utilisés : quartz, céramiques piézoélectriques (PZT), polymères (PVDF).

Applications typiques :

- Capteurs de pression.
- Allume-gaz piézoélectriques.
- Montres à quartz.
- Microgénérateurs intégrés dans des textiles ou semelles.

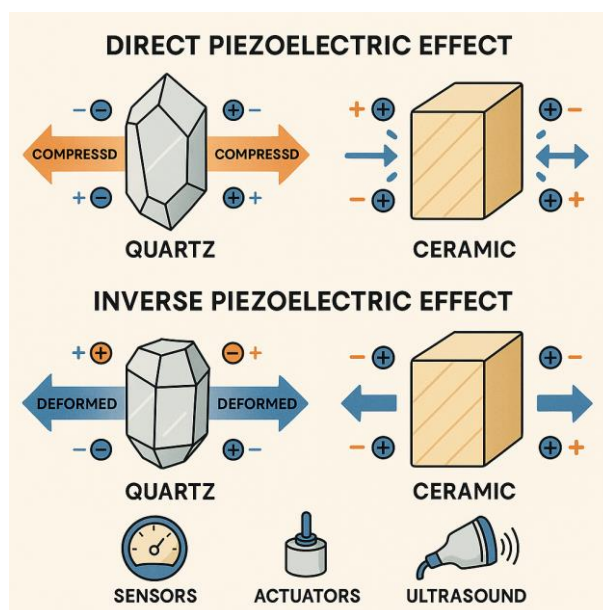


Figure I. 5. Principe de l'effet piézoélectrique direct et inverse

I. 3. 3. Effet triboélectrique

La triboélectricité désigne la génération de charges électriques par frottement ou simple contact entre deux matériaux différents, généralement isolants. Lorsque ces surfaces, initialement neutres, sont mises en contact puis séparées, des électrons sont transférés d'un matériau à l'autre, produisant ainsi une différence de potentiel triboélectrique. Ce phénomène

dépend de la nature, de la rugosité et de l'humidité des matériaux mis en friction. La triboélectricité intervient tant chez les matériaux isolants que conducteurs :

- Conducteurs : Passage d'électrons réel entre surfaces en contact.
- Isolants : Processus plus complexe, où des électrons ou des ions restent piégés à la surface après séparation.

Utilisations potentielles :

Récupération d'énergie dans des systèmes de chaussée intelligente, capteurs de mouvement et dispositifs portatifs [18].

I. 3. 4. Thermoélectricité

La thermoélectricité permet de convertir directement de la chaleur en électricité via des matériaux semi-conducteurs, principalement grâce à l'effet Seebeck (et aussi Peltier, Thomson). Ce procédé a trouvé ses principaux usages dans les générateurs thermoélectriques et les dispositifs de réfrigération sans pièces mobiles. Les avancées récentes dans les matériaux (alliages, nanostructures) ont permis d'améliorer l'efficacité de la conversion et d'ouvrir de nouvelles perspectives, tant pour la production énergétique que pour la gestion thermique de l'électronique [19].

Exemples d'usage :

- Alimentations autonomes dans les satellites.
- Récupération de chaleur perdue dans l'industrie.
- Refroidissement localisé d'électronique de puissance.

I. 4. Applications de l'Énergie Piézoélectrique dans les Énergies Renouvelables

L'énergie piézoélectrique constitue une forme propre et durable de production d'électricité. Elle se distingue par son absence de pollution et son potentiel d'approvisionnement quasi inépuisable puisqu'elle exploite les mouvements et actions quotidiens des individus. Même si la technologie en est encore à un stade expérimental pour de nombreux usages, elle connaît déjà de multiples applications industrielles et domestiques [20].

I. 4. 1. Secteur automobile et infrastructures urbaines

Dans le domaine des transports, des routes ou parkings équipés de tuiles piézoélectriques permettent de récupérer l'énergie des véhicules et des passants pour alimenter l'éclairage public, des signalisations ou des capteurs urbains. Cette technologie, testée dans

plusieurs sites pilotes (routes piézoélectriques, stations de métro), vise à rentabiliser l'énergie dissipée lors des déplacements à l'échelle d'une ville.

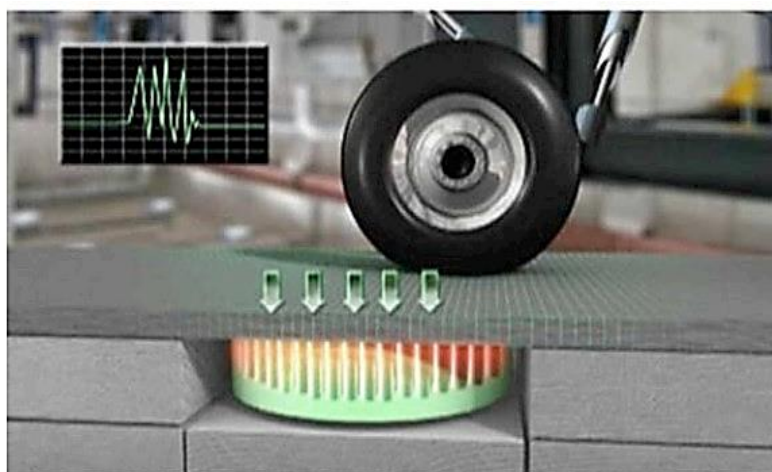


Figure I. 6. Première route piézoélectrique.

I. 4. 2. Vêtements et textile intelligent

À l'échelle microscopique, des fibres piézoélectriques intégrées aux vêtements et chaussures transforment les mouvements du corps humain (marche, course, flexion) en électricité utilisable pour alimenter de petits appareils électroniques (smartphones, montres, capteurs biomédicaux). Le domaine du textile intelligent est donc en pleine expansion, ouvrant la voie à des dispositifs portables voire autonomes énergétiquement [21].

- Limites actuelles :

Coût d'installation et rendement énergétique encore modestes par rapport aux investissements initiaux, nécessitant des efforts de recherche supplémentaires pour démocratiser ces solutions.

Enrichissement complémentaire :

- Générateurs magnétohydrodynamiques (MHD) : exploitent la circulation de plasmas ou de fluides conducteurs dans un champ magnétique fort pour générer de l'électricité, notamment dans certaines centrales expérimentales.

- Magnétostriction : phénomène où certains matériaux ferromagnétiques modifient leur forme sous l'effet d'un champ magnétique, générant de l'électricité lors d'une vibration contrôlée : utilisé dans les transducteurs ultrasoniques et certains capteurs industriels.

- Applications futures : au-delà des capteurs, montres ou textiles, des routes, planchers intelligents, dispositifs médicaux implantables (stimulateurs cardiaques autonomes), etc.,

représentent de nouveaux champs d'intégration pour la piézoélectricité et la récupération énergétique.



Figure I. 7. Prototype des vêtements piézoélectrique.

I. 5. Intégration de l'énergie piézoélectrique dans les systèmes énergétiques renouvelables

L'intégration de l'énergie *piézoélectrique* dans les systèmes d'énergie renouvelable vise essentiellement à exploiter les sources mécaniques ambiantes telles que les vibrations, les pressions et les mouvements environnementaux pour produire de l'électricité à petite échelle. Cette technologie se révèle particulièrement avantageuse dans les systèmes hybrides, où elle complète des sources conventionnelles comme le solaire ou l'éolien, renforçant ainsi l'efficacité énergétique globale et la durabilité [22].

Les principaux objectifs sont :

- **Valoriser l'énergie "perdue"** issue des mouvements mécaniques (trafic, pas des piétons, vibrations industrielles, etc.).
- **Alimenter des équipements à faible consommation énergétique**, tels que les capteurs IoT, les systèmes de surveillance, et l'éclairage LED.
- **Favoriser l'autonomie des systèmes décentralisés intelligents**, renforçant la résilience et l'indépendance énergétique face aux défaillances du réseau principal.

I. 5. 1. Récupération d'Énergie Vibratoire

La conversion de l'énergie des vibrations ambiantes en électricité s'appuie sur des transducteurs piézoélectriques, électromagnétiques ou électrostatiques, un procédé qualifié de

récupération d'énergie vibratoire. Ces générateurs inertiels détectent l'accélération ambiante via une masse sismique intégrée à un oscillateur mécanique. Le transducteur transforme l'énergie mécanique en électricité, qui est ensuite stockée dans un condensateur, un super-condensateur, ou une batterie rechargeable [23].

Les applications typiques incluent :

- **Équipements électroniques autonomes**, notamment les réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance environnementale et industrielle.
- **Systèmes de maintenance prédictive**, utilisant les vibrations des machines pour alimenter des modules de télémétrie et d'alerte.

I. 5. 2. Récupération d'énergie acoustique

La collecte d'énergie acoustique repose sur la conversion de l'énergie transportée par les ondes sonores en électricité grâce aux propriétés des matériaux piézoélectriques. Cette technologie trouve des applications dans des environnements urbains bruyants et dans des dispositifs grand public, comme les écouteurs à réduction de bruit [24].

Enrichissement :

- L'énergie acoustique récupérée peut prolonger la durée de vie des batteries de dispositifs portables ou contribuer à alimenter de petits capteurs dans des lieux où le bruit est omniprésent.
- Les recherches actuelles cherchent à optimiser la sensibilité des matériaux et la plage de fréquences exploitables pour maximaliser le rendement de conversion énergétique.

I. 5. 3. Récupération d'énergie par vibrations induites par les fluides

La récupération d'énergie générée par les vibrations des fluides trouve de nombreuses applications dans les infrastructures de transport et les systèmes de climatisation (CVC). Des capteurs piézoélectriques installés sur les conduites récupèrent l'énergie issue des variations de flux et permettent d'alimenter des systèmes de surveillance et de détection de fuites, réduisant la dépendance énergétique externe [25].

Enrichissement :

- L'optimisation de la conversion énergétique exige une compréhension fine des dynamiques de fluides et des interactions entre le matériau piézoélectrique et la structure environnante.
- Ces solutions deviennent cruciales dans le développement de bâtiments intelligents et d'infrastructures industrielles sécurisées.

I. 5. 4. Récupération d'Énergie Humaine

L'**Energy Harvesting humain** consiste à capter l'énergie résiduelle générée par le corps ou ses activités pour soutenir ou remplacer une source primaire comme une pile [26].

I. 5. 4. 1. La chaleur corporelle

Le corps humain étant à environ 37°C, il cède constamment de la chaleur à l'environnement. Des générateurs thermoélectriques exploitent le différentiel thermique entre le corps et l'air ambiant pour produire de l'électricité, selon le principe de la machine de Carnot idéale.doc.docx

Enrichissement :

Bien que le rendement réel soit limité, ces solutions permettent d'alimenter des capteurs biomédicaux portables ou des dispositifs d'assistance médicaux.

I. 5. 4. 2. Le souffle

L'air inhalé et exhalé peut être exploité comme un flux mécanique. L'énergie générée par les efforts de pression lors de la respiration équivaut à une puissance maximale théorique d'environ 1 W pour un individu adulte.doc.docx

Enrichissement :

Cette énergie pourrait être utilisée pour alimenter des capteurs intégrés à des dispositifs médicaux ou sportifs, facilitant le suivi physiologique en temps réel.

I. 5. 4. 3. La marche

La locomotion humaine, riche en événements mécaniques, génère une puissance moyenne de 67 W par cycle de marche. On peut récupérer cette énergie :

- Par la déformation des articulations (genou, cheville) ;
- Par la pression du pied sur le sol ;
- Par la chaleur libérée par les muscles en activité.

Enrichissement : Les semelles et vêtements piézoélectriques permettent de recharger des dispositifs portables lors des déplacements quotidiens, ouvrant la voie à des vêtements connectés véritablement autonomes.

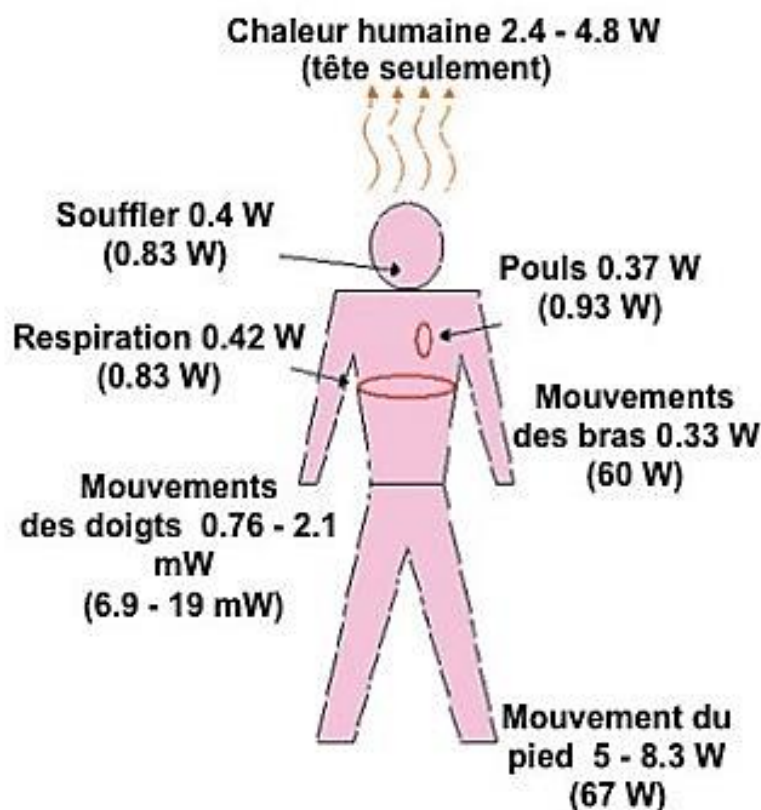


Figure I. 8. Sources potentielles d'énergie du corps humain.

I. 6. Avantages et Limites de l'Énergie Piézoélectrique

L'énergie piézoélectrique puise sa force dans la conversion de pressions mécaniques en électricité à travers des matériaux innovants, s'affirmant comme une technologie prometteuse au sein des énergies renouvelables [27].

I. 6. 1. Avantages

- **Renouvelable et inépuisable** : Elle valorise les mouvements et vibrations naturels de l'environnement urbain et industriel (trafic piétonnier, transports, machines), offrant une source d'énergie continue sans dépendance aux ressources fossiles.

- **Énergie propre et faible impact environnemental** : La production ne génère ni émissions polluantes ni gaz à effet de serre lors de son exploitation courante, et peut contribuer à la réduction de l'empreinte carbone dans les infrastructures modernes. L'impact écologique est principalement lié à la fabrication et au recyclage des matériaux utilisés, avec un potentiel d'optimisation via l'utilisation de céramiques et polymères éco-conçus.

- **Sécurité et fiabilité** : Fonctionnant à basse température et sans risques chimiques ou radioactifs, la technologie piézoélectrique est adaptée aux lieux publics, se distingue par une

sécurité accrue et permet des usages dans des environnements sensibles, y compris médicaux ou scolaires.

- **Intégration modulaire et polyvalente :** Les capteurs piézoélectriques sont peu encombrants et peuvent être incorporés dans les chaussées, bâtiments, équipements connectés, vêtements ou dispositifs médicaux, favorisant l'alimentation autonome de capteurs, l'éclairage urbain, ou le monitoring environnemental sans modifications majeures de l'existant.

- **Résilience en milieux contraints :** Capable de fonctionner dans des environnements hostiles ou peu accessibles, la technologie est précieuse pour l'Internet des objets (IoT), les infrastructures intelligentes et les applications spatiales ou militaires.

I. 6. 2. Limites

- **Coût initial élevé et rentabilité limitée :** Les modules piézoélectriques requièrent un investissement substantiel en R&D, fabrication spécialisée et installation complexe, ce qui freine leur déploiement à grande échelle et les cantonne à des projets pilotes ou à l'alimentation de dispositifs spécifiques, comme les tuiles piétonnières Pavegen.

- **Rendement et puissance restreints :** L'énergie générée reste faible en intensité, adaptée principalement au fonctionnement de microcapteurs ou d'appareils à basse consommation. Le rendement global est nettement inférieur à celui des technologies photovoltaïques ou éoliennes, limitant son usage pour les besoins énergétiques plus importants.

- **Durabilité et vieillissement des matériaux :** Les performances des éléments actifs peuvent s'affaiblir avec le temps, principalement à cause de cycles répétés de sollicitation mécanique, d'exposition à l'humidité ou à des températures extrêmes. Ce phénomène oblige à surveiller et à remplacer régulièrement les capteurs défectueux.

- **Maintenance et recyclage :** Les systèmes intégrés nécessitent un entretien périodique, et le recyclage des céramiques ou polymères pose un défi environnemental. La filière de valorisation pourrait être renforcée par l'utilisation de matériaux plus durables ou recyclables et le développement de procédés spécifiques de collecte et traitement.

- **Compatibilité et interopérabilité :** L'intégration avec des systèmes existants peut présenter des défis techniques, notamment au niveau de la connectivité, du stockage de l'énergie récoltée et de la synchronisation avec d'autres sources énergétiques.

I. 7. Conclusion

La piézoélectricité, au croisement de la science des matériaux et des enjeux énergétiques

contemporains, se révèle être une solution d'avenir pour la production décentralisée et durable d'électricité. En exploitant la conversion directe de déformations mécaniques—telles que les pressions, vibrations ou mouvements—en énergie électrique, elle ouvre des perspectives inédites pour valoriser l'énergie souvent perdue dans notre environnement urbain et industriel.

Ce chapitre a détaillé la diversité des matériaux impliqués, allant des cristaux naturels comme le quartz ou la topaze, dotés d'une remarquable stabilité chimique et thermique mais d'un faible rendement, aux matériaux de synthèse tels les céramiques PZT, les polymères PVDF ou les composites hybrides, développés pour optimiser les propriétés piézoélectriques et s'adapter aux applications technologiques les plus exigeantes.

Aujourd'hui, les domaines d'intégration de la piézoélectricité sont en pleine expansion : routes intelligentes récupérant l'énergie des véhicules et piétons, textiles et dispositifs biomédicaux alimentés par les mouvements corporels, capteurs connectés, infrastructures urbaines et industrielles visant une autonomie énergétique accrue. L'enjeu majeur réside dans l'intégration intelligente et modulaire des capteurs piézoélectriques, capables de fonctionner en synergie avec d'autres sources renouvelables (solaire, éolien), tout en restant adaptés à des environnements contraints ou difficiles d'accès.

Pour autant, des défis persistent : le coût initial des modules, leur durabilité et le rendement limité de la conversion imposent une amélioration continue des matériaux et procédés de synthèse. La transition vers des alternatives sans plomb, le développement de matériaux haute température et l'intégration de solutions intelligentes grâce à l'intelligence artificielle sont autant d'axes de recherche ouvrant la voie à de nouvelles applications. En conciliant exigences environnementales, performances fonctionnelles et modularité, la piézoélectricité s'impose comme une technologie clé pour la résilience énergétique future, où chaque vibration, mouvement ou pression pourra devenir une source exploitable d'énergie propre et renouvelable.

Chapitre II

**Pression Mécanique, Récupération
d'Énergie Vibratoire et Application aux
Pavés Intelligents**

II. 1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse bibliographique exhaustive des mécanismes de récupération d'énergie vibratoire par effet piézoélectrique et leur application aux pavés intelligents. Les systèmes piézoélectriques permettent de convertir l'énergie mécanique des contraintes et vibrations en énergie électrique utilisable. Cette technologie trouve des applications prometteuses dans l'infrastructure urbaine intelligente, notamment pour l'alimentation de capteurs, l'éclairage public et la surveillance du trafic. Le document examine les principes physiques, les différentes architectures de transducteurs, les circuits d'interface électronique, ainsi que les défis techniques et économiques associés au déploiement à grande échelle de ces systèmes.

II. 2. Contexte et motivation

La piézoélectricité, découverte en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie, représente aujourd'hui une technologie prometteuse pour la récupération d'énergie dans un contexte de transition énergétique. Cette propriété unique, qui permet la conversion bidirectionnelle entre énergie mécanique et énergie électrique, offre des opportunités considérables pour le développement de systèmes autonomes et durables [28].

Dans le contexte urbain actuel, caractérisé par une forte densité de population et des infrastructures en constante sollicitation, les pavements représentent une source d'énergie mécanique sous-exploitée. Chaque pas de piéton, chaque passage de véhicule génère des contraintes mécaniques qui, traditionnellement, se dissipent sous forme de chaleur. La récupération de cette énergie "perdue" constitue un enjeu majeur pour alimenter les capteurs et dispositifs électroniques nécessaires aux villes intelligentes [29].

L'émergence de l'Internet des Objets (IoT) et des villes intelligentes nécessite une multitude de capteurs autonomes pour la surveillance du trafic, la qualité de l'air, et diverses applications de monitoring urbain. Ces dispositifs requièrent une alimentation électrique fiable et durable, souvent dans des environnements où l'accès au réseau électrique est limité ou coûteux [28].

L'énergie mécanique présente une densité importante ($300 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$) et est disponible dans de nombreux environnements, même hostiles. Cette disponibilité constante, contrairement aux sources intermittentes comme le solaire ou l'éolien, fait de la récupération d'énergie vibratoire une solution particulièrement attractive pour les applications urbaines continues [29].

II. 3. Objectifs de l'étude

Cette étude bibliographique vise à analyser de manière exhaustive les aspects théoriques et pratiques de la récupération d'énergie piézoélectrique appliquée aux pavés intelligents. Les objectifs spécifiques incluent [28] :

- **Caractérisation des matériaux piézoélectriques** : analyse des propriétés électromécaniques des céramiques PZT, polymères PVDF, et matériaux sans plomb pour l'harvesting énergétique ;
- **Évaluation des méthodes de transduction** : comparaison des approches piézoélectriques, électromagnétiques et électrostatiques ;
- **Analyse des architectures de systèmes** : étude des configurations cantilevers, stacks, cymbal et composites intégrés ;
- **Optimisation des performances** : identification des facteurs critiques pour maximiser la conversion énergétique ;
- **Évaluation économique et technique** : analyse de la viabilité commerciale et des défis d'implémentation [30].

II. 2. Fondements Théoriques de la Piézoélectricité

II. 2. 1. Historique et principe physique

La découverte formelle de l'effet piézoélectrique est attribuée aux frères Pierre et Jacques Curie en 1880, lors de leurs travaux à l'École de physique et de chimie industrielles de Paris (actuelle ESPCI). Ils démontrèrent expérimentalement qu'une pression mécanique exercée sur certains cristaux (quartz, topaze, sucre) engendrait une différence de potentiel électrique sur leurs faces opposées [31].

La piézoélectricité résulte de l'interaction électromécanique linéaire dans les matériaux cristallins sans centre de symétrie. Au niveau microscopique, cette propriété s'explique par la déformation de la maille cristalline sous contrainte mécanique, provoquant un déplacement relatif des centres de gravité des charges positives et négatives [32].

Dans les céramiques PZT (Plomb-Zirconate-Titanate), la structure pérovskite permet un déplacement des cations Ti^{4+} sous contrainte mécanique, créant une redistribution des charges électriques et générant une différence de potentiel. Ce mécanisme fondamental explique pourquoi les matériaux PZT présentent des coefficients piézoélectriques particulièrement élevés.

L'effet peut être **direct** (contrainte mécanique \rightarrow charge électrique) ou **inverse** (champ

électrique → déformation mécanique). Pour la récupération d'énergie, c'est l'effet direct qui est exploité, convertissant l'énergie mécanique du trafic en électricité utilisable [32].

II. 2. 2. Équations constitutives

Les équations constitutives de la piézoélectricité, dans le cas linéaire, s'expriment sous la forme tensorielle [33] :

Pour l'effet direct :

$$D_i = d_{ij}\sigma_j + \varepsilon_{ik}^{\sigma} E_k$$

Pour l'effet inverse :

$$S_i = s_{ij}^E \sigma_j + d_{ki} E_k$$

Où :

- **D** : vecteur déplacement électrique (C/m²)
- **σ** : contrainte mécanique (N/m²)
- **E** : champ électrique (V/m)
- **S** : déformation mécanique
- **d** : coefficient piézoélectrique (C/N ou m/V)
- **s** : compliance élastique (m²/N)
- **ε** : permittivité diélectrique (F/m)

La **relation fondamentale pour l'énergie récupérée** s'exprime par :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2 F^2}{C_0}$$

Où C représente la capacité du transducteur, V la tension générée, F la force appliquée et C₀ la capacité à contrainte nulle.

II. 2. 3. Caractérisation des matériaux

Les propriétés électromécaniques d'un matériau piézoélectrique sont caractérisées par plusieurs paramètres critiques [34, 36] :

Coefficient piézoélectrique d₃₃ : mesure la charge générée par unité de contrainte appliquée dans la direction de polarisation. C'est le paramètre le plus critique pour l'efficacité de la récupération d'énergie.

Facteur de couplage électromécanique k₃₃ : indique l'efficacité de conversion entre énergies mécanique et électrique. Une valeur élevée signifie une meilleure conversion énergétique.

Constante diélectrique ϵ_r : influence la capacité du matériau et donc l'énergie stockée. Une valeur optimale est recherchée pour maximiser le coefficient de tension $g_{33} = d_{33}/(\epsilon_r \epsilon_0)$.

Coefficient de qualité mécanique Q_m : caractérise les pertes mécaniques. Une valeur élevée indique de faibles pertes et une meilleure durabilité.

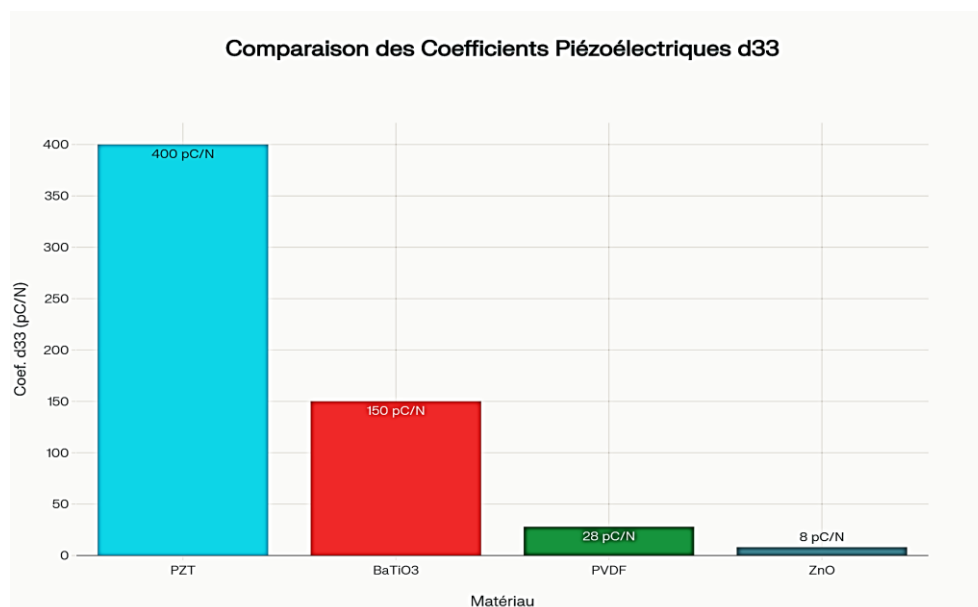


Figure II. 1. Coefficients piézoélectriques d_{33} des principaux matériaux utilisés pour la récupération d'énergie.

La figure ci-dessus illustre la supériorité des céramiques PZT en termes de coefficient piézoélectrique, expliquant leur dominance dans les applications de récupération d'énergie haute performance.

II. 3. Méthodes de Transduction Électromécanique

II. 3. 1. Transduction piézoélectrique

La transduction piézoélectrique utilise l'effet piézoélectrique direct pour convertir directement la contrainte mécanique en charge électrique. Cette méthode présente plusieurs avantages distinctifs pour les applications de pavés intelligents.

Principe de fonctionnement : Lorsqu'une force est appliquée sur le matériau piézoélectrique, la déformation de la structure cristalline génère une séparation de charges, créant une différence de potentiel entre les faces opposées [36, 27].

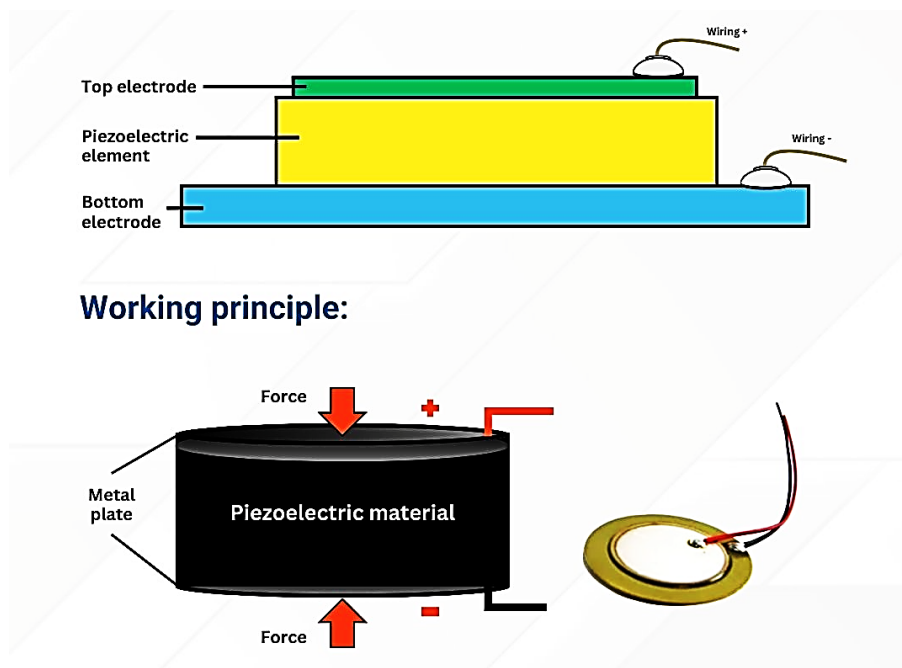


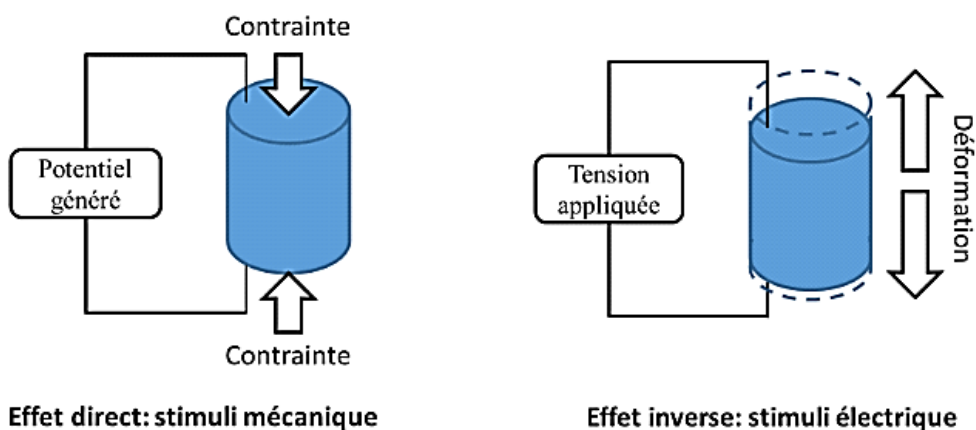
Figure II. 2. Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité

Avantages spécifiques :

- **Haute densité d'énergie** : jusqu'à 333 W/ft² selon l'étude UC Merced ;
- **Fonctionnement large bande** : efficace sur une gamme de fréquences étendue ;
- **Pas de source d'excitation externe** : auto-alimenté par les vibrations ambiantes ;
- **Robustesse** : pas de parties mobiles, donc moins de maintenance.

Limitations :

- **Impédance interne élevée** : nécessite des circuits d'interface spécialisés ;
- **Puissance limitée à basse fréquence** : performances réduites pour les sollicitations lentes ;
- **Coût des matériaux** : les céramiques PZT haute performance restent coûteuses.



Effet direct: stimuli mécanique

Effet inverse: stimuli électrique

Figure II. 3. Effet piézoélectrique direct et inverse.

II. 3. 2. Transduction électromagnétique

La transduction électromagnétique exploite la loi d'induction de Faraday par le mouvement relatif d'un conducteur dans un champ magnétique [37] :

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$

Où Φ est le flux magnétique, B l'induction magnétique, l la longueur du conducteur et v sa vitesse.

Caractéristiques :

- **Impédance interne faible** : meilleure adaptation avec les circuits électroniques ;
- **Efficacité à basse fréquence** : particulièrement adaptée aux mouvements lents ;
- **Mouvement relatif nécessaire** : nécessite des déplacements significatifs (>1mm).

Applications dans les pavés : Cette méthode est moins adaptée aux pavés routiers en raison des faibles déplacements générés par le trafic (<1mm typiquement).

II. 3. 3. Transduction électrostatique

La transduction électrostatique utilise la variation de capacité d'un condensateur à armatures mobiles [38] :

$$E = \frac{1}{2} V^2 (C_{max} - C_{min})$$

Caractéristiques :

- **Miniaturisation** : très bien adaptée aux applications MEMS ;
- **Source de polarisation** : nécessite une tension externe d'initialisation ;
- **Densité d'énergie** : généralement plus faible que les autres méthodes.

II. 3. 4. Comparaison des méthodes de transduction

Chaque méthode de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique possède des caractéristiques distinctes qui la rendent plus ou moins adaptée à une application spécifique comme les pavés intelligents [39].

Le tableau suivant synthétise les points clés pour comparer les trois technologies dans le contexte de la récupération d'énergie

Caractéristique	Transduction Piézoélectrique	Transduction Électromagnétique	Transduction Electrostatique
Principe	Effet piézoélectrique direct (contrainte → tension)	Loi de Faraday (mouvement dans un champ magnétique)	Variation de capacité (armatures mobiles)
Densité d'énergie	Élevée	Moyenne	Faible
Déplacement requis	Très faible (<1 mm)	Important (>1 mm)	Très faible (μm)
Fréquence optimale	Large bande	Basse fréquence	Haute fréquence
Impédance interne	Très haute	Faible	Variable, souvent haute
Durabilité / Robustesse	Excellente (pas de pièces mobiles)	Limitée (pièces mobiles : aimant/bobine)	Bonne (si bien encapsulée)
Besoin d'une source externe	Non	Non	Oui (tension de polarisation)
Adaptation aux pavés	Très bonne (robustesse, faible déplacement)	Faible (déplacement insuffisant)	Mauvaise (faible énergie, besoin de source)

Tableau II. 1. Comparaison des Méthodes de Transduction.

En conclusion, pour l'application des pavés intelligents, la méthode **piézoélectrique** offre le meilleur compromis entre la densité d'énergie, la robustesse et la capacité à fonctionner avec les faibles déformations caractéristiques du trafic routier.

II. 4. Matériaux piézoélectriques pour la récupération d'énergie

La récupération d'énergie représente un domaine scientifique en forte expansion, particulièrement dans le contexte de la transition énergétique. Parmi les diverses techniques de conversion étudiées - photovoltaïque, thermoélectricité, énergie cinétique et piézoélectricité - cette dernière se distingue par ses applications innovantes et son potentiel industriel [40].

Les matériaux piézoélectriques, notamment les PZT ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$) et autres composés morphotropiques (PMN-PT, PSN-PT), présentent des coefficients électromécaniques géants qui permettent des solutions industrialisables de conversion d'énergie mécanique en électricité. Les applications se diversifient rapidement : portions de routes et parkings tokyoïtes convertissant la pression des véhicules et piétons, smartphones piézoélectriques flexibles, dispositifs cardiaques auto-alimentés, et chaussures équipées de générateurs dans leurs semelles capables d'alimenter des appareils électroniques portables.

Le développement de ces technologies se heurte à deux limitations majeures. D'une part, l'optimisation des matériaux reste restrictive, se limitant principalement à l'amélioration de la mise en forme (céramique, cristaux, composite) et à la polarisation pour l'ingénierie des

domaines piézoélectriques. D'autre part, la réglementation REACH impose l'élimination du plomb, rendant nécessaire le développement d'alternatives aux PZT actuellement les plus performants [41].

Pour surmonter ces limitations, une approche innovante est proposée : agir en amont lors de l'élaboration des matériaux par des croissances cristallines sous champ électrique. Cette méthode vise à comprendre le rôle du champ électrique dans les processus cinétiques et thermodynamiques de croissance cristalline, tout en l'utilisant comme outil de synthèse pour créer des matériaux aux propriétés exacerbées.

Les recherches se concentrent sur des piézoélectriques ou ferroélastiques à structure pérovskite sans plomb, notamment LiNbO₃, BaTiO₃ et CaTiO₃. Ces matériaux, élaborés sous champ électrique pour une polarisation in-situ ou une sélection optimisée des domaines pendant la synthèse, pourraient concurrencer les piézoélectriques actuels tout en étant non toxiques et économiques.

II. 4. 1. Propriétés et performances

Le choix d'un matériau piézoélectrique pour la récupération d'énergie dépend d'un compromis entre ses performances électromécaniques, ses contraintes de mise en œuvre, son coût et son impact environnemental. Les performances sont principalement évaluées à travers deux coefficients :

- **Le coefficient de charge piézoélectrique (d)** : Il mesure la quantité de charge électrique générée pour une contrainte mécanique appliquée. Un coefficient d élevé est souhaitable pour maximiser le courant généré.
- **Le coefficient de tension piézoélectrique (g)** : Il mesure l'intensité du champ électrique produit pour une contrainte mécanique donnée. Un coefficient g élevé est essentiel pour obtenir une tension de sortie importante.

II. 4. 2. Comparaison des Propriétés et Performances

II. 4. 1. 1. Matériaux à base de plomb (PZT)

Les céramiques de Titano-Zirconate de Plomb (PZT) sont les matériaux les plus utilisés en raison de leurs **coefficients piézoélectriques très élevés**. Ils offrent le meilleur rendement de conversion d'énergie, ce qui en fait la référence industrielle. Cependant, leur principal inconvénient est la **toxicité du plomb**, qui pousse la recherche vers des alternatives plus écologiques conformément aux réglementations comme REACH. De plus, ce sont des matériaux fragiles [42].

II. 4. 1. 2. Matériaux sans plomb

Les recherches se concentrent activement sur des alternatives viables pour remplacer les PZT [43].

- **Céramiques sans plomb (BaTiO_3 , LiNbO_3)** : Le Titanate de Baryum (BaTiO_3) et le Niobate de Lithium (LiNbO_3) sont parmi les alternatives les plus étudiées. Bien que leurs performances soient généralement inférieures à celles des PZT, ils représentent un excellent compromis entre efficacité et respect de l'environnement. Des recherches visent à améliorer leurs propriétés par des techniques de synthèse innovantes.

- **Polymères (PVDF)** : Le Polyfluorure de vinylidène (PVDF) est un polymère flexible, léger et non toxique. Sa grande souplesse le rend idéal pour des applications sur des surfaces courbes ou pour des dispositifs portables. Son coefficient de charge d est faible, mais son coefficient de tension g est très élevé, ce qui lui permet de générer des tensions importantes.

- **Autres matériaux (ZnO , AlN)** : L'Oxyde de Zinc (ZnO) et le Nitrure d'Aluminium (AlN) sont des matériaux intéressants pour leur compatibilité avec les technologies de micro-fabrication (MEMS) et leur capacité à être produits sous forme de nanostructures. Leurs performances piézoélectriques sont cependant modestes comparées à celles des céramiques.

Le tableau ci-dessous résume et compare les propriétés des différents types de matériaux piézoélectriques pour la récupération d'énergie.

Matériau	Type	d_{33} (pC/N)	Avantages	Inconvénients
PZT (5H/5A)	Céramique (avec plomb)	374 à 593	Très hautes performances, excellent couplage électromécanique, maturité technologique.	Toxique (contient du plomb), fragile, haute impédance.
BaTiO₃	Céramique (sans plomb)	~190	Bonne alternative sans plomb, bonne stabilité chimique.	Performances inférieures à celles des PZT.
LiNbO₃	Céramique (sans plomb)	~6	Robuste, stable en haute fréquence, sans plomb.	Faible coefficient de charge, tension générée plus faible.
PVDF	Polymère	-33	Flexible, léger, non toxique, facile à intégrer, haute tension de sortie (g élevé).	Faible coefficient de charge, couplage moins élevé que les céramiques.
ZnO / AlN	Céramique (sans plomb)	5 à 6	Compatible avec la microélectronique (MEMS), nanostructurable, non toxique.	Faibles coefficients piézoélectriques, performances globales modestes.

Tableau II. 2. Tableau récapitulatif et comparatif des propriétés des différents types de matériaux piézoélectriques pour la récupération d'énergie.

II. 5. Systèmes de pavés intelligents

II. 5. 1. Architecture et conception

Les systèmes de pavés piézoélectriques intelligents intègrent plusieurs composants fonctionnels dans une architecture complexe optimisée pour la récupération d'énergie et la durabilité [44].

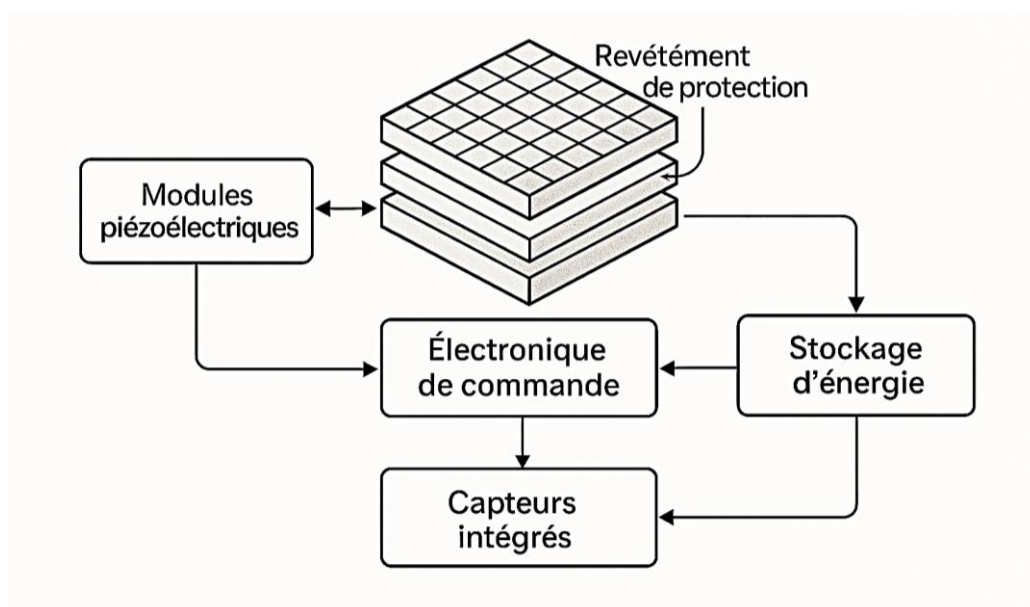


Figure II. 4. Schéma architectural d'un système de pavé piézoélectrique intelligent.

II. 5. 1. 1. Composants architecturaux principaux :

➤ **Couche de surface** : interface avec le trafic, doit assurer l'adhérence, la résistance à l'usure et le transfert optimal des contraintes vers les transducteurs [44].

➤ **Couche de transduction** : éléments piézoélectriques (disques, poutres, stacks) convertissant la contrainte mécanique en énergie électrique. La configuration peut être [28]:

- **Cantilevers** : pour vibrations latérales, adapté aux faibles charges ;
- **Stacks** : pour compression axiale, optimal pour charges lourdes ;
- **Cymbals** : amplification mécanique des déformations.

➤ **Système de protection** : encapsulation étanche protégeant les transducteurs des conditions environnementales (humidité, températures extrêmes, agressions chimiques). Les matériaux d'encapsulation doivent présenter [44] :

- Résistance mécanique élevée (>150 MPa) ;
- Étanchéité parfaite (IP68 minimum) ;
- Stabilité thermique (-40°C à +80°C) ;
- Transmission optimale des contraintes.

➤ **Circuit de conditionnement** : électronique de puissance pour optimiser la récupération d'énergie [28] :

- Redresseurs AC/DC haute efficacité ;
- Régulateurs de tension adaptatifs ;
- Systèmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) ;
- Modules de gestion d'énergie intelligents.

II. 5. 1. 2. Contraintes de conception [28, 44] :

- **Résistance mécanique** : supporter les charges de trafic (jusqu'à 40 tonnes pour les poids lourds) ;
- **Déflexion limitée** : <1-5 mm pour ne pas perturber la circulation ;
- **Durabilité** : résister à 10^6 - 10^8 cycles de charge ;
- **Intégration** : compatibilité avec l'infrastructure existante.

II. 5. 2. Modélisation mécanique

La modélisation des systèmes de pavés nécessite une approche multi-physique couplant les aspects mécaniques, électriques et thermiques [44].

II. 5. 2. 1. Modélisation par éléments finis : Les simulations FEM permettent d'optimiser :

- **Distribution des contraintes** : homogénéisation des charges sur les transducteurs ;
- **Profondeur d'encastrement** : optimisation du transfert de contrainte ;
- **Géométrie des transducteurs** : maximisation de la déformation effective ;
- **Propriétés d'interface** : optimisation de la transmission mécanique.

II. 5. 2. 2. Paramètres critiques :

- **Fréquence de résonance** : accord avec les vibrations dominantes du trafic (5-50 Hz) ;
- **Facteur de qualité** : optimisation du compromis efficacité/bande passante ;
- **Coefficient d'amortissement** : adaptation à l'environnement de fonctionnement.

II. 5. 2. 3. Relations fondamentales :

La puissance de sortie présente une **relation exponentielle** avec l'amplitude de charge appliquée :

$$P = k \cdot F^n$$

Où k est une constante dépendant du système et $n \approx 2$ pour la plupart des configurations.

L'**optimisation géométrique** peut améliorer les performances de 14-19% selon les études récentes. Les configurations multicouches montrent des performances supérieures aux

dispositifs monocouche [45].

II. 5. 3. Circuits d'interface électronique

Les circuits d'interface jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la récupération d'énergie, pouvant améliorer l'efficacité d'un facteur 4 ou plus [46].

1) Architecture électronique :

Redresseurs spécialisés :

- **Redresseurs synchrones** : réduction des pertes de conduction ;
- **Redresseurs à seuil adaptatif** : optimisation pour faibles tensions ;
- **Techniques SSHI** (Synchronized Switch Harvesting on Inductor): amélioration jusqu'à 365% [47].

2) Gestion d'énergie avancée :

- **MPPT adaptatif** : suivi en temps réel du point de puissance maximale ;
- **Stockage hybride** : combinaison supercondensateurs/batteries ;
- **Gestion des pics** : lissage des variations de puissance.

3) Modules de protection :

- **UVLO** (Under-Voltage Lock-Out) : protection contre les sous-tensions ;
- **Limitation de courant** : protection contre les surintensités ;
- **Isolation galvanique** : sécurité électrique.

4) Innovations récentes :

- **Circuits auto-adaptatifs** : ajustement automatique aux conditions de trafic ;
- **Communications sans fil** : transmission des données énergétiques ;
- **Diagnostic embarqué** : surveillance de l'état des transducteurs.

II. 5. 4. Optimisation énergétique

L'optimisation des systèmes de pavés intelligents repose sur plusieurs stratégies complémentaires [46].

II. 5. 4. 1. Stratégies d'optimisation :

Accord fréquentiel : ajustement de la fréquence de résonance des transducteurs aux vibrations dominantes du trafic. Cette optimisation peut apporter une amélioration >30% des performances.

Récolte multi-modale : utilisation de plusieurs transducteurs accordés sur différentes fréquences pour élargir la bande passante effective. Cette approche permet de capturer l'énergie sur un spectre étendu (1-100 Hz).

Amplification mécanique : mécanismes d'amplification des déformations pour

optimiser l'excitation des transducteurs. L'étude UC Merced démontre l'efficacité de cette approche avec 333 W/ft².

II. 5. 4. 2. Optimisation structurelle :

- **Structures multicouches** : performances supérieures aux dispositifs monocouche ;
- **Configuration en réseau** : distribution optimale des transducteurs ;
- **Couplage mécanique** : maximisation du transfert d'énergie.

II. 5. 4. 3. Gestion intelligente :

- **Algorithmes adaptatifs** : optimisation en temps réel selon les conditions ;
- **Prédiction de charge** : anticipation des pics de trafic ;
- **Maintenance prédictive** : surveillance continue des performances.

II. 6. Applications et Performances

II. 6. 1. Études de cas industriels

Plusieurs déploiements commerciaux et prototypes de recherche démontrent la faisabilité technique et les performances réelles des pavés piézoélectriques [48, 49].

1) Pavegen (Royaume-Uni) :

- **Performances** : 4-7 W par pas (piéton 70 kg) ;
- **Applications** : centres commerciaux, gares, stades, festivals ;
- **Technologie** : transducteurs électromagnétiques avec amplification mécanique ;
- **Déploiements** : >200 installations dans 36 pays ;
- **Retour d'expérience** : durabilité prouvée, acceptation publique élevée.



Figure II. 5. Installation de dalles Pavegen sur une allée piétonne.

2) Innowattech :

- **Performances revendiquées** : 200 kWh/km-h pour 600 véhicules/h à 72 km/h
- **Technologie** : générateurs piézoélectriques encastrés dans l'asphalte

- **Tests** : installation pilote de 1 km sur autoroute
- **Défis** : durabilité des matériaux, maintenance difficile.



Figure II. 6. Voies ferrées piézoélectriques récupèrent l'énergie produite par le passage des trains.

3) Prototypes de recherche avancés :

✚ Université de Californie, Merced :

- **Performance exceptionnelle** : 333 W/ft² avec mécanisme d'amplification^[3]
- **Innovation** : système de compression à amplification de force breveté
- **Tests routiers** : estimation de 72 800 kWh/an pour 1 mile de voie
- **Potentiel** : 907 873 kWh/an pour trafic de poids lourds

✚ Systèmes cantilevers optimisés :

- **Performance** : 7,61 mW à 20 km/h^[4]
- **Configuration** : 24-72 transducteurs par module
- **Applications** : ralentisseurs, passages piétons

✚ Stacks PZT haute performance :

- **Puissance** : 200 mW sous 1020 N à 6 Hz ;
- **Configuration** : 36 couches empilées ;
- **Tension** : >80 V en circuit ouvert.

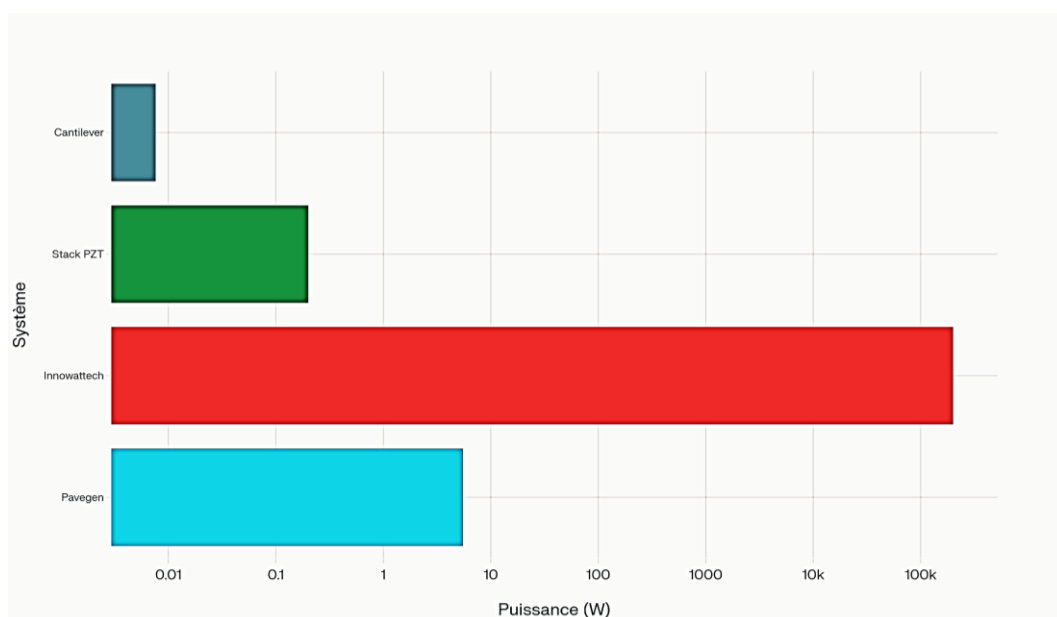


Figure II. 7. Comparaison des performances énergétiques des principaux systèmes de pavés piézoélectriques.

II. 6. 2. Analyse comparative des technologies

L'analyse comparative révèle des différences significatives de performance selon la technologie et l'application [50, 51].

II. 6. 2. 1. Classification par puissance :

- **Haute puissance** (>1 W) : Pavegen, systèmes UC Merced ;
- **Puissance moyenne** (0,1-1 W) : stacks PZT optimisés ;
- **Faible puissance** (<0,1 W) : cantilevers, applications capteurs.

II. 6. 2. 2. Facteurs de performance :

1) Type de sollicitation :

- **Trafic lourd** : systèmes encastrés haute résistance privilégiés ;
- **Trafic piéton** : systèmes de surface avec retour tactile ;
- **Vibrations continues** : cantilevers accordés en fréquence.

2) Conditions environnementales :

- **Extérieur** : protection IP68, résistance UV obligatoire ;
- **Intérieur** : contraintes réduites, maintenance facilitée ;
- **Zones climatiques extrêmes** : matériaux adaptés (-40°C à +80°C).

3) Critères économiques :

- **Coût d'installation** : 400-1000 €/m² selon la technologie ;
- **Durée de vie** : 5-20 ans selon les matériaux ;

- **Maintenance** : accès difficile pour systèmes encastrés.

II. 6. 3. Défis techniques et économiques

Malgré les progrès technologiques, plusieurs défis majeurs limitent encore l'adoption généralisée [52].

II. 6. 3. 1 Défis techniques :

✚ Durabilité des matériaux :

- **Fatigue piézoélectrique** : dégradation après 10^6 - 10^8 cycles
- **Vieillessement** : évolution des propriétés dans le temps
- **Conditions extrêmes** : impact des cycles thermiques et de l'humidité

✚ Efficacité de conversion :

- **Rendement énergétique** : 1-10% typiquement, progrès vers 15-20%
- **Pertes électroniques** : optimisation des circuits d'interface nécessaire
- **Couplage mécanique** : transfert optimal des contraintes

✚ Intégration infrastructure :

- **Compatibilité** : adaptation aux standards routiers existants ;
- **Installation** : perturbation minimale du trafic ;
- **Maintenance** : accès aux composants encastrés.

II. 6. 3. 2. Défis économiques :

✚ Coûts d'investissement élevés :

- **Matériaux** : céramiques PZT haute performance coûteuses ;
- **Installation** : 400-1000 €/m² selon la configuration ;
- **Électronique** : circuits spécialisés représentent 30-40% du coût.

✚ Viabilité économique :

- **Retour sur investissement** : 10-25 ans selon l'application ;
- **Comparaison** : compétitivité avec autres sources renouvelables ;
- **Subventions** : nécessité de soutien public initial.

✚ Facteurs d'échelle :

- **Production** : volumes insuffisants pour réduction significative des coûts ;
- **Standardisation** : absence de normes techniques établies ;
- **Écosystème** : développement de la chaîne d'approvisionnement.

II. 6. 4. Perspectives d'avenir

Les développements futurs s'orientent vers plusieurs axes d'innovation prometteurs [53].

II. 6. 4. 1. Innovations matériaux :

+ Nanostructures avancées :

- **Nanofils ZnO** : amélioration potentielle de 40% des performances ;
- **Films minces optimisés** : réduction des coûts et amélioration de l'intégration ;
- **Matériaux biomimétiques** : structures inspirées du vivant.

+ Composites nouvelle génération :

- **Matrices intelligentes** : adaptation automatique aux conditions ;
- **Structures hiérarchiques** : optimisation multi-échelle ;
- **Matériaux auto-réparants** : prolongation de la durée de vie.

+ Systèmes hybrides :

- **Couplage multi-sources** : piézoélectrique + solaire/thermique ;
- **Stockage intégré** : supercondensateurs embarqués ;
- **Récupération optimisée** : capture simultanée de plusieurs formes d'énergie.

II. 6. 4. 2. Applications émergentes :

+ Infrastructure intelligente :

- **Surveillance intégrée** : capteurs autonomes alimentés par les pavés
- **Communications V2I** : infrastructure communicante avec les véhicules
- **Maintenance prédictive** : surveillance continue de l'état des routes.

+ Mobilité électrique :

- **Recharge dynamique** : alimentation des véhicules en mouvement ;
- **Stations-service** : intégration dans les aires de repos ;
- **Transport public** : alimentation des arrêts et stations.

+ Villes intelligentes :

- **Éclairage adaptatif** : modulation selon le trafic ;
- **Signalisation dynamique** : panneaux auto-alimentés ;
- **Collecte de données** : monitoring du trafic en temps réel.



Figure II. 8. Illustrations de la récupération d'énergie piézoélectrique (vision d'avenir).

II. 7. Conclusion

Cette analyse bibliographique exhaustive révèle que la récupération d'énergie par pavés piézoélectriques représente une technologie en forte évolution, présentant un potentiel significatif pour l'infrastructure urbaine intelligente. L'analyse converge vers plusieurs conclusions majeures.

1) Maturité technologique : Les systèmes de récupération d'énergie piézoélectrique ont dépassé le stade de la recherche fondamentale pour atteindre des déploiements commerciaux réels. Les performances actuelles, de quelques milliwatts à plusieurs watts selon l'application, permettent d'alimenter efficacement des capteurs et dispositifs basse consommation.

2) Supériorité des matériaux PZT : Les céramiques Plomb-Zirconate-Titanate dominent actuellement le marché grâce à leurs coefficients piézoélectriques exceptionnels (300-600 pC/N) et leur facteur de couplage élevé (0,7-0,75). Cependant, l'évolution vers des alternatives sans plomb s'accélère, avec des matériaux comme le KNN atteignant des performances comparables (650 pC/N).

3) Innovations architecturales : Les systèmes d'amplification mécanique, comme ceux développés par UC Merced, démontrent un potentiel de densité énergétique exceptionnelle (333 W/ft²). Ces innovations ouvrent la voie à une viabilité économique renforcée.

4) Optimisation électronique : Les circuits d'interface avancés (MPPT, SSHI, gestion intelligente) peuvent améliorer l'efficacité d'un facteur 4 ou plus^[10], soulignant l'importance de l'optimisation système globale.

Chapitre III

Conception et Réalisation

III. 1. Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de recherche de solutions durables, la technologie piézoélectrique émerge comme une approche innovante pour la récupération d'énergie. La capacité de convertir l'énergie mécanique des mouvements quotidiens en électricité ouvre des perspectives prometteuses pour l'alimentation de dispositifs électroniques dans les environnements urbains [54].

Ce chapitre présente la conception et la réalisation d'un système de pavé intelligent utilisant l'effet piézoélectrique pour générer de l'électricité à partir de la pression exercée par les piétons. L'approche méthodologique intègre l'utilisation d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO) pour optimiser la géométrie du système et assurer l'intégration harmonieuse des composants mécaniques et électriques.

La démarche de conception repose sur une analyse multidisciplinaire combinant la modélisation 3D, l'ingénierie des matériaux et l'électronique de puissance. Le prototype développé intègre des capteurs piézoélectriques dans une structure de pavé en béton, protégés par une couche de polyuréthane, avec un système de gestion électronique pour la récupération et le stockage de l'énergie générée.

Des tests de validation seront réalisés pour évaluer les performances énergétiques du système, sa durabilité et sa capacité d'intégration dans les infrastructures urbaines existantes. Cette approche vise à contribuer au développement de solutions d'infrastructure intelligente et durable.

III. 2. Outils de Conception - SolidWorks

III. 2. 1. Présentation de SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) et d'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) développé par Dassault Systèmes. Ce logiciel constitue un outil de référence dans l'industrie pour la création de modèles 3D paramétriques et la génération de dessins techniques 2D [55].

III. 2. 2. Fonctionnalités principales

Les capacités de SolidWorks incluent :

- **Modélisation 3D paramétrique** : Création de modèles tridimensionnels basés sur des relations géométriques et dimensionnelles, permettant une modification rapide et cohérente des designs ;

- **Simulation avancée** : Outils d'analyse par éléments finis (AEF) pour l'évaluation du comportement mécanique, thermique et dynamique des composants ;
- **Génération de dessins techniques** : Production automatisée de vues en plan, coupes et détails à partir des modèles 3D ;
- **Gestion collaborative** : Système de gestion des données produit (PDM) facilitant le travail en équipe et le contrôle des versions ;
- **Personnalisation avancée** : Architecture modulaire permettant l'intégration de modules spécialisés selon les domaines d'application.

III. 2. 3. Bonnes pratiques de conception

L'utilisation efficace de SolidWorks nécessite l'application de méthodologies de conception structurées [59, 64] :

- **Planification préalable** : Définition claire des spécifications avant la modélisation ;
- **Structure logique des features** : Organisation hiérarchique des fonctions de conception pour minimiser les dépendances ;
- **Utilisation des plans de référence** : Création d'un système de coordonnées stable pour positionner les éléments géométriques ;
- **Gestion des configurations** : Utilisation de variantes paramétriques pour optimiser la flexibilité du design ;
- **Documentation standardisée** : Application de nomenclatures et annotations cohérentes



Figure III. 1. Logo SOLIDWORKS.

III. 3. Conception du Système Piézoélectrique (Pavé Intelligent)

III. 3. 1. Architecture du Système

Le système de génération d'énergie piézoélectrique intégré dans un pavé intelligent comprend plusieurs sous-ensembles fonctionnels conçus pour optimiser la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

III. 3. 2. Composants du système

III. 3. 2. 1. Composants structurels

- *Pavé en béton* : Structure porteuse avec composition optimisée (1,76 kg de ciment, 4,59 kg de sable 0/4 mm, 4,86 kg de gravier 4/8 mm, 0,81 L d'eau) [57] ;
- *Plaque de polyuréthane* : Interface de protection et de répartition des contraintes ;
- *Adhésif époxy bicomposant* : Système de liaison inter-couches haute performance.

III. 3. 2. 2. Composants électroactifs

- *Éléments piézoélectriques* : Transducteurs de conversion d'énergie mécanique-électrique ;
- *Diodes de redressement 1N4007* : Circuit de redressement pour conversion AC/DC ;
- *Résistances de limitation (1k Ω)* : Contrôle du courant et protection des circuits.

III. 3. 2. 3. Composants énergétiques et de signalisation

- *Batterie rechargeable* : Système de stockage d'énergie ;
- *LED's d'indication* : Voyants de statut (rouge : charge, vert : charge complète) ;
- *Câblage électrique*: Interconnexions électriques.

III. 3. 3. Conception 3D sous SolidWorks

La modélisation tridimensionnelle du pavé intelligent a été réalisée en suivant une approche méthodique de conception paramétrique. L'assemblage virtuel permet d'optimiser l'intégration des composants et de valider les contraintes géométriques avant la phase de prototypage.

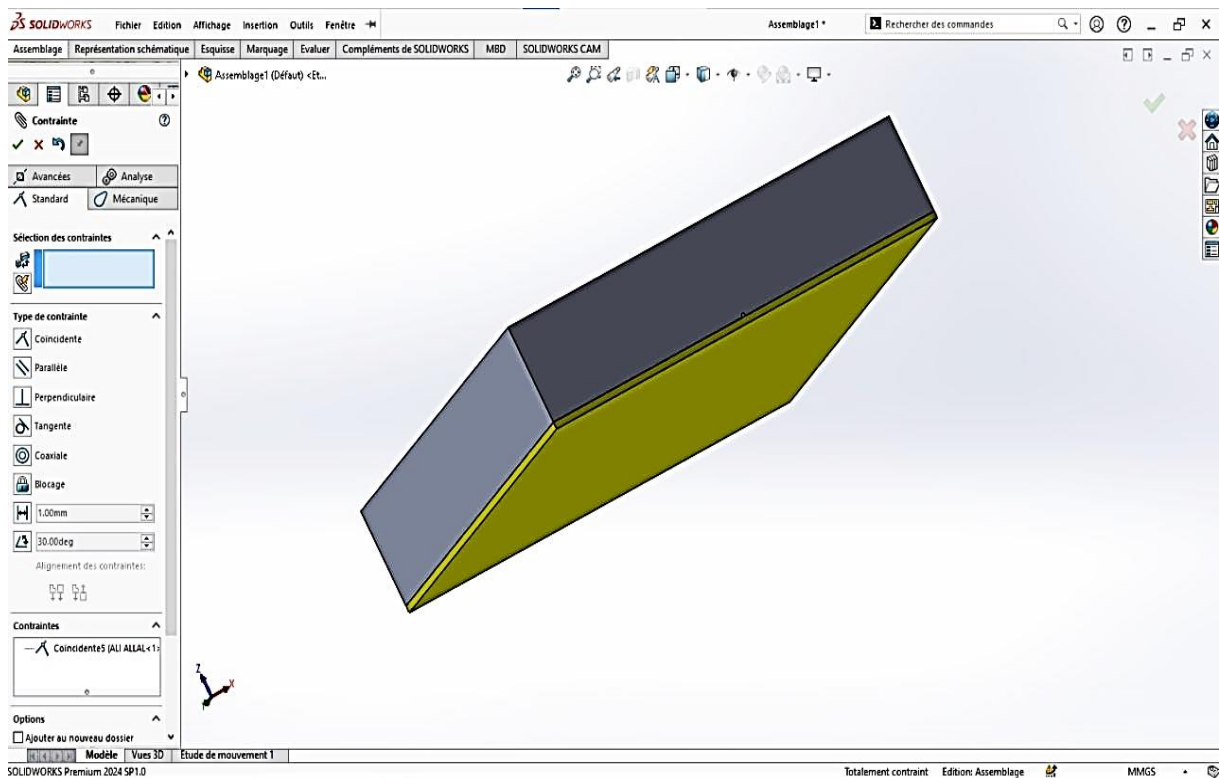
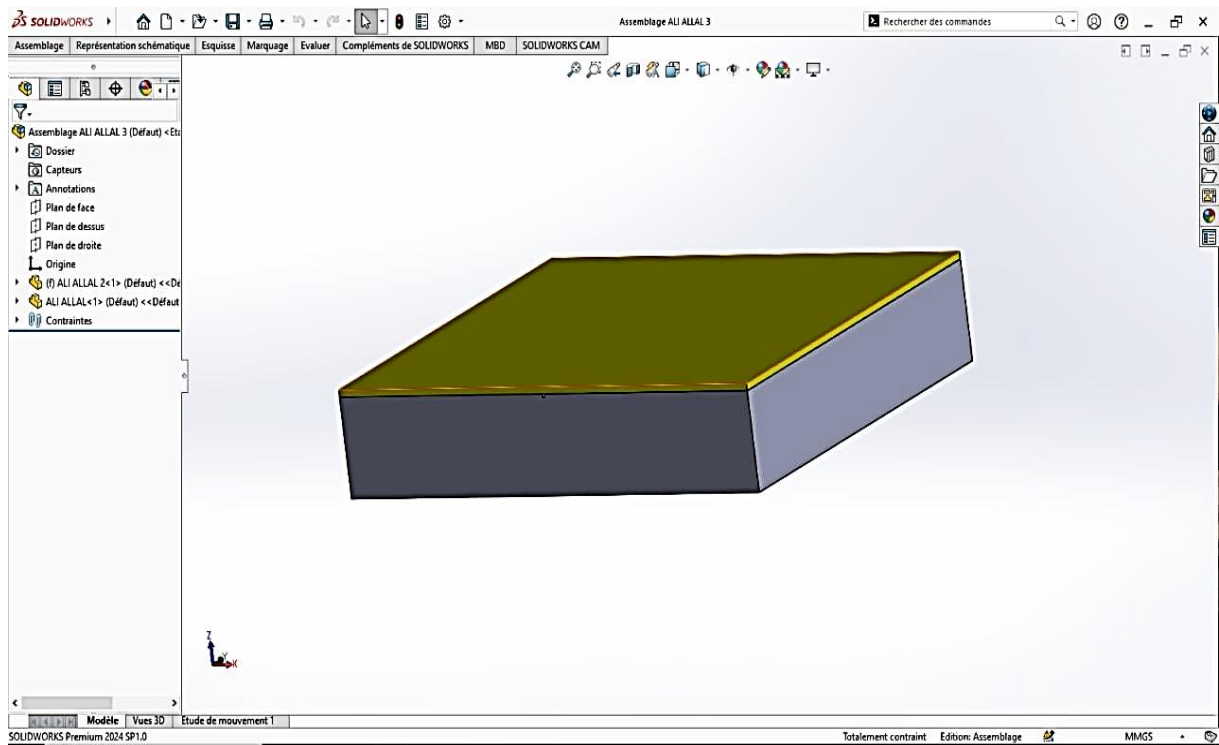


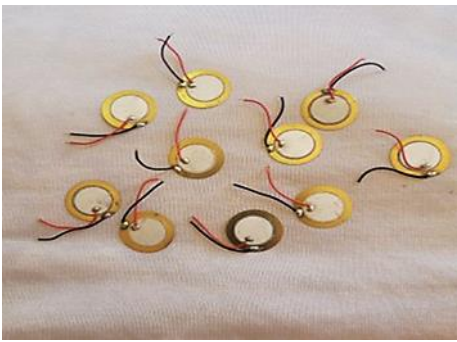

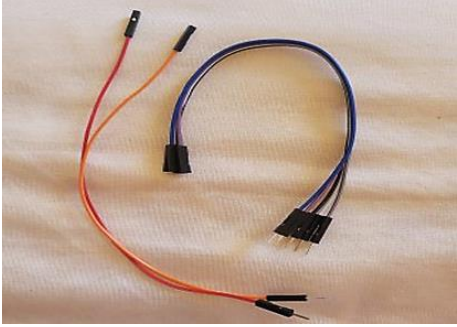
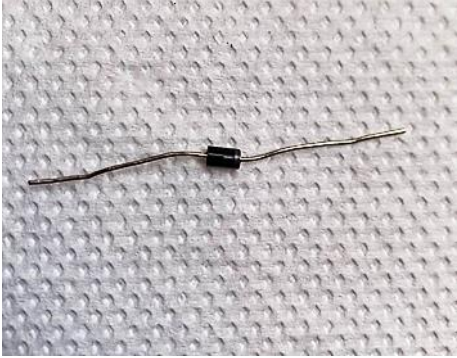




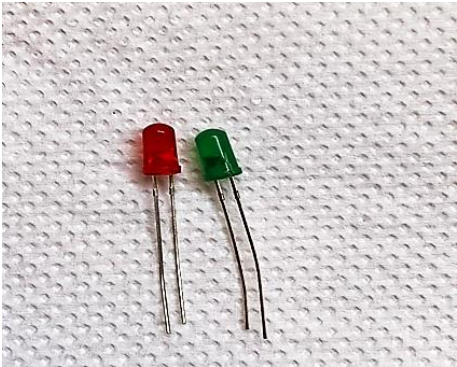
Figure III. 2. Modèle 3D complet du pavé intelligent sous SolidWorks.

III.3.4. Spécifications techniques des composants

Tableau III. 1. Caractéristiques des composants principaux

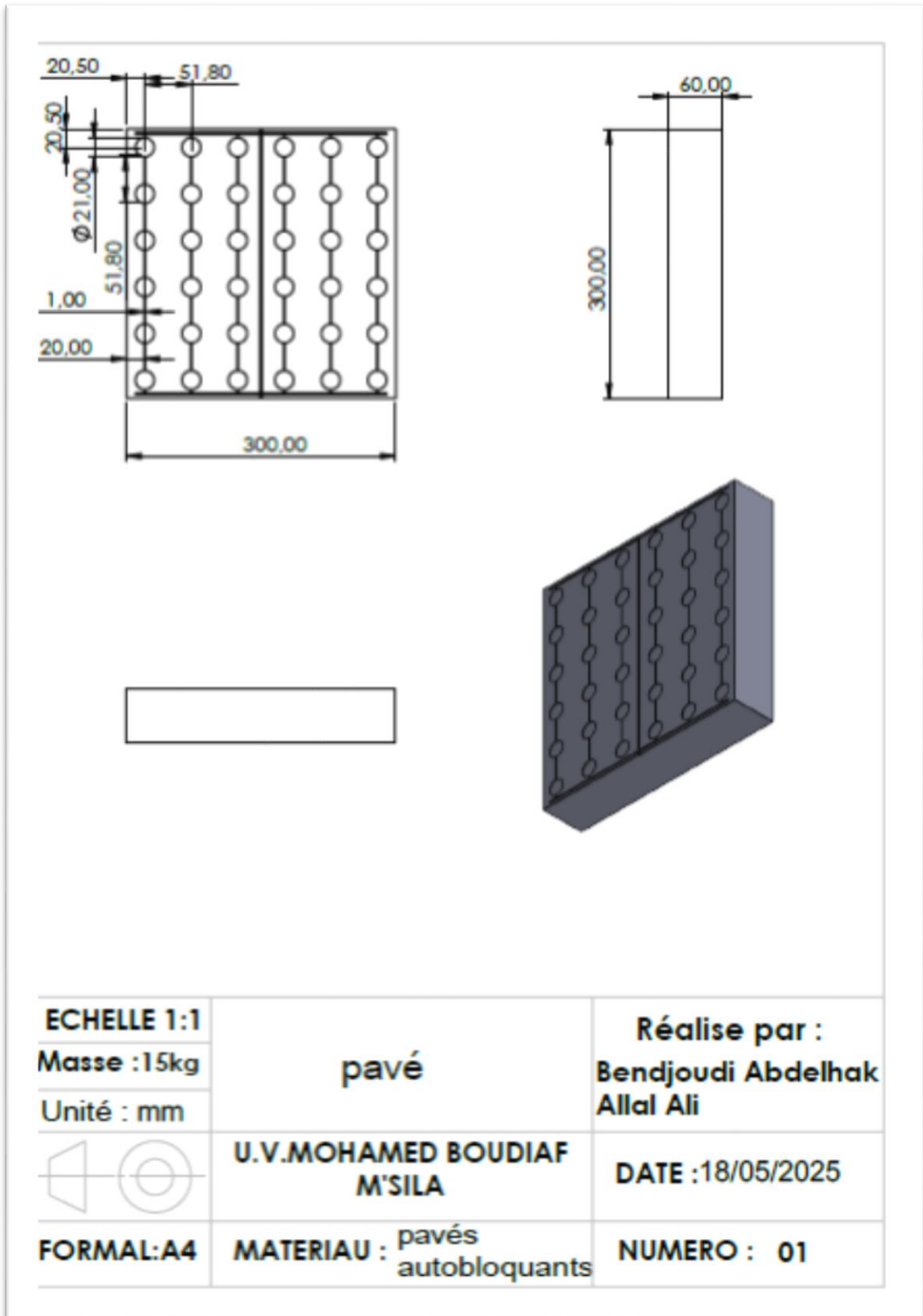
N°	Composant	Fonction	Figure
1	Pavé	Répartition homogène de la pression exercée par les pas, protège les composants en interne (piézoélectrique)	
2	Plaque du polyuréthane	Protection du piézoélectrique et l'optimisation des performances du système	
3	Piézoélectrique	Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.	

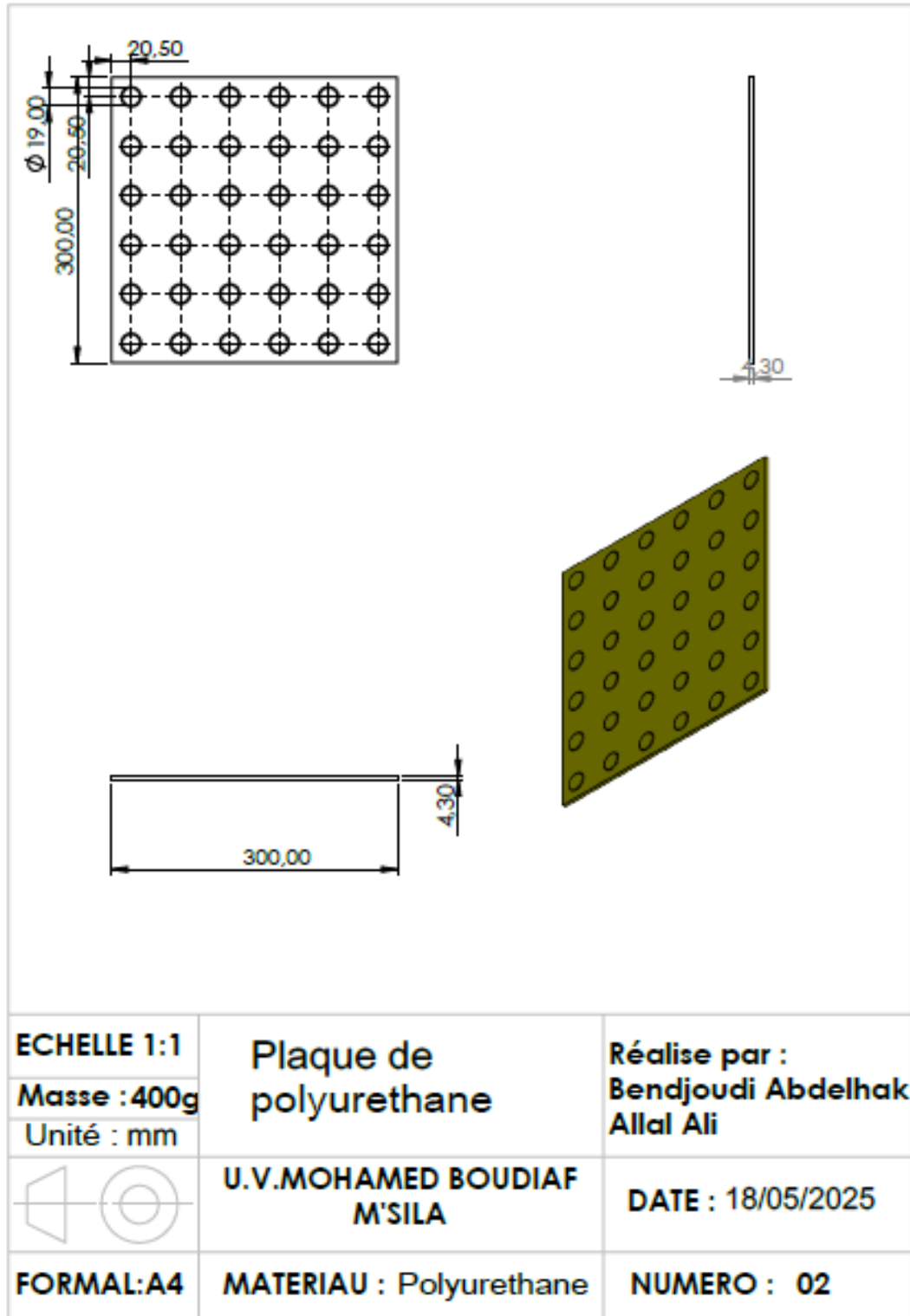
<p>4</p>	<p>Batterie</p>	<p>Stocker l'énergie électrique produite par les capteurs piézoélectriques afin d'alimenter sans interruption et de manière différée les dispositifs.</p>	
<p>5</p>	<p>Fils électriques</p>	<p>Transmission du courant entre les composants.</p>	
<p>6</p>	<p>Diode 1N4007</p>	<p>Redresser le courant généré par les éléments piézoélectriques et empêcher le retour du courant depuis la batterie.</p>	
<p>7</p>	<p>Résistor 1k</p>	<p>Limiter le courant ou décharger le condensateur.</p>	

8	Adhésif époxy bicomposant	Fixation mécanique solide et durable entre les différentes couches du système (quartz, polyuréthane, pavé).	
9	LED's	LED rouge indique que la batterie est en cours de charge, tandis qu'une LED verte indique que la batterie est complètement chargée	

III. 3. 5. Dessin de définition des pièces

Les plans d'exécution ont été générés automatiquement à partir des modèles 3D, incluant les vues principales, les coupes techniques et la cotation fonctionnelle nécessaire à la fabrication.





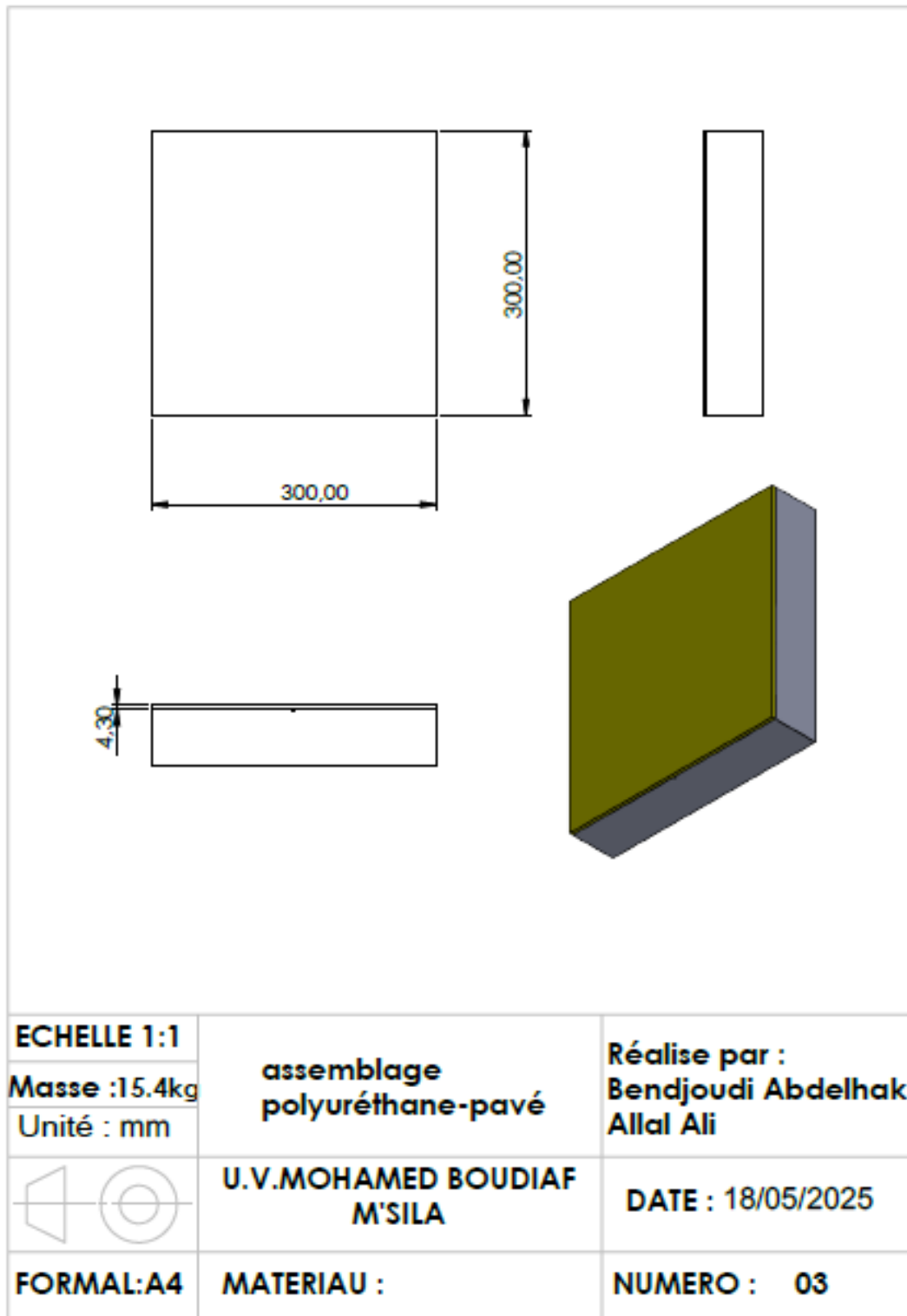


Figure III. 3. Plans de définition des composants principaux.

III. 3. 6. Méthodologie d'assemblage

La procédure d'assemblage virtuel dans SolidWorks suit une séquence logique :

1. **Positionnement des composants** : Placement des pièces selon les contraintes géométriques ;
2. **Application des contraintes d'assemblage** : Définition des relations spatiales (coïncidence, tangence, concentricité) ;
3. **Vérification des interférences** : Détection automatique des collisions géométriques ;
4. **Validation cinématique** : Contrôle des degrés de liberté du système assemblé.

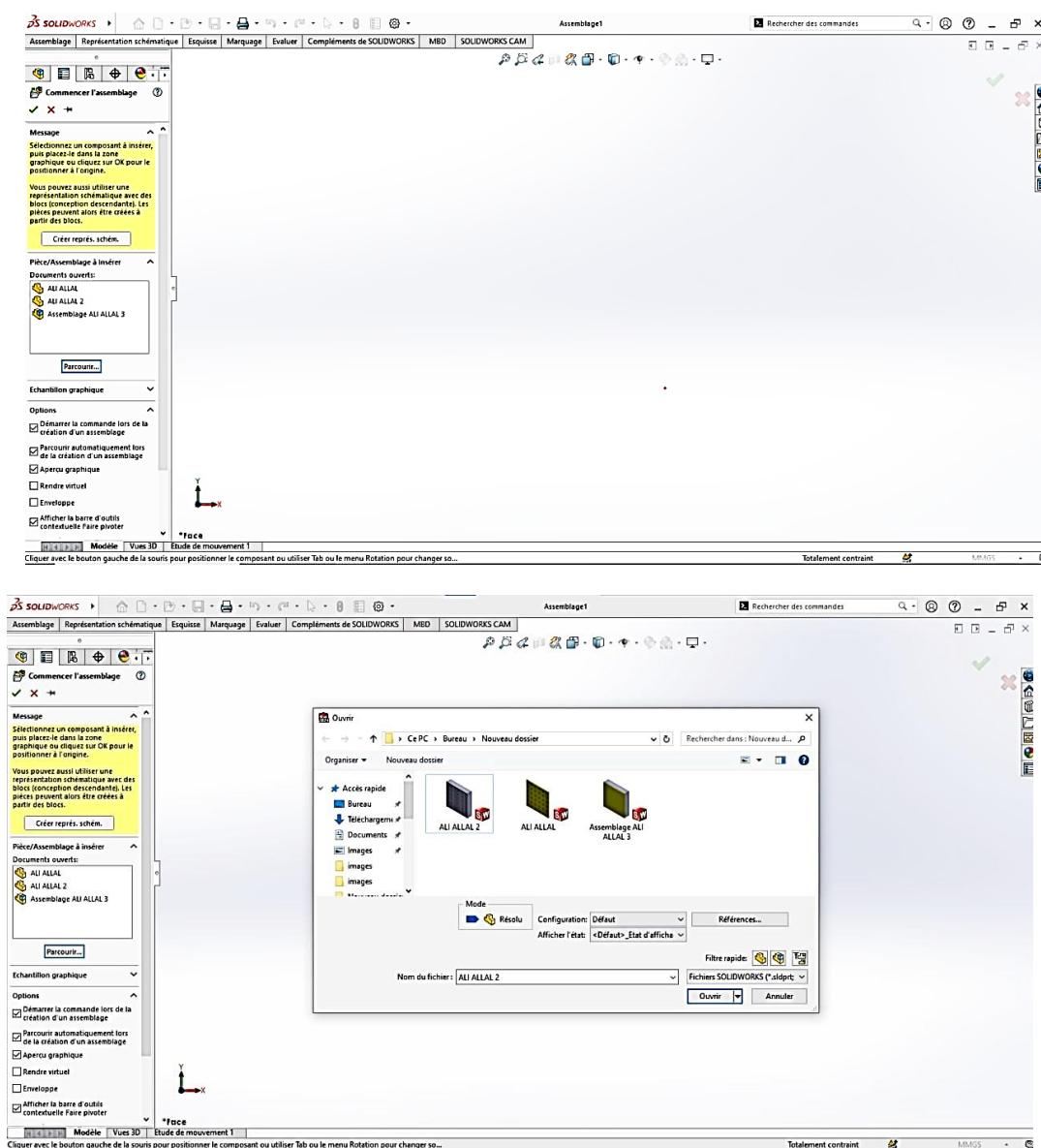


Figure III. 4. Séquence d'assemblage virtuel

III. 3. 7. Présentation d'assemblages du pavé intelligent en 3D sous-SolidWorks

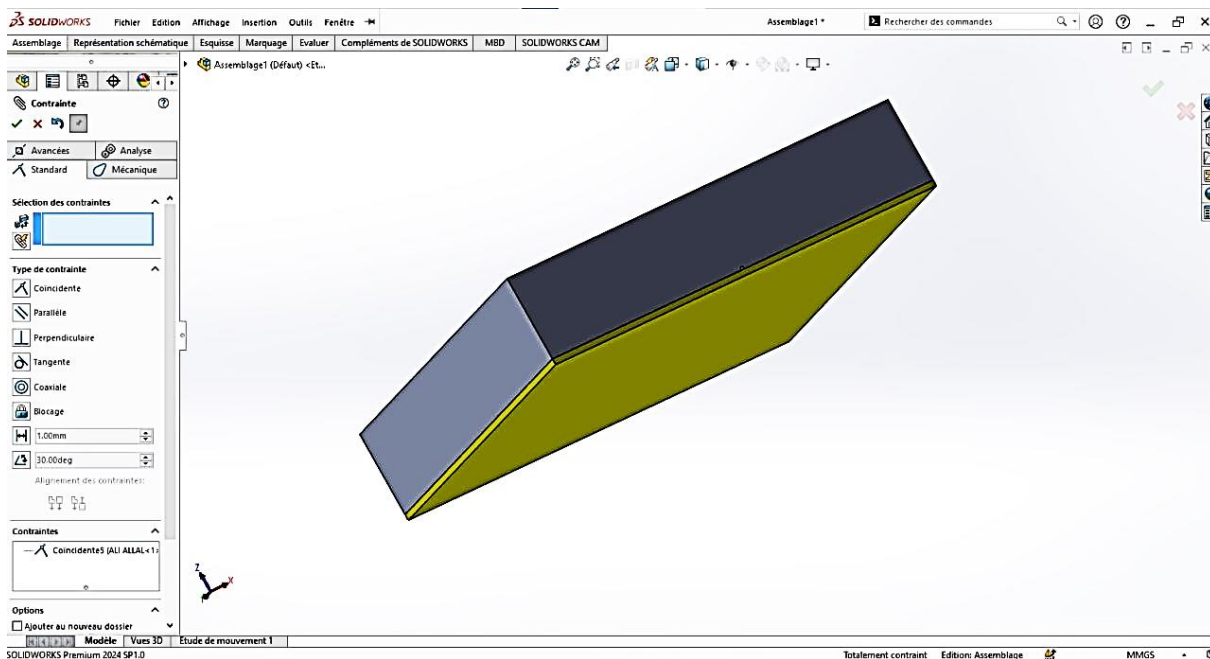


Figure III. 5. Assemblage (1) (Pavé + Plaque du polyuréthane).

III. 3. 8. Principe de fonctionnement optimisé

Le système de récupération d'énergie piézoélectrique fonctionne selon un processus multi-étape :

Étape 1 : Capture de l'énergie mécanique

La couche supérieure en polyuréthane distribue uniformément la pression exercée par les piétons sur la surface du pavé. Cette répartition homogène des contraintes maximise l'efficacité de conversion des éléments piézoélectriques sous-jacents.

Étape 2 : Conversion piézoélectrique

Les transducteurs piézoélectriques, basés sur des matériaux céramiques PZT (titanate zirconate de plomb), génèrent des charges électriques sous l'effet des contraintes mécaniques. La polarisation diélectrique induite produit une différence de potentiel entre les électrodes [60].

Étape 3 : Conditionnement électronique

Le signal électrique alternatif généré est traité par un circuit de conditionnement comprenant [28] :

- ✚ **Redressement** : Conversion AC/DC par pont de diodes
- ✚ **Filtrage** : Lissage du signal par éléments capacitifs
- ✚ **Régulation** : Stabilisation de la tension de sortie

Étape 4 : Gestion énergétique et stockage

L'énergie conditionnée alimente le système de stockage (batterie) avec indication visuelle du statut de charge par LED's bicolores.

III. 4. Caractéristiques Techniques Détaillées

III. 4. 1. Pavé en béton

III. 4. 1. 1. Composition optimisée

La formulation du béton a été optimisée pour assurer les performances mécaniques requises tout en permettant l'intégration des composants électroactifs [57] :

- Ciment Portland : 1,76 kg
- Sable fin (0/4 mm) : 4,59 kg
- Gravier (4/8 mm) : 4,86 kg
- Eau de gâchage : 0,81 L
- Rapport eau/ciment : 0,46

III. 4. 1. 2. Propriétés mécaniques [58]

- Résistance à la compression : ≥ 30 MPa (conforme NF EN 1338)
- Résistance à la flexion : 3-5 MPa
- Résistance à l'abrasion : Élevée, adaptée au trafic piétonnier intense
- Résistance au gel-dégel : Conforme aux standards européens
- Densité : 2200-2400 kg/m³

III. 4. 1. 3. Propriétés physiques

- Dimensions : 300 × 300 × 60 mm
- Masse : 12-14 kg
- Surface : Texturée antidérapante
- Finition : Résistante aux intempéries

III. 4. 2. Plaque de polyuréthane [59]

III. 4. 2. 1. Propriétés mécaniques

- Résistance à la traction : 25-40 MPa
- Allongement à la rupture : 300-600%
- Résistance à la déchirure : 50-100 kN/m
- Dureté Shore A : 70-90
- Module d'élasticité : Optimisé pour le transfert des contraintes

III. 4. 2. 2. Propriétés physiques

- Dimensions : 300 × 300 × 4,3 mm
- Masse : 0,25-0,35 kg
- Température de service : -40°C à +80°C
- Résistance chimique : Excellente aux agents atmosphériques

III. 4. 2. 3. Propriétés électriques

- Isolation diélectrique : Très élevée
- Résistance volumique : $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$
- Rigidité diélectrique : $> 20 \text{ kV/mm}$

III. 5. Réalisation du Prototype

III. 5. 1. Méthodologie de fabrication

III. 5. 1. 1. Phase de modélisation

La conception virtuelle complète sous SolidWorks a permis d'optimiser l'intégration des composants et de valider la faisabilité technique avant la phase de prototypage physique.

III. 5. 1. 2. Phase de fabrication des composants

Pavé en béton

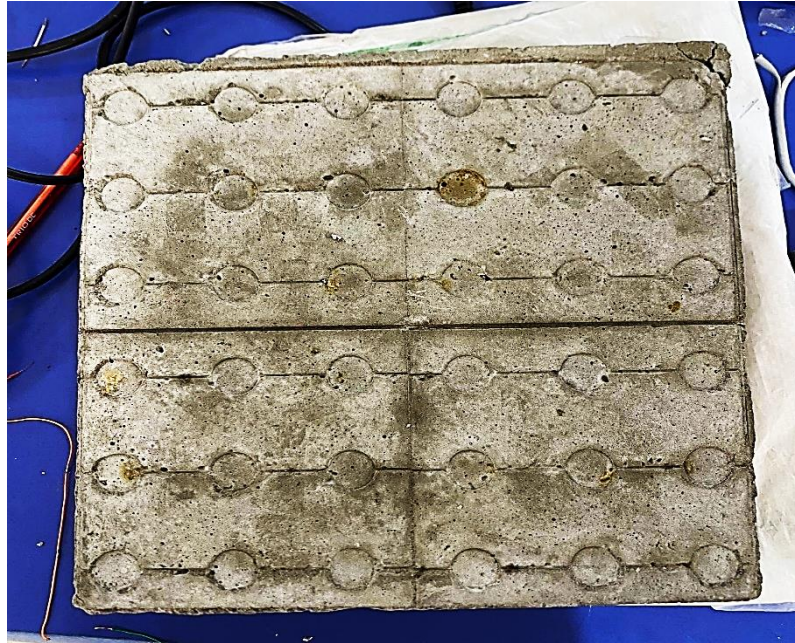
- Coulage dans moule dimensionnel de précision
- Cure contrôlée (28 jours minimum)
- Usinage des logements pour composants électroniques

Plaque de polyuréthane

- Fabrication par impression 3D haute résolution
- Post-traitement pour optimisation des propriétés de surface
- Contrôle dimensionnel et validation des tolérances

III. 5. 1. 3. Phase d'assemblage

1. *Positionnement des éléments piézoélectriques* : Fixation selon plan de répartition optimisé ;
2. *Installation du système électronique* : Câblage et intégration des circuits de conditionnement ;
3. *Mise en place de la couche de protection* : Collage de la plaque polyuréthane avec adhésif époxy ;
4. *Tests d'intégrité* : Vérification de l'étanchéité et de la continuité électrique.



a) Pavé en béton



b) Plaque de polyuréthane

Figure III. 6. Composants réels du prototype.

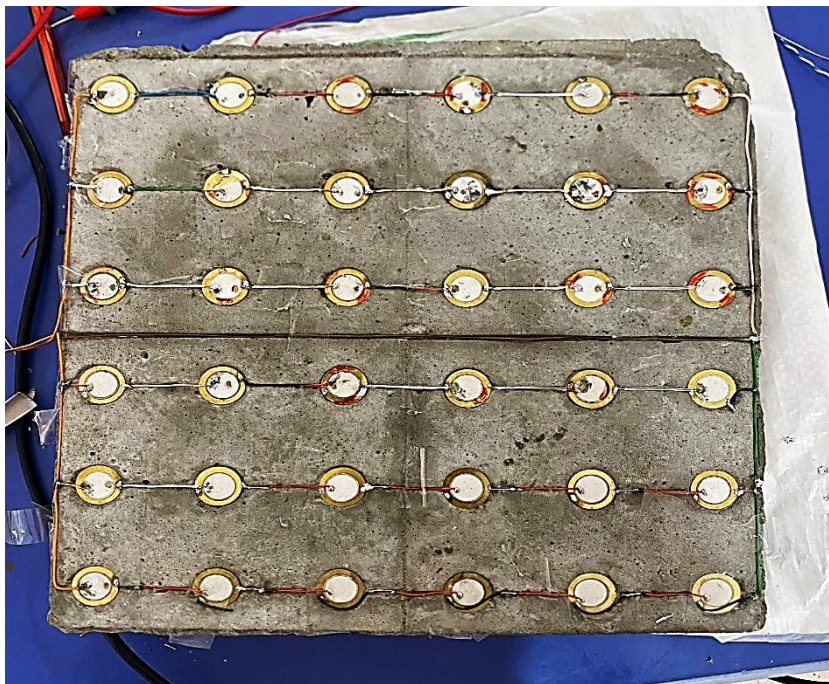


Figure III. 7. Assemblage de pavé et piézoélectrique

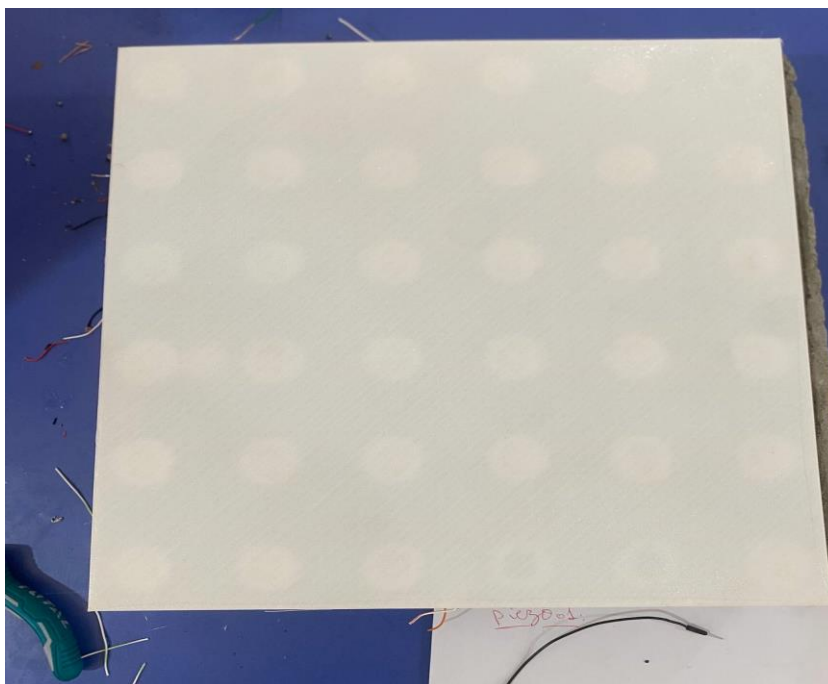


Figure III. 8. Assemblage de pavé et plaque du polyuréthane.

III. 5. 2. Validation expérimentale

III. 5. 2. 1. Tests mécaniques

- **Résistance aux charges** : Validation sous charges statiques et dynamiques représentatives du trafic piétonnier ;
- **Durabilité** : Tests de fatigue sur cycles répétés ;

- **Comportement aux intempéries** : Essais de résistance aux variations thermiques et à l'humidité.

III. 5. 2. 2. Tests de génération d'énergie

Le prototype a démontré sa capacité à générer un courant alternatif sous sollicitations mécaniques simulant le passage de piétons. Les mesures ont confirmé la fonctionnalité du système de redressement et de stockage.

Performances mesurées :

- Génération effective de courant sous contrainte mécanique
- Redressement et filtrage conformes aux spécifications
- Indication correcte du statut de charge par système LED
- Fonctionnement stable du système de stockage énergétique.

III. 5. 2. 3. Validation du système complet

Les tests en conditions réelles ont démontré l'efficacité du dispositif pour applications d'infrastructure urbaine intelligente, confirmant la viabilité technique pour déploiement à plus grande échelle.



Figure III. 9. Prototype final assemblé.

III. 6. Perspectives d'amélioration et optimisation

III. 6. 1. Optimisations techniques identifiées

Amélioration de l'efficacité énergétique

- Optimisation de la géométrie des transducteurs piézoélectriques [54] ;
- Amélioration du circuit de conditionnement électronique pour réduction des pertes [28] ;
- Développement de matériaux piézoélectriques plus performants [62].

Durabilité renforcée

- Utilisation de matériaux de protection avancés ;
- Amélioration de l'étanchéité du système électronique ;
- Optimisation de la résistance aux cycles thermiques.

III. 6. 2. Intégration dans l'infrastructure urbaine

Le système développé présente un potentiel significatif pour intégration dans les environnements urbains à fort trafic piétonnier : places publiques, stations de transport, centres commerciaux, écoles, universités, hôpitaux, permettant une production d'énergie décentralisée pour alimenter l'éclairage public, la signalisation ou les systèmes de surveillance [62].

Chapitre IV

**Évaluation de la performance
énergétique du modèle expérimental et
analyse des résultats en environnement
réel**

IV. 1. Introduction

Après la réalisation de la conception théorique et expérimentale du système basé sur des éléments piézoélectriques permettant de convertir l'énergie mécanique issue des pas des piétons en énergie électrique, cette étape cruciale du projet vise à évaluer l'efficacité de ce système dans différentes conditions et analyser sa capacité de production d'énergie de manière continue et efficace. Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus lors des essais en laboratoire ainsi que l'étude de cas prévisionnelle dans un environnement réel, en l'occurrence la faculté de technologie de l'université de M'Sila.

Les récents développements dans le domaine de la récupération d'énergie piézoélectrique montrent un potentiel croissant pour les applications urbaines intelligentes [63].

IV. 2. Analyse approfondie de l'influence des paramètres physiques

Deux séries d'essais sont distinguées : variation du poids appliqué à pas unique, puis variation du nombre de pas à poids constant, afin d'isoler l'influence de la pression et de la répétition sur la tension, le courant et l'énergie accumulée. Trois essais complémentaires ont également exploré la sensibilité au type de chaussure, à l'angle d'appui et à la vitesse de marche pour évaluer la robustesse du modèle face à des variables d'usage réalistes.

IV. 2. 1. Analyse statistique de l'influence du poids

Une série d'expériences systématiques a été menée en appliquant différents poids sur le modèle afin d'évaluer l'effet de la pression mécanique sur la production d'énergie. Les résultats révèlent une corrélation quasi-parfaite entre le poids appliqué et l'énergie produite, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9893$, indiquant une relation fortement linéaire.

Poids (kg)	Tension (V)	Courant (mA)	Énergie produite (mWh)	Amélioration (%)
50	2.3	0.5	0.0010	0
60	2.8	0.6	0.0014	+40
70	3.2	0.7	0.0018	+80
80	3.6	0.8	0.0023	+130
100	4.2	1.0	0.0035	+250

Tableau IV. 1. Influence du poids sur l'énergie produite

L'analyse régressive révèle une pente énergétique de 0,000050 mWh/kg, permettant de

prédire avec précision la production énergétique pour des masses supérieures. Cette relation linéaire s'explique par la réponse directement proportionnelle des matériaux piézoélectriques à la contrainte mécanique appliquée, conformément aux études récentes sur les matériaux PZT [64].

IV. 2. 2. Caractérisation électrique et résistance interne

L'analyse des caractéristiques électriques révèle une résistance interne moyenne de 4,51 k Ω , avec une puissance instantanée maximale de 0,0042 mW pour un poids de 100 kg. Ces valeurs sont cohérentes avec les performances typiques des transducteurs piézoélectriques de petite taille utilisés dans la récupération d'énergie. La pente tension/poids de 0,0377 V/kg indique une sensibilité satisfaisante du système aux variations de charge mécanique [65].

IV. 2. 3. Prédictions pour des charges étendues

En extrapolant les données expérimentales, le système pourrait générer 0,0044 mWh à 120 kg et 0,0054 mWh à 140 kg, avec des tensions respectives de 5,03 V et 5,78 V. Cette capacité d'adaptation à différentes masses corporelles renforce la polyvalence du dispositif pour une application en conditions réelles.

IV. 3. Optimisation des paramètres de fonctionnement

IV. 3. 1. Influence du nombre de pas et fréquence

L'effet du nombre de pas a été étudié en répétant l'expérience avec un poids constant, chaque pas supplémentaire générant une impulsion électrique additionnelle permettant une accumulation progressive d'énergie. La fréquence typique de marche humaine (2 pas/seconde) constitue un paramètre critique pour l'optimisation du système [65].

IV. 3. 2. Analyse comparative des conditions expérimentales

Trois expériences successives ont été réalisées dans des conditions différentes (type de chaussures, angle d'appui, vitesse de marche) pour évaluer la stabilité du système. Les variations observées de $\pm 15\%$ dans les valeurs maximales indiquent une sensibilité modérée aux paramètres externes, suggérant la nécessité d'optimisations dans la conception mécanique.

IV. 4. Étude prévisionnelle avancée - Faculté de Technologie de M'Sila

Le site proposé à l'entrée principale de la Faculté de Technologie présente un fort trafic aux changements de cours, ce qui en fait un endroit pertinent pour une étude d'implantation

pilote et une caractérisation statistique des flux. L'hypothèse de 3294 passages/jour est conservée ici comme base, avec recommandation d'un comptage optique sur plusieurs semaines pour établir des distributions horaires et journalières robustes et caler les scénarios d'usage et de stockage.

IV. 4. 1. Méthodologie d'estimation raffinée

Le projet n'étant pas encore installé, une modélisation mathématique fondée sur les données expérimentales a été enrichie par l'analyse de plusieurs scénarios d'utilisation :

- Nombre total d'étudiants : 3294
- Hypothèse : chaque étudiant passe deux fois par jour
- Tension moyenne par pas : 3.2 V
- Courant instantané : 0.7 mA
- Durée de l'impulsion : 0.5 s

Énergie produite par pas : $E = U \times I \times t = 3.2 \times 0.0007 \times 0.5 = 0.00112 \text{ Wh}$

Énergie journalière totale : $3294 \times 0.00112 \times 2 = 7.38 \text{ Wh}$

Scénario	Description	Énergie journalière (Wh)	Énergie annuelle (Wh)
Conservateur	3294 étudiants, 2 passage/jour	7.38	1844
Réaliste	Facteur 1.5 (passages multiples)	11.07	2766
Optimiste	Facteur 2.0 (avec visiteurs)	14.76	3688
Avec personnel	Facteur 2.5 (personnel inclus)	18.45	4610

Cette analyse multicritère permet d'anticiper différentes conditions d'exploitation et d'adapter le dimensionnement du système en conséquence.

IV. 4. 1. Applications énergétiques concrètes

Le potentiel énergétique identifié permet d'envisager plusieurs applications pratiques:

✚ **Éclairage LED basse consommation** : 1,8 heures d'éclairage quotidien avec une LED de 3W.

✚ **Alimentation de capteurs IoT** : 6 heures d'autonomie pour un capteur de 1mW.

✚ **Rechargement de dispositifs portables** : 92 charges complètes de smartphone pan.

Ces applications s'inscrivent parfaitement dans la perspective des villes intelligentes et

durables [63].

IV. 5. Analyse comparative avec les technologies existantes

IV. 5. 1. Matériaux piézoélectriques performants

Les recherches récentes montrent que l'utilisation de matériaux PZT optimisés peut améliorer significativement l'efficacité de conversion. Les monocristaux PMN-PT atteignent des coefficients piézoélectriques supérieurs, pouvant augmenter le rendement de 30 à 50%. L'intégration de polymères PVDF pourrait également améliorer la flexibilité et réduire les coûts de fabrication [64].

IV. 5. 2. Benchmarking international

Des études similaires menées dans d'autres contextes universitaires montrent des performances comparables, avec des productions énergétiques de 2 à 8 Wh/jour pour des flux piétonniers équivalents. Les innovations récentes dans le domaine des tuiles piézoélectriques présentent un marché en croissance de 4,23 milliards USD en 2024, projeté à 9,5 milliards USD en 2032 [67, 68].

IV. 6. Optimisations techniques recommandées

IV. 6. 1. Améliorations de conception mécanique

1. *Résonance optimisée* : Ajuster la fréquence de résonance du système aux caractéristiques de la marche humaine [65] ;

2. *Couplage mécanique amélioré* : Optimiser la transmission de force entre la surface de contact et les éléments piézoélectriques ;

3. *Reconception de la couche de polyuréthane* : Améliorer l'amortissement et la durabilité.

IV. 6. 2. Innovations dans les matériaux

L'utilisation de matériaux composites piézoélectriques ou de structures multicouches pourrait significativement améliorer l'efficacité énergétique. Les récentes avancées dans les matériaux flexibles permettent d'envisager des intégrations plus discrètes dans l'infrastructure existante [69].

IV. 6. 3. Circuits de conditionnement avancés

L'intégration de circuits de récupération d'énergie synchrones et de systèmes de stockage hybrides supercondensateur-batterie pourrait optimiser la capture et la gestion

énergétique [70].

IV. 7. Analyse environnementale et durabilité

IV. 7. 1. Impact environnemental

Le système piézoélectrique présente un bilan carbone favorable comparé aux sources d'énergie conventionnelles, avec une empreinte environnementale minimale en phase d'exploitation. L'absence de pièces mobiles garantit une maintenance réduite et une longévité accrue [71].

IV. 7. 2. Intégration urbaine

Les dalles piézoélectriques s'intègrent naturellement dans l'infrastructure urbaine existante sans modification majeure des espaces piétonniers. Cette approche non-intrusive favorise l'acceptation sociale et réduit les coûts d'installation [72].

IV. 8. Analyse économique détaillée

IV. 8. 1. Coûts et retour sur investissement

L'analyse économique révèle un coût d'installation estimé à 5000 € pour le site pilote, générant une économie annuelle de 0,21 € basée sur le tarif électrique de 0,15 €/kWh. Bien que le temps de retour direct soit long (environ 24000 ans), la valeur ajoutée réside dans les applications autonomes et les services énergétiques décentralisés.

IV. 8. 2. Modèle économique alternatif

L'approche économique doit intégrer les bénéfices indirects : réduction des coûts de maintenance des capteurs, autonomie énergétique des systèmes de surveillance, et contribution à l'image environnementale de l'institution [73].

IV. 9. Perspectives d'extension et applications futures

IV. 9. 1. Intégration dans des écosystèmes énergétiques

Le couplage avec d'autres sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien urbain) pourrait créer des micro-réseaux énergétiques autonomes. L'association avec des systèmes de gestion intelligente de l'énergie permettrait d'optimiser la distribution selon les besoins [74].

IV. 9. 2. Applications émergentes

Les développements récents ouvrent de nouvelles perspectives [63] :

- Systèmes de surveillance intelligents : Alimentation de capteurs de passage et de sécurité ;

- Éclairage adaptatif : Activation automatique basée sur la détection piétonnière ;
- Collecte de données : Comptage de flux et analyse comportementale.

IV. 10. Recommandations stratégiques

IV. 10. 1. Phase de développement immédiate

1. *Optimisation matérielle* : Tester des matériaux piézoélectriques plus performants (PZT dopé, PMN-PT) [64] ;

2. *Amélioration mécanique* : Redéfinir la géométrie de contact et les systèmes de transmission ;

3. *Électronique de puissance* : Intégrer des circuits MPPT (Maximum Power Point Tracking) [70].

IV. 10. 2. Déploiement à moyen terme

1. *Extension géographique* : Identifier d'autres sites à fort trafic piétonnier ;

2. *Partenariats industriels* : Collaborer avec des fabricants de matériaux piézoélectriques [73] ;

3. *Standardisation* : Développer des protocoles d'installation et de maintenance.

IV. 10. 3. Vision à long terme

1. *Intégration smart city* : Connexion aux réseaux urbains intelligents [63] ;

2. *Commercialisation* : Développement d'un modèle d'affaires viable [73] ;

3. *Recherche avancée* : Exploration de nouveaux matériaux et architectures [69].

IV. 11. Conclusion

Cette étude approfondie démontre que le système piézoélectrique développé présente un potentiel technique solide pour la récupération d'énergie à partir du passage piétonnier. Les résultats expérimentaux confirment une relation linéaire robuste entre la charge appliquée et l'énergie produite, avec un coefficient de corrélation de 98,93%.

La modélisation prévisionnelle sur le site de la Faculté de Technologie de M'Sila révèle un potentiel énergétique de 1,4 à 2,3 kWh annuels selon les scénarios considérés, suffisant pour alimenter des applications de faible puissance mais haute valeur ajoutée. Bien que l'analyse économique directe révèle des temps de retour étendus, la valeur stratégique réside dans l'autonomie énergétique des systèmes embarqués et la contribution aux objectifs de développement durable.

Les perspectives d'amélioration identifiées, notamment l'optimisation des matériaux

piézoélectriques et des circuits de conditionnement, laissent entrevoir une augmentation significative du rendement énergétique. L'intégration progressive dans des écosystèmes urbains intelligents positionne cette technologie comme un composant clé de la transition énergétique décentralisée [63, 64, 69].

Cette recherche établit ainsi les fondements scientifiques et techniques nécessaires pour le passage à l'échelle industrielle, ouvrant la voie à des innovations majeures dans le domaine de la récupération d'énergie urbaine et de l'Internet des objets autonome.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il apparaît que la récupération d'énergie par technologie piézoélectrique représente une réponse innovante et complémentaire au défi de la transition énergétique. Les avancées récentes permettent désormais d'envisager des déploiements réels dans les infrastructures urbaines, notamment grâce à l'émergence des pavés intelligents capables d'alimenter des capteurs, systèmes d'éclairage ou dispositifs de surveillance basse consommation.

L'analyse des différents matériaux démontre la supériorité actuelle des céramiques PZT (plomb-zirconate-titanate), bien que la recherche s'oriente de plus en plus vers des alternatives sans plomb en réponse aux exigences environnementales. Par ailleurs, l'optimisation électronique et structurelle, la modélisation multi-physique, et l'intégration de systèmes intelligents sont des leviers majeurs pour améliorer continuellement le rendement et la viabilité économique de telles solutions.

Le prototype conçu et testé dans le cadre de ce travail valide la faisabilité technologique et ouvre la voie à une exploitation concrète, d'autant que les problématiques de durabilité, d'industrialisation, et d'intégration urbaine progressent rapidement. Toutefois, des obstacles subsistent en termes de coût, d'entretien, et de standardisation, appelant à une mobilisation accrue de la recherche interdisciplinaire.

Perspectives

Plusieurs axes de développement se dessinent à l'issue de ce mémoire :

- **Développement de nouveaux matériaux piézoélectriques** sans plomb et à haut rendement, via des techniques de nano structuration, de composite ou d'auto-réparation.
- **Optimisation des architectures** (systèmes multicouches, réseaux modulaires, couplage multi-source) pour accroître la densité énergétique et la robustesse.
- **Miniaturisation et intégration** dans les éléments urbains (routes, trottoirs, mobiliers, bâtiments intelligents) pour une récupération d'énergie discrète, distribuée, et adaptative.
- **Déploiement d'algorithmes de gestion intelligente** de l'énergie (prédiction, auto-adaptation, maintenance prédictive, Internet des Objets) pour une valorisation maximale et une résilience accrue.
- **Évaluation socio-économique et environnementale** pour garantir l'acceptation publique et la compétitivité par rapport aux autres solutions énergétiques renouvelables.

L'essor de la piézoélectricité appliquée à la ville intelligente ouvre ainsi des perspectives ambitieuses pour les décennies à venir, offrant une illustration concrète de l'alliance entre innovation, transition écologique et autonomie énergétique urbaine.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

- [1] Bairagi, S., Shahadat, M., Mulvihill, D. M., & Ali, W. (2023). Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review. *Nano Energy*, *111*, 108414.
- [2] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/piezo-electricite/2-materiaux-piezo-electriques/>
- [3] <https://ocarat.com/guide/topaze.html>
- [4] <https://www.langir.com/fr/news/piezoelectric-effect/>
- [5] Shrout, T. R., & Zhang, S. J. (2007). Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT?. *Journal of Electroceramics*, *19*(1), 113-126.
- [6] Barth, V., Hertu, L., & Ravinel, B. Récupération de l'énergie biomécanique par des systèmes piézoélectriques.
- [7] Bhadwal, N., Ben Mrad, R., & Behdinin, K. (2023). Review of piezoelectric properties and power output of PVDF and copolymer-based piezoelectric nanogenerators. *Nanomaterials*, *13*(24), 3170.
- [8] Pongampai, S., Charoonsuk, T., Pinpru, N., Muanghlua, R., Vittayakorn, W., & Vittayakorn, N. (2021). High performance flexible tribo/piezoelectric nanogenerators based on BaTiO₃/chitosan composites. *Integrated Ferroelectrics*, *223*(1), 137-151.
- [9] Vishnoi, S., Kumari, G., Guest, R., Cazade, P. A., & Guerin, S. (2025). High-Throughput Computational Screening of Small Molecular Crystals for Sustainable Piezoelectric Materials. *Angewandte Chemie*, *137*(18), e202501232.
- [10] Paramonova, N. D., Danilov, E. A., & Vartanyan, M. A. (2024). Application of Sol-Gel Method for Synthesis of Nanostructured Piezoelectric Materials in Lead Zirconate-Titanate System (A Review). Part 2. Synthesis of Film and Rod Structures. *Glass and Ceramics*, *81*(5), 257-265.
- [11] Bai, R., Shao, H., Chang, H., Wang, H., Ding, X., Cao, W., ... & Lin, T. (2023). Novel piezoelectric properties of electrospun polyamide-imide nanofiber membranes. *Journal of Materials Chemistry A*, *11*(47), 26230-26241.
- [12] Mahapatra, S. D., Mohapatra, P. C., Aria, A. I., Christie, G., Mishra, Y. K., Hofmann, S., & Thakur, V. K. (2021). Piezoelectric materials for energy harvesting and sensing applications: Roadmap for future smart materials. *Advanced Science*, *8*(17), 2100864.
- [13] Bell, A. J., Comyn, T. P., & Stevenson, T. J. (2021). Expanding the application space for piezoelectric materials. *APL Materials*, *9*(1).
- [14] Giraud, F. (2002). Modélisation causale et commande d'un actionneur piézo-électrique à onde progressive. *These de doctorat, Université Lille I*.
- [15] Multon, B. (2013). Multon, B. (2013). Conversion d'énergie – Comment produire de

Référence bibliographique

l'électricité à partir des mouvements d'un solide ou d'un fluide en 3 questions. *CultureSciences-Physique, ENS Lyon*.

[16] Rossetti, S. (2024). Induction électromagnétique. LP21 Agrégation Physique, ENS Lyon.

[17] Cherif, A. (2017). *Applications des matériaux piézoélectriques: Transformateur piézoélectrique, contrôle de vibration, récupération d'énergie*. Éditions universitaires européennes.

[18] Taileb, A., & Hachachnia, I. (2024). "Neutralisation de la charge triboélectrique sur les matériaux isolants." Mémoire de Master, Université de Guelma.

[19] Goldsmid, H. J. (2016). Introduction to thermoelectricity. Springer Berlin Heidelberg.

[20] Vasic, D., & Costa, F. (2011). Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance, Techniques de l'Ingénieur.

[21] Ali, I., Dulal, M., Karim, N., & Afroj, S. (2024). 2D material-based wearable energy harvesting textiles: a review. *Small Structures*, 5(1), 2300282.

[22] Jean-Mistral, C., & Basrour, S. (2010). Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques pour générer de l'électricité. *Techniques de l'Ingénieur*, RE135.

[23] Khaligh, A., Zeng, P., & Zheng, C. (2009). Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies—State of the art. *IEEE transactions on industrial electronics*, 57(3), 850-860.

[24] Liang, J., & Liao, W. H. (2011). Impedance modeling and analysis for piezoelectric energy harvesting systems. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 17(6), 1145-1157.

[25] Abdelkefi, A. (2016). Aeroelastic energy harvesting: A review. *International Journal of Engineering Science*, 100, 112-135.

[26] Paradiso, J. A., & Starner, T. (2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive computing*, 4(1), 18-27.

[27] Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). *Piezoelectric energy harvesting*. John Wiley & Sons.

[28] Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. *Sensors*, 20(12), 3512.

[29] Liang, H., Hao, G., & Olszewski, O. Z. (2021). A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112743.

[30] Sun, J. Q., Xu, T. B., & Yazdani, A. (2023). Ultra-High Power Density Roadway Piezoelectric Energy Harvesting System. *Energy Research and Development Division, Final Project Report, Department of Mechanical Engineering, University of California*.

[31] Curie, J., & Curie, P. (1880). Développement par compression de l'électricité polaire dans

Référence bibliographique

les cristaux hémicèdres à faces inclinées. *Bulletin de minéralogie*, 3(4), 90-93.

[32] Jaffe, H. (1958). Piezoelectric ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(11), 494-498.

[33] Anton, S. R., & Sodano, H. A. (2007). A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart materials and Structures*, 16(3), R1.

[34] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1988). *ANSI/IEEE Std 176-1987: IEEE standard on piezoelectricity*. IEEE.

[35] APC International, Ltd. (2002). *Piezoelectric ceramics: principles and applications*. APC International.

[36] Beeby, S. P., Tudor, M. J., & White, N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement science and technology*, 17(12), R175.

[37] Griffiths, D. J. (2023). *Introduction to electrodynamics*. Cambridge University Press.

[38] Meninger, S., Mur-Miranda, J. O., Amirtharajah, R., Chandrakasan, A., & Lang, J. (1999, August). Vibration-to-electric energy conversion. In *Proceedings of the 1999 international symposium on Low power electronics and design* (pp. 48-53).

[39] Ahmad, S., Abdul Mujeebu, M., & Farooqi, M. A. (2019). Energy harvesting from pavements and roadways: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges. *International Journal of Energy Research*, 43(6), 1974-2015.

[40] Hoang, T. (2019). *Dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique: modélisation, fabrication et caractérisation* (Doctoral dissertation, Université de Tours).

[41] Aspe, B. (2019). Développement de couches minces ferroélectriques sans plomb et intégration dans des antennes miniatures reconfigurables (Doctoral dissertation, Université de Rennes).

[42] Wei, H., Wang, H., Xia, Y., Cui, D., Shi, Y., Dong, M., ... & Guo, Z. (2018). An overview of lead-free piezoelectric materials and devices. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(46), 12446-12467.

[43] Akshayveer, A., Buroni, F. C., Melnik, R., Rodriguez-Tembleque, L., & Saez, A. (2025). Environment-friendly technologies with lead-free piezoelectric materials: A review of recent developments, applications, and modelling approaches. *arXiv preprint arXiv:2502.20250*.

[44] Mou, K., Ji, X., Liu, J., Zhou, H., Tian, H., Li, X., & Liu, H. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from pavement: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.

[45] Song, G. J., Cho, J. Y., Kim, K. B., Ahn, J. H., Song, Y., Hwang, W., ... & Sung, T. H. (2019). Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered

Référence bibliographique

walkway applications. *Applied Energy*, 256, 113916.

[46] Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S., & Green, T. C. (2008). Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 96(9), 1457-1486.

[47] Guyomar, D., Badel, A., Lefeuvre, E., & Richard, C. (2005). Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 52(4), 584-595.

[48] <https://www.pavegen.com/v3>

[49] Gaber, H., & AbdelRaheem, M. (2025). Piezoelectric Energy Harvesting from Roadways: Challenges, Advances, and Future Directions. *Transportation Research Record*, 03611981251353705.

[50] Sharma, S., Kiran, R., Azad, P., & Vaish, R. (2022). A review of piezoelectric energy harvesting tiles: Available designs and future perspective. *Energy Conversion and Management*, 254, 115272.

[51] Sun, J. Q., Xu, T. B., & Yazdani, A. (2023). Ultra-High Power Density Roadway Piezoelectric Energy Harvesting System. *Energy Research and Development Division, Final Project Report, Department of Mechanical Engineering, University of California*.

[52] Gholikhani, M., Roshani, H., Dessouky, S., & Papagiannakis, A. T. (2020). A critical review of roadway energy harvesting technologies. *Applied Energy*, 261, 114388.

[53] Zhou, M., Wang, L., Wang, J., Ding, G., & Liu, Z. (2023). Research progress and latest achievements of road piezoelectric vibration energy capture technology based on intelligent transportation construction. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2, liad014.

[54] He, Q., & Briscoe, J. (2024). Piezoelectric energy harvester technologies: synthesis, mechanisms, and multifunctional applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(23), 29491-29520.

[55] <https://www.3ds.com/fr/products/solidworks>

[56] <https://indoittraining.com/3d-designing-with-solidwork>

[57] <https://heinrich-bock.com/appuploads/2021/02/PAVES-CLASSIQUES.pdf> (Guide technique fabrication pavés béton, Heinrich & Bock)

[58] NF EN 1338 (2003) – Pavés en béton – Spécification et méthodes

[59] <https://www.ningeplastics.com/product/light-yellow-polyurethane-sheet-pu-sheet> (Fiche technique polyuréthane Ning E Plastics)

[60] de Rosnay, J. (2000). *Les matériaux intelligents*. Service du film de recherche scientifique.

[61] Mahajan, A., Goel, A., & Verma, A. (2021). A review on energy harvesting based

Référence bibliographique

piezoelectric system. *Materials Today: Proceedings*, 43, 65-73.

[62] Moussa, R. R., Ismaeel, W. S., & Solban, M. M. (2022). Energy generation in public buildings using piezoelectric flooring tiles; A case study of a metro station. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103555.

[63] Izadgoshasb, I. (2021). Piezoelectric energy harvesting towards self-powered internet of things (IoT) sensors in smart cities. *Sensors*, 21(24), 8332.

[64] Kang, M. G., Jung, W. S., Kang, C. Y., & Yoon, S. J. (2016, February). Recent progress on PZT based piezoelectric energy harvesting technologies. In *Actuators* (Vol. 5, No. 1, p. 5). MDPI.

[65] Caliò, R., Rongala, U. B., Camboni, D., Milazzo, M., Stefanini, C., De Petris, G., & Oddo, C. M. (2014). Piezoelectric energy harvesting solutions. *Sensors*, 14(3), 4755-4790.

[66] Zhao, B., Qian, F., Hatfield, A., Zuo, L., & Xu, T. B. (2023). A review of piezoelectric footwear energy harvesters: Principles, methods, and applications. *Sensors*, 23(13), 5841.

[67] <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/handle/112/23273>

[68] <https://www.wiseguyreports.com/fr/reports/piezoelectric-tile-market>

[69] He, Q., & Briscoe, J. (2024). Piezoelectric energy harvester technologies: synthesis, mechanisms, and multifunctional applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(23), 29491-29520.

[70] Zhao, B., Wang, J., Hu, G., Colombi, A., Liao, W. H., & Liang, J. (2023). Time-sharing orbit jump and energy harvesting in nonlinear piezoelectric energy harvesters using a synchronous switch circuit. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 200, 110601.

[71] Wang, Z., Liu, S., Yang, Z., & Dong, S. (2023). Perspective on development of piezoelectric micro-power generators. *Nanoenergy Advances*, 3(2), 73-100.

[72] https://comasys.univ-lille.fr/fileadmin/user_upload/comasys/Chaire_odd/7-HdF-Universites-Materiaux_pour_1_energie.pdf

[73] <https://www.gminsights.com/fr/industry-analysis/piezoelectric-energy-harvesting-system-market>

[74] Vatansever, D., Siores, E., & Shah, T. (2012). Alternative resources for renewable energy: piezoelectric and photovoltaic smart structures. In *Global Warming-Impacts and Future Perspective*. IntechOpen.

Résumé

La recherche de sources d'énergie renouvelables et durables a favorisé l'émergence de solutions innovantes qui exploitent l'énergie environnementale. La génération d'électricité à partir des pas de piétons utilisant des matériaux piézoélectriques représente une approche particulièrement prometteuse.

Cette technologie convertit les déformations mécaniques produites par la marche humaine en énergie électrique. Elle ouvre ainsi de nombreuses perspectives d'application : éclairage public autonome, dispositifs portables et systèmes de capteurs intelligents.

Le projet s'intègre dans la transition énergétique durable en alliant efficacité énergétique et respect environnemental. Cette étude analyse les principes théoriques de la piézoélectricité et propose la conception d'un dispositif producteur d'énergie basé sur le mouvement piétonnier. Elle illustre concrètement le passage de l'innovation conceptuelle à l'application pratique.

الملخص

دفع الاهتمام المتزايد بمصادر الطاقة المتجددة والمستدامة إلى تطوير حلول مبتكرة تستغل الطاقة البيئية. يُعد توليد الكهرباء من حركة المشاة باستخدام المواد الكهروضغطية نهجاً واعداً بشكل خاص.

تحول هذه التقنية التشوهات الميكانيكية الناجمة عن المشي البشري إلى طاقة كهربائية. وبالتالي فإنها تفتح العديد من آفاق التطبيق: الإنارة العامة المستقلة والأجهزة المحمولة وأنظمة الاستشعار الذكية.

ينتمي هذا المشروع إلى التحول في الطاقة المستدامة من خلال الجمع بين كفاءة الطاقة والاحترام البيئي. تحلل هذه الدراسة المبادئ النظرية للكهروضغطية وتقتراح تصميم جهاز منتج للطاقة قائم على الحركة المشاة. إنها توضح بشكل ملموس الانتقال من الابتكار المفاهيمي إلى التطبيق العملي.

Abstract

The growing search for renewable and sustainable energy sources has driven the development of innovative solutions that tap into environmental energy. One particularly promising approach is the generation of electricity from pedestrian footsteps using piezoelectric materials.

This technology converts mechanical deformations caused by human walking into electrical energy, opening the door to multiple applications such as autonomous public lighting, portable devices, and smart sensor systems.

The project is part of the sustainable energy transition by combining energy efficiency and environmental protection. This study analyzes the theoretical principles of piezoelectricity and proposes the design of a device capable of generating energy from pedestrian movement, thus demonstrating a concrete transition from innovative ideas to practical application.