

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

MÉMOIRE

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

En : **Automatique**

Spécialité : **Automatique et informatique industrielle**

Par : - **Belayadi Sif Allah**

- **Ben yahia Abdelbasset**

Sujet

Amélioration des performances d'un micro-générateur autonome

Soutenu publiquement, le 01/06/ 2024, devant le jury composé de :

Benhadouga Seddik

Professeur **Univ-BBA** Président

Khenfer Riadh

MCA **Univ-BBA** Examineur

Meddad Mounir

Professeur **Univ-BBA** Encadrant



Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude envers le bon Dieu tout-puissant et miséricordieux pour nous avoir accordé la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadrant, le Professeur Mounir MEDDAD, enseignant à l'Université Mohamed el Bachir el Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, pour son encadrement et son accompagnement tout au long de la préparation de notre mémoire d'étude, nous aidons ainsi à donner le meilleur de nous-mêmes.

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont eu l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous les professeurs qui, par leurs conseils et leurs efforts tout au long de ces années, ont contribué à notre formation. Leur qualité d'enseignement nous a été précieuse et nous sommes reconnaissants de leur présence.



Dédicaces

Je commence par exprimer ma gratitude infinie envers Allah pour m'avoir accordé la force, la patience et la guidance nécessaires pour achever ce travail.

Je dédie ce projet aux êtres les plus chers à mon cœur :

Mon très cher père **Abd Nasser**

Pour être le bon exemple de père par son soutien, ses encouragements et aides dès mes premiers pas d'études jusqu'à ce jour, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

La meilleure de toutes les mères **Zohra**

Qui m'a soutenu durant toute ma vie, qui m'a aidé durant mes années d'études, pour son amour infini et sa bienveillance jour et nuit.

Je souhaite prouver mon grand remerciement qui ne sera jamais suffisant à elle que j'espère la rendre fière par ce travail.

Ma chère sœur **Ibtihal**

Sa présence et s'encouragement ont été une source d'inspiration inestimable. Puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.

A mon binôme **Abdelbasset**.

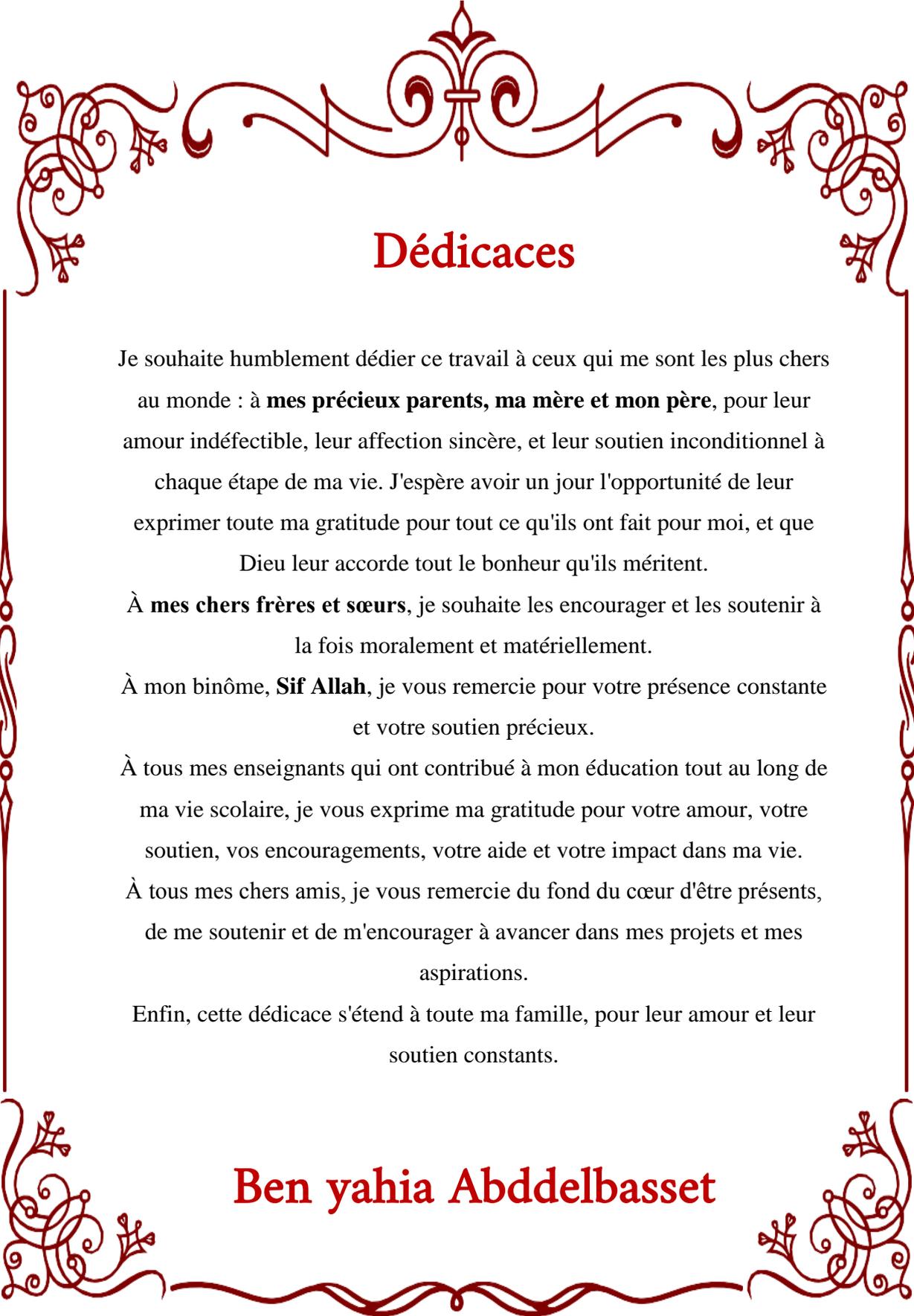
Mes amis pour leur soutien inébranlable et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

A tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire. Pour tout leur amour, leur soutien, leur encouragement, leur assistance et leur présence dans ma vie.

A tous les autres que je n'ai pas cités mais à qui je pense aussi.



Belayadi Sif Allah



Dédicaces

Je souhaite humblement dédier ce travail à ceux qui me sont les plus chers au monde : à **mes précieux parents, ma mère et mon père**, pour leur amour indéfectible, leur affection sincère, et leur soutien inconditionnel à chaque étape de ma vie. J'espère avoir un jour l'opportunité de leur exprimer toute ma gratitude pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, et que Dieu leur accorde tout le bonheur qu'ils méritent.

À **mes chers frères et sœurs**, je souhaite les encourager et les soutenir à la fois moralement et matériellement.

À mon binôme, **Sif Allah**, je vous remercie pour votre présence constante et votre soutien précieux.

À tous mes enseignants qui ont contribué à mon éducation tout au long de ma vie scolaire, je vous exprime ma gratitude pour votre amour, votre soutien, vos encouragements, votre aide et votre impact dans ma vie.

À tous mes chers amis, je vous remercie du fond du cœur d'être présents, de me soutenir et de m'encourager à avancer dans mes projets et mes aspirations.

Enfin, cette dédicace s'étend à toute ma famille, pour leur amour et leur soutien constants.

Ben yahia Abdelbasset

Résumé :

Le concept de récupération d'énergie implique généralement l'exploitation de l'énergie environnante, qui est principalement utilisée pour générer de l'électricité afin d'alimenter des appareils électroniques de petite taille fonctionnant de manière autonome. Dans de nombreux domaines tels que le domicile, le transport, le domaine médical, militaire et industriel, il existe une demande croissante de systèmes intelligents. Cette demande est en partie due aux progrès actuels dans le développement de matériaux intelligents dotés de propriétés mécaniques et électriques spécifiques. Parmi ces matériaux, les polymères piézoélectriques comme le PVDF et les matériaux électromagnétiques présentent des caractéristiques attrayantes par rapport aux matériaux inorganiques, car ils sont légers, peu coûteux et flexibles. L'objectif de cette étude est d'améliorer le potentiel des polymères pour l'application de récupération d'énergie mécanique ambiante.

Mots-clés: récupération d'énergie mécanique, Polymère électro actifs, piézoélectricité, électromagnétiques, Vêtements intelligent.

Abstract:

The concept of energy harvesting generally involves harnessing ambient energy, primarily to generate electricity for powering small electronic devices operating autonomously. In various fields such as home, transportation, medical, military, and industrial sectors, there is a growing demand for smart systems. This demand is partly driven by current advancements in developing smart materials with specific mechanical and electrical properties. Among these materials, piezoelectric polymers like PVDF and electromagnetic materials exhibit attractive characteristics compared to inorganic materials, as they are lightweight, inexpensive, and flexible. The objective of this study is to enhance the potential of polymers for ambient mechanical energy harvesting applications.

Keywords: mechanical energy harvesting, Electro-active polymers, piezoelectricity, electromagnetic, E-textile.

الملخص:

فكرة استخراج الطاقة تشمل عموماً استغلال الطاقة المحيطة، حيث تستخدم أساساً لتوليد الكهرباء لتشغيل الأجهزة الإلكترونية الصغيرة التي تعمل بشكل مستقل. في مجالات عدة مثل المنزل، والنقل، والطب، والعسكرية، والصناعة، هناك طلب متزايد على الأنظمة الذكية. ويعود جزء من هذا الطلب إلى التقدّمات الحالية في تطوير المواد الذكية ذات الخصائص الميكانيكية والكهربائية المحددة. من بين هذه المواد، البوليمرات البيزو كهربائية والمواد الكهرومغناطيسية تُظهر خصائصًا جذابة مقارنة بالمواد غير العضوية، لأنها خفيفة الوزن ومنخفضة التكلفة ومرنة. هدف هذه الدراسة هو تحسين إمكانيات البوليمرات لتطبيق استخراج الطاقة الميكانيكية البيئية.

الكلمات المفتاحية: استعادة الطاقة الميكانيكية، البوليمرات الكهربائية، كهر ضغطية، المواد الكهرومغناطيسية، الملابس الذكية.

Table de matière :

Liste des figures :	5
Liste des tableaux :	8
Introduction générale	9
Chapitre I : Différentes techniques de récupération d'énergie.....	12
I. Introduction :	13
I.1. Production d'énergie électrique :	13
I.2. Concept d'énergie :	13
I.2.1. Énergies non renouvelables :	14
I.2.2. Énergies renouvelables :	14
I.2.2.1. Sources d'énergie ambiante :	14
I.3. Récupération d'énergie :	15
I.3.1. Historique :	15
I.4. Source de récupération :	16
I.4.1. Récupération de l'énergie éolienne :	16
I.4.2. Récupération de l'énergie des radiations:	17
I.4.2.1. Rayonnement solaire:	17
I.4.2.2. Rayonnement infrarouge:	18
I.4.2.3. Rayonnement RF – Ondes Hertziennes – Antennes :	18
I.4.2.4. Rayonnement nucléaire :	18
I.4.3. Récupération d'énergie thermoélectrique :	19
I.4.4. Récupération d'énergie pyroélectrique:	19
I.4.5. Récupération d'énergie acoustique :	20
I.4.6. Récupération d'énergie mécanique :	20
I.4.7. Vibrations ambiantes :	20
I.4.8. Récupération de l'énergie à partir de l'activité humaine :	21
I.4.9. Récupération d'énergie biochimique :	23
I.4.10. Récupération de l'énergie à partir des vagues océaniques:	23
I.4.11. Récupération de l'énergie à partir des voies ferroviaires :	24
I.4.12. Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques ambiante :	25
I.4.12.1. Conversion électromagnétique :	25
I.4.12.2. Conversion électrostatique :	26
I.4.12.3. Conversion piézoélectrique :	27

I.5. Micro-générateur :	28
I.5.1. Définition :	28
I.5.2. Types de micro-générateur et leurs principes de fonctionnement :	28
I.5.2.1. Micro-générateur hydroélectrique:	28
I.5.2.1.1. Principe de fonctionnement:	28
I.5.2.1.2. Avantages des Micro-générateurs Hydroélectriques :	29
I.5.2.1.3. Challenges et Solutions:	29
I.5.2.2. Chaudière à micro-cogénération:	29
I.5.2.2.1. Principe de fonctionnement:	30
I.5.2.2.2. Avantages et inconvénients chaudière micro-cogénération :	30
I.5.2.3. Micro-générateur Enerbee Technologie :	31
I.5.2.3.1. Principe de fonctionnement:	31
I.5.2.3.2. Avantages de Le micro-générateur Enerbee Technologie:	32
I.6. M.I.T. Media Lab :	32
I.6.1. Touches piézoélectriques :	32
I.6.2. Chaussures piézoélectriques :	34
I.7. Conclusion :	34
Chapitre II : Généralités sur les matériaux intelligents et leurs applications	35
II. Introduction :	36
II.1. Définition des matériaux intelligents :	36
II.2. Différents types des matériaux intelligents :	36
II.2.1. Alliages à mémoire de forme:	36
II.2.1.1. Définition :	36
II.2.1.2. Historique:	37
II.2.1.3. Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme:	37
II.2.1.4. Application classique des alliages a mémoire de forme:	38
II.3. Matériaux piézoélectriques et électrostrictifs:	39
II.3.1. Phénomène de la piézoélectricité :	39
II.3.2. Principales classes de matériaux:	40
II.3.2.1. Céramiques massives:	40
II.3.2.2. Céramiques multicouches:	40
II.3.2.3. Composites piézoélectriques:	40
II.3.3. Application :	41
II.3.3.1. Structures quasi-statiques:	41

II.3.3.2. Structures résonnantes:	41
II.4. Matériaux magnétostrictifs:	41
II.4.1. Définition:.....	41
II.4.2. Historique:.....	42
II.4.3. Application:	42
II.4.3.1. Capteur magnétostrictif :	42
II.4.3.2. Émetteurs-récepteurs d’ondes élastiques:	43
II.4.3.3. Fluides électro-rhéologiques :	43
II.5. MEMS :	43
II.5.1. Définition des microsystèmes :.....	43
II.5.2. Principes physiques du microsysteme :.....	44
II.5.3. Marché des MEMS – Contexte économique :.....	44
II.6. Textile intelligent:	45
II.6.1. Applications:.....	46
II.6.1.1. Fibretronique:	46
II.6.1.1.1. Transistors en fibres organiques [78]:	47
II.6.1.1.2. Fils d’énergie solaire:.....	47
II.6.1.2. Vêtements intelligents:	47
II.6.1.2.1. Vêtements chauffants et rafraîchissants:	47
II.6.1.2.2. Vêtements communicants:	48
II.6.1.2.3. Vêtements à usage sportif:	48
II.6.1.2.4. Vêtements changeant de couleurs:	49
II.6.1.2.5. Vêtements au service de l'e-santé:.....	49
II.6.1.3. Textiles techniques et ameublement:	49
II.6.1.3.1. Applications médicales :.....	49
II.6.1.3.2. Sécurité :	50
II.6.1.3.3. Loisirs:	50
II.6.1.3.4. Militaire :	50
II.6.1.3.5. Surveillance :	50
II.6.1.3.6. Ameublement :.....	50
II.7. Conclusion :.....	51
Chapitre III : Système d’amélioration et maximisation de la puissance récupérée	52
III. Introduction :.....	53
III.1. Prototypage utilisant des polymères piézoélectriques pour maximiser la récupération	

d'énergie :.....	54
III.2. Prototype utilisant des polymères électromagnétiques pour maximiser la récupération d'énergie :.....	56
III.3. Prototype utilisant des polymères électromagnétiques et piézoélectriques (système hybride) pour maximiser la récupération d'énergie :	59
III.4. Modélisation :.....	59
III.4.1. Modélisation du système PVDF :	59
III.4.2. Simulation du système PVDF :	61
III.4.2.1. Simulation de la puissance :.....	61
III.4.2.2. Simulation de la tension :	62
III.4.3. Modélisation du système électromagnétique :	63
III.4.4. Simulation du système électromagnétique :	64
III.4.4.1. Simulation de la puissance :.....	64
III.4.4.2. Simulation de la tension :	65
III.5. Simulation du système hybride (électromagnétique et PVDF) :	66
III.5.1. Simulation de la puissance:	66
III.6. Conclusion :	66
Conclusion générale	67
Perspectives	69
Références bibliographiques	71

Liste des figures :

Chapitre I : Les différentes techniques de récupération d'énergie.

Figure I.1. Différents supports et sources d'énergie [12].

Figure I.2. Schéma de principe de l'énergie éolienne [13].

Figure I.3. Jonction P- N d'une cellule photovoltaïque [19].

Figure I.4. Structure générale d'un TEG [14].

Figure I.5. L'énergie provenant des activités humaines [23].

Figure I.6. Récupération de l'énergie humaine à travers les chaussures avec amplificateur de force hydraulique [24].

Figure I.7. Récupération de l'énergie de la marche humaine à partir du sac à dos [25].

Figure I.8. Générateur monté sur les genoux, 4,8 W (a) Montage du récupérateur sur les deux jambes et (b) Conception mécanique du récupérateur [26, 27].

Figure I.9. Chaussée de production d'énergie : (a) les récupérateurs d'énergie piézoélectrique et (b) expérience dans la sortie de la gare Marunouchi de Tokyo.

Figure I.10. Récupérateurs de l'énergie des vagues de l'océan. (a) [34] (b) [35].

Figure I.11. Récupérateur d'énergie avec redresseur de mouvement : (a) Modélisation en 3-D ; (b) Prototype [39].

Figure I.12. Générateur électromagnétique pour récupérer l'énergie [41].

Figure I.13. Schéma d'un générateur capacitif avec V_{in} – source de tension pour précharger la capacité variable, C_V – capacité variable, C_{par} – capacité parasite et C_{store} – capacité de stockage [42].

Figure I.14. Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique [42].

Figure I.15. Description des modes longitudinal et transversal [43]

Figure I.16. Système récupération d'énergie par micro-générateur hydroélectrique [48].

Figure I.17. Chaudière à micro-cogénération [49].

Figure I.18. Principe de fonctionnement du micro-générateur d'Enerbee [51].

Figure I.19. Schéma des touches du clavier Compaq (a) [46] et prototype de touches

piézoélectriques du MIT (b et c) [45].

Figure I.20. Schéma de la feuille de PVDF et du dimorphe insérés dans la chaussure [47].

Chapitre II : Généralités sur les matériaux intelligents et leurs applications.

Figure II.1. Cycle thermodynamique typique d'un alliage a mémoire de forme [57].

Figure II.2. Mécanisme de quartz qu'est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges [58].

Figure II.3. Mécanisme de la piézoélectricité directe qu'est utilisé dans les briquets pour une charge électrique qui donne feu au gaz [58].

Figure II.4. Evolution du marché des MEMS par applications [96] [97].

Figure II.5. Exemple de composition d'une fibre photovoltaïque [81].

Figure II.6. T-shirt OS by Cute Circuit intégrant un écran de LED.

Figure II.7. En flux des vêtements intelligents / U0026 connectés pour les sportifs.

Figure II.8. Le collier toSense's CoVa [88].

Figure II.9. L'exosquelette X1 utilisé pour entrainer les futures astronautes pour protéger les muscles de la microgravité [91].

Chapitre III : Système d'amélioration et maximisation de la puissance récupérée

Figure III.1. Schéma du circuit prototype de la structure classique [103].

Figure III.2. Schéma du circuit prototype de la structure améliorée [103].

Figure III.3. La configuration du système mécanique améliorée [103].

Figure III.4. Le schéma électrique équivalent simplifié [103].

Figure III.5. Système électromagnétique linéaire.

Figure III.6. Circuits équivalents du générateur électromagnétique. À gauche : forme initiale. À droite : forme modifiée.

Figure III.7. Le schéma du film PVDF et électromagnétique intégré à la chaussure.

Figure III.6. La puissance récupérée par le film PVDF.

Figure III.7: L'évolution pratique de courant et le déplacement dans la structure développée.

Figure III.8: la tension générée par le film PVDF.

Figure III.9. La puissance récupérée par le system électromagnétique.

Figure III.10. La tension générée par le system électromagnétique.

Figure III.11. La puissance récupérée par le système PVDF, système électromagnétique et le système hybride.

Liste des tableaux :

Tableau III.1. Les paramètres de film piézoélectrique PVDF.

Tableau III.2. Les paramètres de system électromagnétique.



Introduction générale



Introduction générale

La production d'énergie électrique constitue un défi majeur pour les années à venir, en raison de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques. Cette évolution laisse présager une augmentation considérable de la consommation énergétique.

Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des ressources fossiles. Toutefois, à ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront répondre aux besoins que pour quelques décennies encore, car une consommation excessive de ces ressources naturelles réduit dangereusement les réserves pour les générations futures. De plus, l'utilisation de ces énergies fossiles entraîne d'importantes émissions de CO₂, contribuant ainsi au changement climatique.

Au fil des années, des pistes de recherche ont été développées et des solutions proposées pour trouver d'autres sources de production d'énergie moins coûteuses et moins polluantes pour l'environnement. Par exemple, juste après le premier choc pétrolier en 1978, plusieurs pays, dont la France, ont commencé à investir dans l'énergie nucléaire. Cependant, l'énergie nucléaire, bien que moins chère, produit des déchets radioactifs qui restent un risque pour l'environnement et les générations futures.

Aujourd'hui, des politiques sont mises en place pour favoriser la maîtrise de nos consommations énergétiques et le développement des énergies renouvelables telles que le solaire, l'hydraulique, l'éolien et la géothermie. Ces sources d'énergie présentent un double avantage économique et écologique, étant gratuites, non polluantes et potentiellement inépuisables.

Un domaine d'activité relativement récent, datant des années 90, est celui de la récupération d'énergie ambiante, qu'elle soit mécanique, thermique, etc., notamment celle présente dans l'environnement humain. Cette récupération d'énergie vise à alimenter des appareils électroniques portables ou fixes de manière autonome sur le plan énergétique. Les puissances impliquées dans ce cas sont faibles, de l'ordre du microwatt au watt. Cette auto-alimentation est rendue possible par les avancées technologiques, notamment en matière de sobriété énergétique des appareils électroniques, ainsi que par les progrès réalisés sur les dispositifs de stockage, nécessaires pour compenser les intermittences et l'inadéquation entre production et consommation.

Les avantages de cette solution sont évidents : le fonctionnement de l'appareil n'est limité que par la présence d'une source externe et l'encombrement de l'appareil peut être réduit. En somme, la récupération d'énergie ambiante représente une voie prometteuse vers une utilisation plus efficace et durable de nos ressources énergétiques.

Introduction générale

L'objectif de cette étude est de démontrer l'utilité des vêtements intelligents, souvent désignés sous le terme de matériaux intelligents.

Le mémoire se divise en trois parties :

Le premier chapitre traite du contexte scientifique et technologique général de la récupération d'énergie, en offrant un état de l'art sur la problématique de recherche émergente concernant les sources d'énergie.

Le deuxième chapitre propose un aperçu des matériaux intelligents, incluant leurs définitions, les notions de base, les différents types de matériaux de ce genre, ainsi que leurs diverses applications et leur importance. De plus, nous présentons un bref historique des vêtements intelligents, ainsi qu'une sélection de leurs principales applications.

Enfin, le troisième chapitre aborde l'amélioration de la conversion électromécanique et présente les résultats de simulations obtenus. L'objectif de ce chapitre est d'améliorer les performances du système en exploitant les techniques développées et en les appliquant à de telles structures.

En conclusion de cet article, nous proposerons quelques pistes de développement et d'optimisation, puis nous conclurons par une synthèse des principaux points abordés.



Chapitre I

Différentes techniques de récupération d'énergie



I. Introduction :

Notre environnement regorge d'énergie sous-exploitée. Si certaines sources, comme le solaire et l'éolien, captent de plus en plus l'attention pour leur utilisation dans la production d'électricité, d'autres demeurent largement sous-estimées.

Dans ce chapitre, nous explorerons les diverses applications des systèmes de récupération de l'énergie ambiante, notamment leur utilisation dans l'alimentation des capteurs autonomes communicants. Les procédés de récupération énergétique sont variés. Nous passerons en revue les principales sources d'énergie ambiante ainsi que les processus permettant de les convertir en électricité. Notre objectif est d'alimenter des dispositifs à faible consommation énergétique.

I.1. Production d'énergie électrique :

La production d'électricité est un secteur industriel crucial qui fournit de l'énergie électrique aux fournisseurs d'électricité, lesquels la distribuent ensuite aux consommateurs via les réseaux de transport et de distribution.

Depuis la fin du XIXe siècle, l'électricité est principalement produite dans des centrales électriques. Ces installations transforment diverses sources d'énergie primaires en électricité à l'aide de générateurs électriques. Ces sources comprennent les combustibles fossiles tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, les combustibles organiques comme la biomasse et les déchets, ainsi que les énergies nucléaire et géothermique.

Au cours du XXe siècle, la croissance exponentielle de la demande énergétique mondiale a conduit à une utilisation excessive de ces sources d'énergie, entraînant une pollution atmosphérique accrue. Face à cette réalité, il devient impératif de rechercher des alternatives plus durables et respectueuses de l'environnement. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne et solaire, ont été au centre de nombreuses études et recherches [1].

I.2. Concept d'énergie :

Le concept d'énergie est étroitement lié aux notions d'action, de force et de durée. Pour réaliser une action, il faut maintenir une force constante pendant un laps de temps suffisant pour surmonter les inertie et résistances qui s'y opposent. L'énergie nécessaire pour accomplir cette action reflète à la fois l'intensité de la force appliquée et la durée pendant laquelle elle est exercée.

Initialement, le terme "énergie" était associé à une vertu morale, décrivant à la fois la force morale et physique que l'homme doit déployer pour accomplir une tâche donnée. Toutefois, le

concept d'énergie est également étudié dans des domaines tels que la physique et l'économie. En physique, il est utilisé pour décrire divers phénomènes liés à la production, la distribution et la consommation d'énergie, ainsi que les enjeux environnementaux qui y sont associés. En économie, il englobe la question des ressources énergétiques, qu'elles soient renouvelables ou non [2].

I.2.1. Énergies non renouvelables :

Les énergies non renouvelables sont produites par la combustion de matières fossiles telles que le gaz naturel, le mazout et le charbon. De plus, l'énergie nucléaire est également classée parmi les formes d'énergie non renouvelables [3].

I.2.2. Énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables proviennent de sources naturelles qui se régénèrent à un rythme dépassant leur consommation. Par exemple, la lumière solaire et le vent sont des sources qui se renouvellent continuellement. Ces ressources sont abondantes et omniprésentes autour de nous.

En revanche, les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz sont des ressources non renouvelables qui se forment sur des périodes de plusieurs centaines de millions d'années. Lorsqu'ils sont brûlés pour produire de l'énergie, ils émettent des gaz à effet de serre nocifs, notamment le dioxyde de carbone.

La production d'énergie à partir de sources renouvelables génère considérablement moins d'émissions que la combustion des combustibles fossiles. Pour faire face à la crise climatique, il est impératif de substituer progressivement les combustibles fossiles, principaux responsables des émissions actuelles, par des sources d'énergie renouvelables.

De nos jours, les énergies renouvelables sont devenues moins coûteuses dans la plupart des pays et contribuent à la création de trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles.

I.2.2.1. Sources d'énergie ambiante :

La Terre regorge de nombreuses sources d'énergie ambiante qui peuvent être converties en électricité [4] :

- Sources d'énergie naturelles : telles que le vent, les courants d'eau, les courants marins et le soleil.
- Énergie lumineuse : captée à partir de la lumière ambiante, que ce soit celle du soleil, de la lune ou d'autres sources lumineuses.

- Énergie thermique : provenant du sol (géothermie), du chauffage et des phénomènes de friction.
- Énergie mécanique : résultant de vibrations, de contraintes mécaniques, de chocs et de déformations.
- Énergie acoustique : produite par des objets vibrants tels que des instruments de musique ou des haut-parleurs.
- Corps humain : combinant à la fois une énergie mécanique et thermique naturelle produite par des organismes biologiques ou par des actions spécifiques.
- Énergie biochimique : par exemple, lorsqu'une molécule est formée par la réunion de deux atomes.
- Énergie électromagnétique : provenant de diverses sources telles que les téléphones portables, les télévisions, les radios, les satellites et d'autres systèmes de communication sans fil.

I.3. Récupération d'énergie :

La récupération d'énergie, également connue sous le terme anglais "Energy Harvesting", désigne le processus consistant à obtenir de l'énergie utilisable à partir des sources environnementales qui nous entourent.

I.3.1. Historique :

Les premières observations de la récupération d'énergie remontent à 1826, lorsque Thomas Johann Seebeck a remarqué la circulation du courant dans un circuit fermé constitué de deux métaux différents maintenus à des températures différentes [5, 6]. En 1831, Joseph Henry et Michael Faraday ont découvert le principe de l'induction électromagnétique, utilisant le magnétisme pour produire de l'électricité [7]. En octobre de la même année, Faraday a inventé le premier générateur de courant continu, composé de plaques de cuivre rotatives entre les pôles magnétiques [8]. En 1839, Edmund Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque [9]. La première grande surface d'une cellule solaire, construite par Charles Fritts en 1894, était recouverte d'une fine couche de sélénium et d'or [10].

Avec le développement de la théorie quantique de la lumière et de la physique du solide dans les années 1900 [9], l'effet photovoltaïque est devenu plus compréhensible. De plus, les études sur l'effet thermoélectrique ont été approfondies, reconnaissant leur applicabilité dans la mesure de la

température, la production d'énergie et le refroidissement [11]. En 1880, les premières observations de la récupération d'énergie prennent la forme d'un phénomène appelé piézoélectrique, démontré par Pierre et Jacques Curie à travers quelques cristaux soumis à des contraintes mécaniques [6].

I.4. Source de récupération :

Une source de récupération d'énergie désigne un phénomène physique ou chimique dont l'énergie peut être exploitée à des fins industrielles ou biophysiques. Une source d'énergie est qualifiée de "primaire" si elle provient directement d'un phénomène naturel sans subir de transformation, et de "secondaire" si elle est le résultat d'une transformation intentionnelle. Elle peut être considérée comme "renouvelable" si ses réserves ne s'épuisent pas de manière significative dans l'échelle de temps de son exploitation, ou "durable" dans un contexte écologique [12].

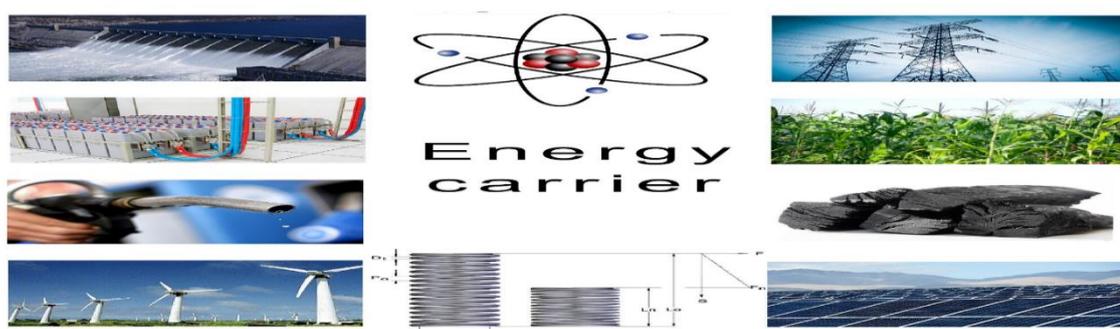


Figure I.1. Différents supports et sources d'énergie [12].

I.4.1. Récupération de l'énergie éolienne :

La récupération de l'énergie éolienne est le processus de conversion du flux d'air, tel que le vent, en électricité.

En 2021, la production mondiale d'électricité éolienne était estimée à 1 854,1 TWh par l'Institut de l'Énergie, et a atteint 2 104,8 TWh en 2022, représentant une augmentation de 13,5 %. Cette production éolienne équivaut à environ 7,2 % de la production totale d'électricité mondiale, qui était de 29 165 TWh. La Chine occupe la première place avec 36,2 % de la production éolienne mondiale, suivie par les États-Unis (20,9 %) et l'Allemagne (6 %) [13].

En 2021, la production mondiale d'électricité éolienne était de 1 864 TWh, en hausse de 16,4 % par rapport à l'année précédente, représentant ainsi 6,5 % de la production totale d'électricité [13].



Figure I.2. Figure de l'énergie éolienne [13].

I.4.2. Récupération de l'énergie des radiations:

I.4.2.1. Rayonnement solaire:

L'énergie solaire peut être transformée en électricité de deux manières principales : directement, par le biais de la technologie photovoltaïque (PV), ou indirectement par le biais des centrales solaires thermodynamiques. Les premières exploitent l'effet photoélectrique pour convertir la lumière en courant électrique, tandis que les secondes utilisent des miroirs cylindro-paraboliques pour concentrer l'énergie solaire sur un fluide caloporteur, ou bien elles dirigent la lumière solaire vers une tour solaire via des lentilles ou des miroirs.

En 2019, les installations photovoltaïques représentaient 2,5 % de la production mondiale d'électricité, tandis que les centrales solaires thermodynamiques ne comptaient que pour 0,05 % [18]. Selon les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie de 2014, l'énergie solaire devrait couvrir 16 % de la production mondiale d'électricité d'ici 2050 [19].

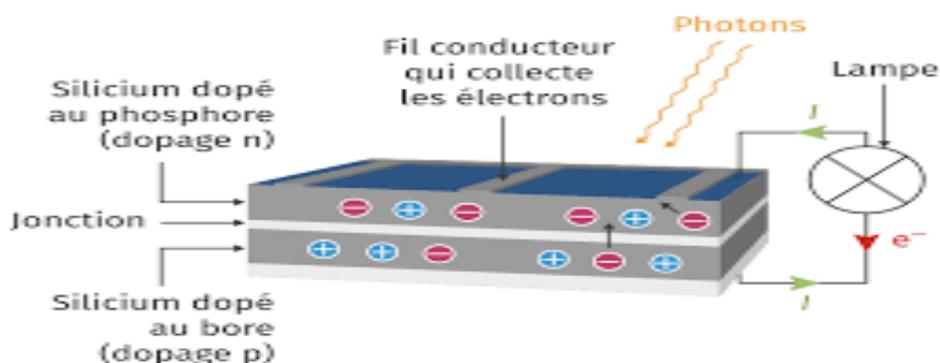


Figure I.3. Jonction P- N d'une cellule photovoltaïque [19].

I.4.2.2. Rayonnement infrarouge:

Le concept est similaire à celui de l'exploitation du rayonnement solaire, mais avec des cellules dotées d'une bande énergétique ajustée pour capturer les longueurs d'onde de l'infrarouge. Ainsi, pour rentabiliser ces systèmes de récupération d'énergie, il est impératif de placer ces cellules près de sources très chaudes ($T > 900^\circ\text{C}$). Des adaptations similaires existent également pour l'ultraviolet et les rayons X.

I.4.2.3. Rayonnement RF – Ondes Hertziennes – Antennes :

Pour exploiter l'énergie des rayonnements RF émis par les émetteurs radio, il est nécessaire de se positionner à proximité de la source émettrice de RF (à quelques mètres au maximum, car l'énergie disponible décroît en fonction de l'inverse du carré de la distance). La récupération des radiofréquences ambiantes provenant des GSM, de la radio, de la télévision, etc., semble donc insuffisante comme source d'alimentation passive.

Cependant, ce principe est prometteur pour la mise en œuvre de la téléalimentation : l'interrogation d'un capteur en approchant le lecteur/téléphone à proximité. Cette approche nécessite l'utilisation de rectennas (antennes redressantes permettant de convertir les ondes en électricité), dont la faisabilité a déjà été démontrée.

I.4.2.4. Rayonnement nucléaire :

Le rayonnement nucléaire naturel seul n'est pas suffisant pour permettre une récupération efficace de l'énergie. Pour exploiter le rayonnement nucléaire, il est nécessaire de recourir à des sources radioactives artificielles, bien que leur utilisation soit limitée en raison des risques biologiques associés.

Néanmoins, des tests ont été menés et ont démontré la viabilité de ce principe. Par exemple, un système de récupération d'énergie a été conçu en utilisant une source de radioactivité couplée à une poutre munie d'un dispositif piézoélectrique : la source radioactive émet des électrons vers la poutre. Les forces électrostatiques qui en résultent entraînent le rapprochement de la poutre vers la source radioactive ; dès qu'il y a contact, les charges sont évacuées et la poutre est rapidement relâchée, provoquant ainsi sa mise en vibration.

L'énergie est capturée en exploitant un film piézoélectrique situé au niveau de l'encastrement, transformant ainsi les vibrations de la poutre en électricité [20].

I.4.3. Récupération d'énergie thermoélectrique :

Un générateur thermoélectrique (GTE ou TEG en anglais) est une plaque munie de semi-conducteurs exploitant l'effet Seebeck pour produire de l'électricité à partir de la différence de température entre ses deux faces. Ce type de dispositif est également employé pour le refroidissement thermoélectrique [14].

L'effet utilisé, connu sous le nom d'« effet Peltier–Seebeck », tire son origine des travaux du physicien français Jean-Charles Peltier et du physicien allemand Thomas Johann Seebeck [14].

Ce composant fait généralement appel à des circuits en cuivre et à des semi-conducteurs en tellure de bismuth. Cette source d'électricité peut servir à créer un système d'alimentation autonome ou être intégrée dans un réseau en tant que générateur intermittent, d'appoint ou de charge continue [14].

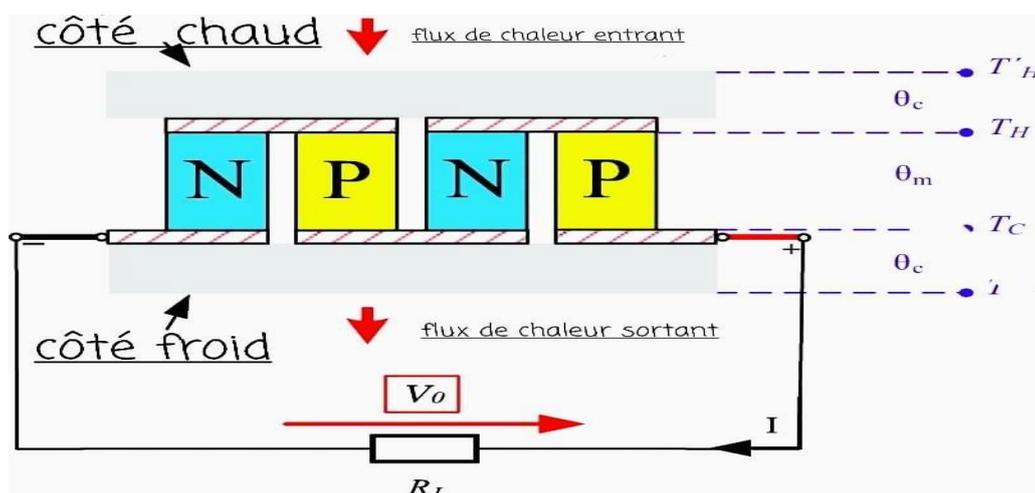


Figure I.4. Structure générale d'un TEG [14].

I.4.4. Récupération d'énergie pyroélectrique:

La pyroélectricité, dérivée du grec πῦρ (pyr) signifiant feu, désigne la capacité d'un matériau à modifier sa polarisation électrique en réponse à un changement de température. Ce phénomène engendre une différence de potentiel temporaire qui disparaît après un laps de temps déterminé par la relaxation diélectrique. Cette variation de potentiel peut induire un courant électrique, ce qui rend ces matériaux utiles dans la détection des radiations ou la production d'électricité. Ils sont particulièrement employés dans certains détecteurs infrarouges. Il est important de noter que l'effet pyroélectrique diffère de l'effet thermoélectrique, où un gradient de température constant produit une tension permanente [15].

I.4.5. Récupération d'énergie acoustique :

Il s'agit du processus de transformation des ondes sonores continues de l'environnement en énergie électrique à l'aide de transducteurs acoustiques ou de résonateurs. Toutefois, la puissance sonore récupérée est limitée, et cette énergie ne peut être captée efficacement que dans des environnements très bruyants [16] – [17].

I.4.6. Récupération d'énergie mécanique :

Il s'agit du processus de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, réalisé en exploitant divers phénomènes tels que les vibrations, les contraintes mécaniques ou la déformation des surfaces des capteurs, ainsi que des moteurs à haute tension. Le principe de la récupération d'énergie mécanique consiste à convertir l'énergie résultant du déplacement mécanique et des vibrations d'un composant de type masse-ressort, intégré au sein du transducteur, en énergie électrique [21].

I.4.7. Vibrations ambiantes :

Les vibrations mécaniques environnementales proviennent de différentes sources, telles que les machines en rotation, mais peuvent également être induites dans le sol et les murs par les véhicules ou les conditions météorologiques (vent, pluie, etc.). Ces ressources dépendent de la fréquence et de l'accélération des vibrations, cette dernière étant proportionnelle au carré de la fréquence. Ainsi, il est possible de les quantifier lorsque toutes les caractéristiques des vibrations sont connues. De plus, une autre source de ressource est celle des vibrations acoustiques. La densité de puissance d'un bruit, notée I (en $W \cdot m^{-2}$), également appelée intensité acoustique, est liée à la pression acoustique P du bruit (en Pa) et à l'impédance acoustique Z du milieu (en $Pa \cdot s \cdot m^{-1}$) par la relation suivante [22]:

$$I = \frac{P^2}{Z} \quad (I.1)$$

Dans l'air, où l'impédance acoustique est d'environ $415 Pa \cdot s \cdot m^{-1}$, la densité de puissance d'un bruit de 0 dB (correspondant au seuil d'audition) est d'environ $1 p \cdot W \cdot m^{-2}$, tandis que celle d'un bruit de 100 dB (correspondant au bruit d'un marteau-piqueur à un mètre) est d'environ $1 mW \cdot m^{-2}$ [22].

I.4.8. Récupération de l'énergie à partir de l'activité humaine :

La récupération d'énergie à partir de l'activité humaine a été examinée par Starnier & Paradiso [23], et les sources d'énergie disponibles sont résumées dans la Figure I.5. Comme indiqué dans cette figure, diverses sources peuvent être exploitées, telles que la marche, les mouvements des bras et des doigts, la respiration, la pression artérielle, etc.

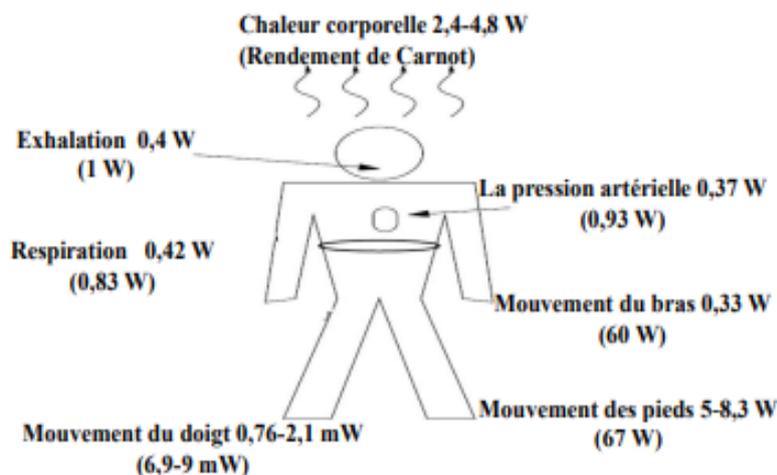


Figure I.5. L'énergie provenant des activités humaines [23].

Il est à noter que la plupart des sources d'énergie humaine offrent une faible puissance par rapport à celle obtenue par la marche. Pour remédier à cela, Antaki et al. [24] ont mis au point une chaussure génératrice d'énergie utilisant des céramiques piézoélectriques, accompagnée d'un mécanisme qui amplifie la force appliquée grâce à un système hydraulique, comme le montre la Figure I.6. Ce générateur permet de récupérer en moyenne 0,85 W d'énergie pendant la marche normale d'une personne pesant 75 kg, sans affecter son activité de marche.

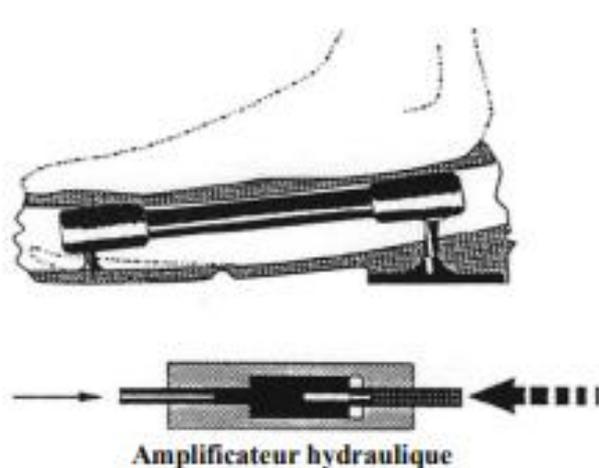


Figure I.6. Récupération de l'énergie humaine à travers les chaussures avec amplificateur de force hydraulique [24].

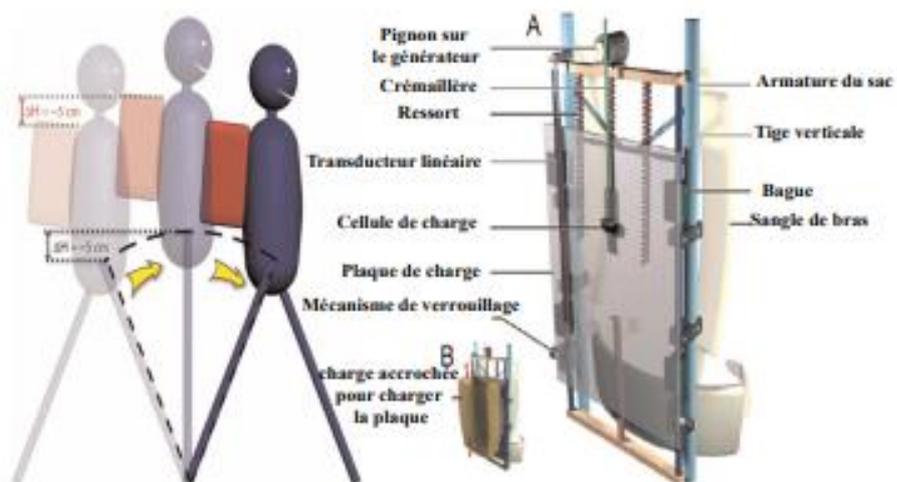


Figure I.7. Récupération de l'énergie de la marche humaine à partir du sac à dos [25].

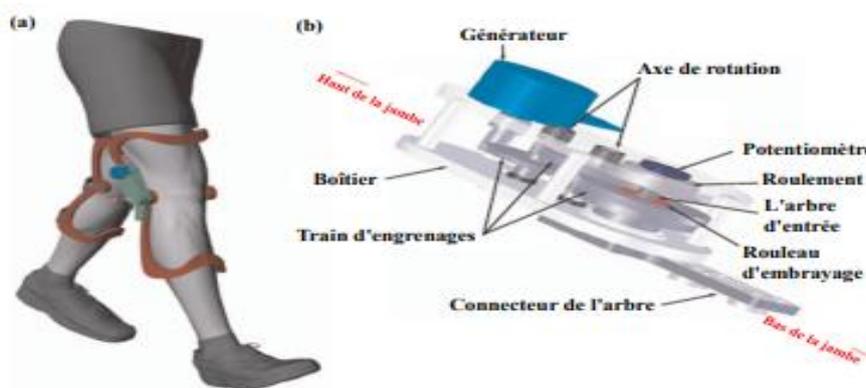


Figure I.8. Générateur monté sur les genoux, 4,8 W (a) Montage du récupérateur sur les deux jambes et (b) Conception mécanique du récupérateur [26, 27].

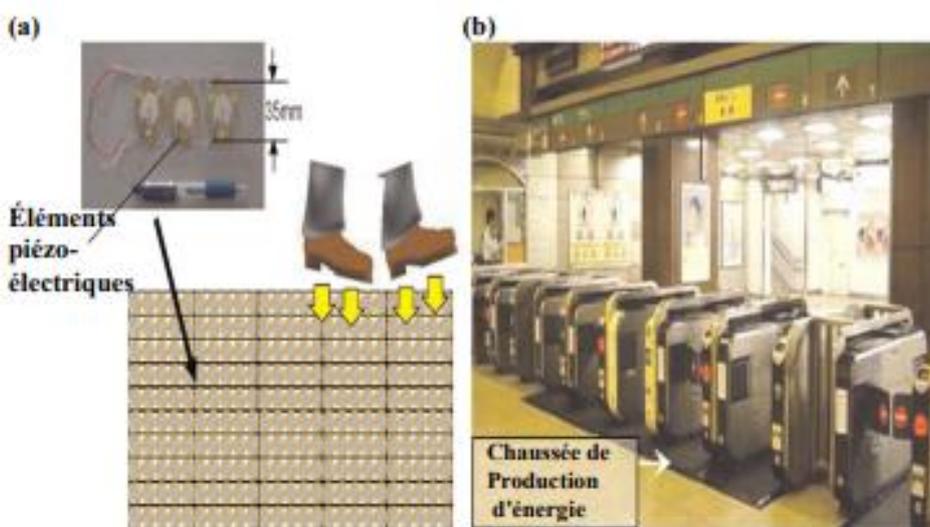


Figure I.9. Chaussée de production d'énergie : (a) les récupérateurs d'énergie piézoélectrique et (b) expérience dans la sortie de la gare Marunouchi de Tokyo.

En exploitant l'énergie humaine, Rome et al. [25] ont développé un générateur qui collecte également l'énergie de la marche humaine à travers un sac à dos, comme illustré dans la Figure I.7. Ce générateur peut récupérer jusqu'à 7,4 W de puissance.

Donelan et al. Ainsi que Li et al. [26,27] ont adopté un générateur électromagnétique avec un réducteur dans leur système de récupération d'énergie de la marche humaine, comme le montre la Figure I.8. Ils ont conçu un générateur monté sur les genoux qui n'influence pas significativement la marche humaine pendant la récupération d'énergie. Le système de contrôle permet la production d'électricité à la fin de la phase d'oscillation, lorsque les muscles des genoux fléchissent, agissant comme un frein sur les genoux.

Le centre de recherche et de développement du groupe JR East Company au Japon [28] a développé un générateur de production d'électricité basé sur des transducteurs piézoélectriques. Ce dispositif de récupération d'énergie est testé à la gare de Tokyo, comme illustré dans la Figure I.9. Il est capable d'alimenter une ampoule de 100 W pendant environ 80 minutes.

I.4.9. Récupération d'énergie biochimique :

Il s'agit du processus de conversion de l'oxygène et de substances endogènes en énergie électrique par le biais de réactions électrochimiques [29]. Plus spécifiquement, les biopiles, utilisant des enzymes actives et des catalyseurs, peuvent être employées pour convertir l'énergie biochimique en énergie électrique. Par exemple, les fluides corporels humains contiennent une variété de substances présentant un potentiel énergétique [30]. Des prototypes récemment développés démontrent la capacité de ces systèmes à alimenter des dispositifs microélectroniques [31], [32].

I.4.10. Récupération de l'énergie à partir des vagues océaniques:

L'énergie des vagues océaniques est perçue comme une source d'énergie renouvelable prometteuse, attirant l'attention de nombreux chercheurs en raison de sa capacité énergétique considérable. On estime que l'énergie des vagues peut générer environ 8000 à 80000 TWh chaque année [33].

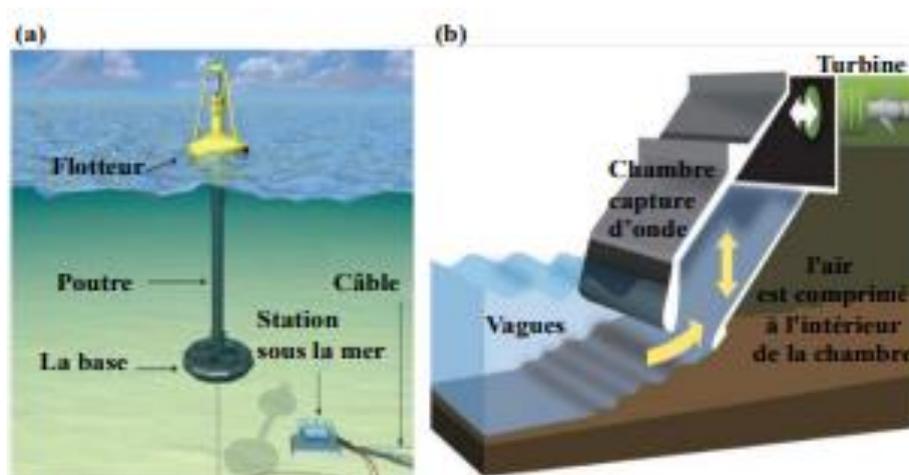


Figure I.10. Récupérateurs de l'énergie des vagues de l'océan. (a) [34] (b) [35].

Les technologies de récupération de l'énergie des vagues océaniques visent généralement à convertir l'énergie cinétique des vagues en électricité. La recherche dans ce domaine a été initiée à la suite des crises pétrolières du début des années 1970 [36]. En général, il existe trois principaux types de technologies pour récupérer l'énergie des vagues :

- Le récupérateur d'énergie de type flotteur (Figure I.10.a) exploite la force engendrée par les oscillations des vagues pour produire de l'électricité.
- Le récupérateur d'énergie de type colonne d'eau (Figure I.10.b) : l'eau entre dans une chambre, créant une force grâce à l'air comprimé, entraînant ainsi une turbine qui produit de l'électricité.
- Le récupérateur d'énergie de type hydraulique : ce dispositif comprend un réservoir situé au-dessus du niveau moyen de la mer, à partir duquel l'eau des vagues coule à travers une ou plusieurs turbines hydrauliques classiques.

I.4.11. Récupération de l'énergie à partir des voies ferroviaires :

Les trains exercent une charge significative sur la surface des rails, entraînant une déformation de ceux-ci [37]. Chaque wagon peut peser de 30 tonnes (vide) à 140 tonnes (chargé). Penamalli, Phillips, Wang et leurs collègues [38–39] ont mis au point un mécanisme de récupération d'énergie basé sur les vibrations des rails à l'aide d'un système pignon-crémaillère. Leur approche consiste à convertir les vibrations bidirectionnelles en rotation unidirectionnelle pour alimenter un générateur, ce qui permet d'améliorer l'efficacité et la durée de vie du système de récupération d'énergie. La conception du prototype, incluant un redresseur de mouvement, réalisé par Wang et ses collègues [39], est présentée dans la Figure I.11.



Figure I.11. Récupérateur d'énergie avec redresseur de mouvement : (a) Modélisation en 3-D ; (b) Prototype [39].

I.4.12. Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques ambiante :

La récupération d'énergie vibratoire est devenue un sujet de recherche très actif au cours de la dernière décennie, avec plus d'une cinquantaine de laboratoires dans le monde qui se sont impliqués dans ce domaine. Les vibrations énergétiques sont omniprésentes dans notre environnement, présentes dans la plupart des équipements quotidiens, les bâtiments, les systèmes de transport, etc. Par conséquent, exploiter cette énergie vibratoire ambiante semble être une approche prometteuse pour remplacer les piles qui ont une durée de vie limitée dans ces réseaux. Dans cette optique, plusieurs types de générateurs ont été développés pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Nous nous sommes d'abord intéressés à la restauration des vibrations. À l'heure actuelle, trois principes fondamentaux (électromagnétisme, électrostatique, piézoélectricité) sont utilisés pour transformer les vibrations mécaniques en énergie électrique [40].

I.4.12.1. Conversion électromagnétique :

Les générateurs électromagnétiques envisagés pour la récupération d'énergie ambiante sont principalement ceux à aimants permanents. Une étude récente [41] souligne que la réduction d'échelle ne diminue pas la puissance volumique des micro-générateurs à aimants permanents, à condition que la fréquence de mouvement relatif augmente proportionnellement à la diminution de leurs dimensions. En effet, cette étude montre qu'une réduction homothétique de l'échelle n'affecte pas le champ magnétique généré par un aimant à son voisinage. Cependant, la miniaturisation des générateurs à induction, des générateurs synchrones à excitation bobinée et des générateurs synchrones à réluctance entraîne une réduction significative des puissances générées.

La tension résultante est déterminée par la loi de Faraday, exprimée par l'équation I.4.12.1.1 :

$$e = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (I.2)$$

Avec :

e : force électromotrice.

n : nombre de tours de l'inducteur.

Φ : champ magnétique traversant l'inducteur.

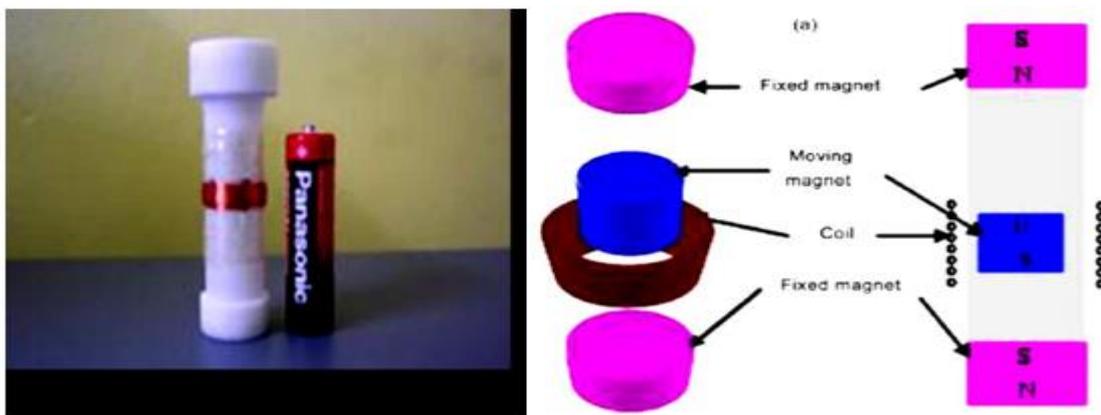


Figure I.12. Générateur électromagnétique pour récupérer l'énergie [41].

I.4.12.2. Conversion électrostatique :

Les générateurs électrostatiques sont constitués d'un condensateur initialement chargé, dont les électrodes sont mobiles. Le mouvement des électrodes, engendré par exemple par des vibrations ambiantes, a pour conséquence soit de réduire, à tension constante, la capacité, induisant ainsi la génération de charges électriques, soit, à charge constante, d'augmenter la tension aux bornes du condensateur et donc l'énergie électrostatique (voir Figure I.14) [42].

L'énergie récupérable est décrite par l'équation I.4.12.2.1 :

$$E = \frac{1}{2} V_m^2 (C_{\max} - C_{\min}) \left(\frac{C_{\max} - C_{\text{par}}}{C_{\min} - C_{\text{par}}} \right) \quad (I.3)$$

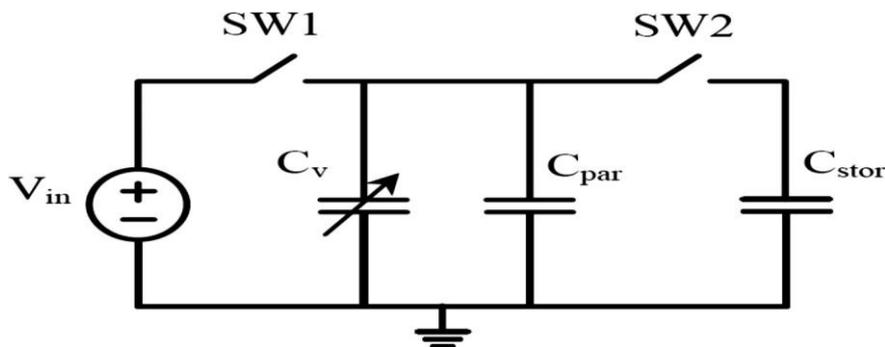


Figure I.13. Schéma d'un générateur capacitif avec V_{in} – source de tension pour précharger la capacité variable, C_v – capacité variable, C_{par} – capacité parasite et C_{store} – capacité de stockage [42].

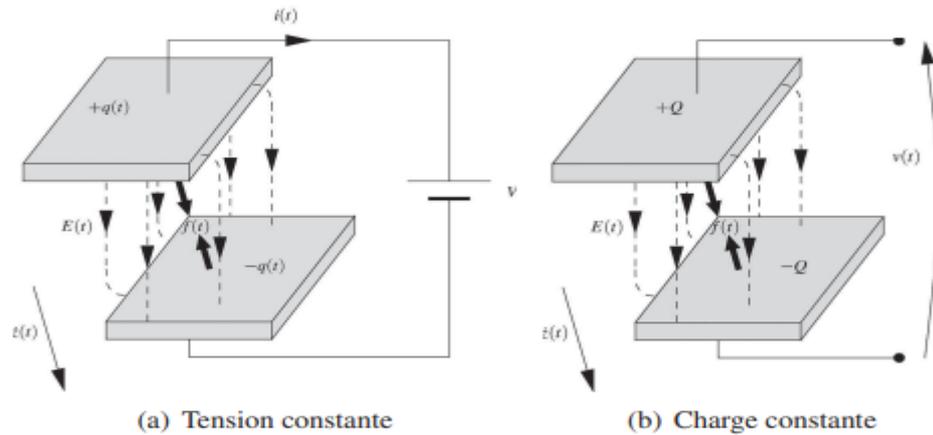


Figure I.14. Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique [42].

I.4.12.3. Conversion piézoélectrique :

La piézoélectricité se manifeste par l'apparition d'une polarisation électrique à la surface de certains cristaux soumis à une déformation. Inversement, certains cristaux soumis à une polarisation peuvent être déformés. Dans le cas de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, l'effet piézoélectrique direct est d'intérêt. Il existe alors cinq modes de déformation fondamentaux d'un échantillon piézoélectrique : longitudinal (mode 33), transversal (mode 31), de cisaillement (mode 15), épaisseur et radial. Les modes longitudinal et transversal sont représentés sur la Figure I.15 [43].

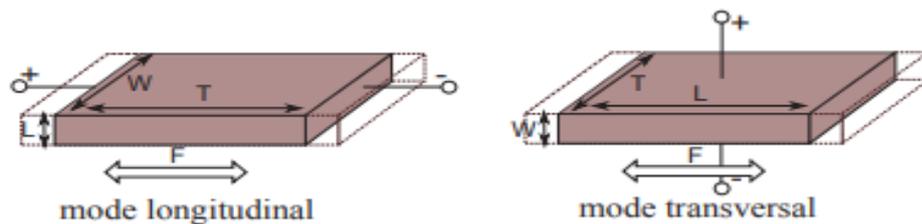


Figure I.15. Description des modes longitudinal et transversal [43].

L'effet piézoélectrique témoigne du couplage entre effets mécaniques et électriques. Il est donc naturel d'introduire des coefficients de couplage, notés g_{3i} et d_{3i} , qui symbolisent l'efficacité de la conversion. Ces coefficients expriment les relations entre la contrainte mécanique F et, respectivement, le champ électrique E et la charge électrique Q , telles que [43]:

$$E = g_{3i}FT \tag{I.4}$$

$$Q = d_{3i}FWL \tag{I.5}$$

I.5. Micro-générateur :

I.5.1. Définition :

Le micro-générateur représente une solution compacte et efficace pour la production d'énergie.

I.5.2. Types de micro-générateur et leurs principes de fonctionnement :

I.5.2.1. Micro-générateur hydroélectrique:

Les micro-générateurs hydroélectriques marquent une avancée significative dans le domaine de la production d'énergie renouvelable. Ils sont spécifiquement conçus pour convertir l'énergie hydraulique des petits cours d'eau en électricité, proposant ainsi une solution durable et écologique pour les zones isolées ou à faible empreinte énergétique [48].

I.5.2.1.1. Principe de fonctionnement:

Le fonctionnement des micro-générateurs hydroélectriques repose sur la conversion de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique. L'eau en mouvement entraîne la rotation d'une turbine reliée à un générateur, lequel produit de l'électricité. Cette électricité peut ensuite être utilisée localement ou injectée dans le réseau électrique [48].



Figure I.16. Système récupération d'énergie par micro-générateur hydroélectrique [48].

I.5.2.1.2. Avantages des Micro-générateurs Hydroélectriques :

- Respectueux de l'environnement : Ils n'émettent aucun gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.
- Énergie renouvelable : En utilisant l'eau des rivières et des cours d'eau, ils exploitent une source d'énergie inépuisable.
- Adaptabilité : Leur taille réduite et leur faible impact environnemental les rendent idéaux pour les communautés isolées ou les zones rurales.

I.5.2.1.3. Challenges et Solutions:

Bien que présentant de nombreux avantages, les micro-générateurs hydroélectriques font face à certains défis. Le principal est leur dépendance à la disponibilité de l'eau, qui peut varier selon les saisons et les conditions climatiques. Pour surmonter cette difficulté, des solutions telles que le stockage d'énergie ou l'hybridation avec d'autres sources renouvelables peuvent être envisagées.

En conclusion, les micro-générateurs hydroélectriques représentent une technologie prometteuse pour l'avenir de l'énergie renouvelable. Leur capacité à fournir de l'électricité de manière écologique et durable en fait une solution idéale pour les zones hors réseau et contribue à la transition énergétique globale [48].

I.5.2.2. Chaudière à micro-cogénération:

Ces dispositifs sont également désignés sous les termes de « chaudières électrogènes » ou « écogénérateurs ». Ils sont présentés comme la troisième génération de chaudières, succédant à la chaudière classique et à la chaudière à condensation. Leur caractéristique distinctive est de générer à la fois de la chaleur et de l'électricité à partir de la même source d'énergie. Ce système, en plus de fournir du chauffage pour votre habitat ainsi que de l'eau chaude sanitaire, vous permet de devenir producteur d'électricité pour une partie de vos besoins.



Figure I.17. Chaudière à micro-cogénération [49].

I.5.2.2.1. Principe de fonctionnement:

La chaudière à micro-cogénération opère en utilisant à la fois l'électricité et l'énergie de votre choix : gaz, fioul, bois ou granulés [49].

I.5.2.2.2. Avantages et inconvénients chaudière micro-cogénération :

La chaudière à micro-cogénération présente de multiples avantages grâce à sa technologie [49]:

- Respect de l'environnement : ses pertes d'énergie sont transformées en production d'électricité, réduisant ainsi les émissions de CO₂ dans les fumées rejetées, qui peuvent être jusqu'à 15 à 30 % inférieures à celles d'une chaudière standard.
- Économie : la production d'électricité par l'appareil permet de réduire votre consommation d'électricité auprès de votre fournisseur, entraînant potentiellement des économies allant jusqu'à 40 % sur votre facture d'électricité.
- Performance : dotée d'un rendement pouvant atteindre jusqu'à 115 %, elle rivalise avec les chaudières à condensation.
- Confort : équipée d'un thermostat pour optimiser ses performances et maintenir une température constante dans votre logement.
- Praticité : malgré sa technologie avancée, elle ne nécessite pas d'entretien particulier.

Cependant, cet appareil présente également quelques inconvénients [49]:

- Coût élevé : l'achat et l'installation d'une chaudière à micro-cogénération peuvent coûter entre 10 000 et 25 000 euros.
- Dépendance à la consommation de chauffage et d'eau chaude sanitaire : la production d'électricité de l'appareil est liée à ces besoins, ce qui signifie que si vos besoins sont faibles, la production d'électricité sera également réduite.
- Complexité d'installation : les raccordements spécifiques au réseau d'électricité nécessitent une installation plus complexe que celle d'une chaudière classique ou à condensation.
- Coûts élevés en cas de panne : les tarifs de la main-d'œuvre et des pièces de rechange seront plus élevés en cas de besoin de réparation.

I.5.2.3. Micro-générateur Enerbee Technologie :

Il représente une fusion novatrice de matériaux magnétiques et piézoélectriques. Grâce au matériau piézoélectrique, le dispositif peut générer de l'énergie indépendamment de la vitesse de mouvement. En parallèle, le matériau magnétique permet au générateur de fonctionner avec des mouvements à très faibles couples [50].

I.5.2.3.1. Principe de fonctionnement:

La technologie de récupération d'énergie développée par Enerbee se distingue mondialement par sa capacité à produire de l'électricité à partir de mouvements minimes, quelle que soit leur vitesse. Son originalité réside dans la fusion ingénieuse des avantages respectifs des deux propriétés physiques précédemment évoquées pour la conversion du mouvement en énergie : le magnétisme et la piézoélectricité. Cette combinaison astucieuse de ces deux techniques permet de préserver leurs atouts et de générer de l'électricité quel que soit le rythme du mouvement [51].

Dans un champ magnétique variable, un matériau magnétostrictif se contracte ou se dilate alternativement, recréant ainsi un mode vibratoire. Il est capable de produire une contrainte significative pour déformer un matériau piézoélectrique, même sous de faibles tractions. Cette déformation déplace des charges électriques dans le matériau, assurant ainsi la conversion électromécanique. Le couplage de ces deux matériaux permet donc de transformer l'énergie magnétique en énergie mécanique, puis en électricité [51].

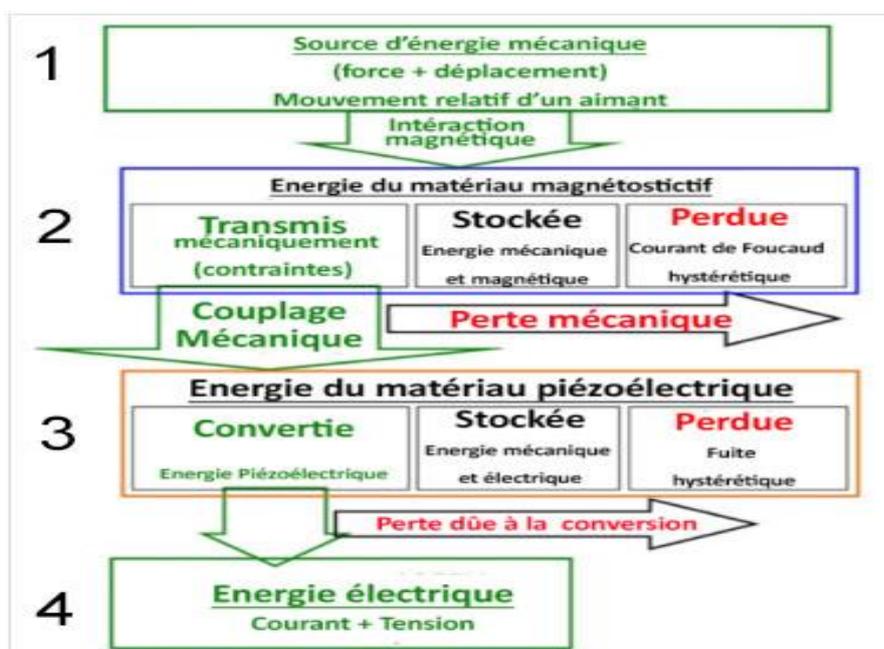


Figure I.18. Principe de fonctionnement du micro-générateur d'Enerbee [51].

En fin de compte, le micro-générateur d'Enerbee repose sur une technique novatrice de conversion des variations d'un champ magnétique quasi-stationnaire en électricité. Les étapes principales de cette conversion sont détaillées dans la Figure I.18 : un mouvement active des aimants (1) qui modifient le champ magnétique autour d'un matériau magnétostrictif. Celui-ci se déforme sous l'action de ce champ (2) et, par conséquent, exerce une contrainte mécanique sur un matériau piézoélectrique (3), ce qui entraîne la production d'électricité (4).

Dans la pratique, le mouvement quasi-stationnaire d'un aimant permanent à proximité de l'élément hybride magnétostrictif/piézoélectrique peut générer une tension relativement élevée en sortie de l'élément piézoélectrique, cette tension dépend principalement de l'échelle des appareils et des matériaux utilisés [51].

I.5.2.3.2. Avantages de Le micro-générateur Enerbee Technologie:

- Respectueux de l'environnement : Le micro-générateur Enerbee contribue à réduire la dépendance aux piles et aux batteries, ce qui favorise la préservation de l'environnement.
- Autonomie énergétique : Il alimente des petits appareils électroniques tels que les montres, les télécommandes, etc., sans nécessiter l'utilisation de piles ou de batteries.
- Adaptabilité : Peu importe la vitesse ou la régularité des mouvements, Enerbee est capable de récupérer de l'énergie.

I.6. M.I.T. Media Lab :

Le MIT Media Lab est un département du MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, États-Unis). Fondé en 1985 par Nicholas Negroponte et Jerry Wiesner, il mène des recherches à l'intersection de diverses disciplines telles que la technologie, la culture, l'ingénierie, l'art et l'informatique. Comme son nom l'indique, le MIT Media Lab se concentre sur les médias, à la fois au sens de la matière (medium) et des moyens de communication (médias). Les chercheurs du MIT Media Lab travaille également sur les interfaces homme-machine et la génération d'énergie portable. Dans ce contexte, deux types de dispositifs piézoélectriques ont été développés : des clés prototypes et des chaussures piézoélectriques [44].

I.6.1. Touches piézoélectriques :

Un prototype de touches piézoélectriques a été développé suite à un brevet déposé en 1999 par la société Compaq Computer Corporation à Houston [45]. Ce brevet concerne la récupération de l'énergie mécanique dissipée lors de la frappe des touches du clavier d'un ordinateur. Chaque touche est équipée à sa base d'un aimant qui, lorsqu'on appuie sur la touche, s'enfonce dans une

bobine (voir Figure I.19.a) et agit comme un mini-générateur de courant, permettant ainsi la charge d'un condensateur.

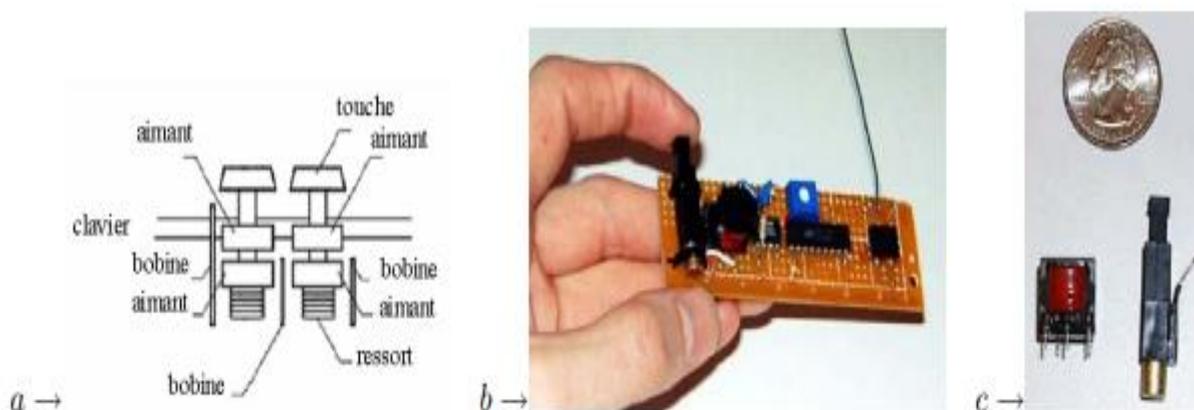


Figure I.19. Schéma des touches du clavier Compaq (a) [46] et prototype de touches piézoélectriques du MIT (b et c) [45].

Il est envisageable d'associer à chaque touche un barreau piézoélectrique, caractérisé par sa compacité, sa simplicité et son faible coût. Dans un premier temps, les chercheurs du MIT ont réalisé un prototype simple : un bouton-poussoir alimentant un émetteur destiné à l'identification par radiofréquence (RFID) (voir Figure I.19.b et c).

Après l'impact, l'élément piézoélectrique vibre à sa résonance pour maximiser le rendement de la conversion mécano-électrique. Un transformateur abaisse la tension et agit comme self d'accord. À ce stade de conversion, le rendement est de 7 %, générant 2 mJ à chaque pression. En sortie du régulateur de tension, il reste 0,5 mJ sous 3 V pour alimenter l'ensemble encodeur-transmetteur, consommant 150 μ J pendant la transmission de 20 ms.

Bien que ce prototype simple fonctionne, il reste des améliorations à apporter au rendement, ainsi qu'à étudier le vieillissement des barreaux piézoélectriques, soumis à des impacts répétés susceptibles de provoquer des microfissures dans le matériau.

Cependant, les perspectives sont nombreuses et prometteuses, d'autant plus que les appareils à touches sont très répandus !

I.6.2. Chaussures piézoélectriques :

L'équipe du MIT a comparé deux dispositifs en termes de puissance générée lors de la marche (à une fréquence de 0,9 Hz) (voir Figure I.20) [47]:

- Une feuille de PVDF flexible, intégrée dans la semelle, qui capte l'énergie des mouvements de flexion à chaque pas. L'énergie récupérée sur une charge adaptée de 250 k Ω est de 1,3 mW.
- Un dispositif composé de deux rubans précontraints et incurvés en céramique PZT, appelé "dimorphe", positionné dans le talon. L'énergie récupérée sur une charge adaptée de 500 k Ω atteint 8,4 mW.

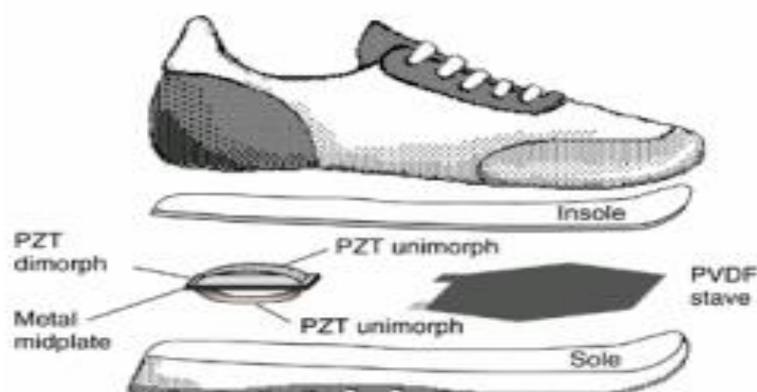


Figure I.20. Schéma de la feuille de PVDF et du dimorphe insérés dans la chaussure [47].

I.7. Conclusion :

La récupération d'énergie a fait l'objet de plusieurs études depuis plus d'une décennie. Dans ce chapitre, nous avons offert un aperçu du contexte global des différentes formes d'énergie potentiellement exploitables. Chaque application, chaque forme d'énergie et chaque mécanisme de transduction sont l'objet de thèmes à part entière dans la recherche scientifique. À partir du chapitre suivant, nous nous concentrerons sur la présentation des nouveaux matériaux intelligents, fondés sur des techniques innovantes et alternatives aux solutions classiques bien connues.



Chapitre II

Généralités sur les matériaux intelligents et leurs applications



II. Introduction :

Les matériaux intelligents, également connus sous le nom de matériaux à réponse adaptative, sont capables de modifier leurs propriétés en réaction à des stimuli externes tels que la température, la lumière, les champs électriques ou magnétiques, entre autres. Conçus pour être sensibles, adaptatifs et évolutifs, ces matériaux offrent un large éventail d'applications potentielles dans des domaines divers tels que l'aérospatiale, la biomédecine, la robotique ou encore le secteur militaire. Ce chapitre se propose de présenter les principaux types de matériaux intelligents, en mettant en avant leurs caractéristiques distinctives, leurs avantages ainsi que leurs limitations. Des exemples illustratifs d'utilisations novatrices de ces matériaux seront également abordés.

II.1. Définition des matériaux intelligents :

Un matériau qualifié d'« intelligent » est spécifiquement conçu pour être sensible, adaptable et évolutif. Ces matériaux, souvent des polymères [52] et/ou des composites [53], peuvent également être piézoélectriques, magnétostrictifs [54] ou à mémoire de forme [55], possédant une ou plusieurs propriétés leur permettant de s'adapter et/ou d'évoluer. Leur comportement peut être considérablement altéré de manière contrôlée par des stimuli externes tels que le stress, la température, le mouvement mécanique, l'humidité, le pH, le champ électrique ou magnétique.

Certains de ces matériaux, déjà communicants, pourraient bientôt être améliorés pour intégrer des éléments informatiques plus complexes, des actuateurs, voire des moyens de production d'énergie, potentiellement à l'échelle nanométrique. Des concepts tels que les nano-moteurs et les micro- ou nano-machines moléculaires permettraient éventuellement à un matériau de s'auto-assembler pour produire des formes et des fonctions différentes.

II.2. Différents types des matériaux intelligents :

II.2.1. Alliages à mémoire de forme:

II.2.1.1. Définition :

Les alliages à mémoire de forme sont généralement des alliages métalliques composés de deux, trois voire quatre éléments, avec des compositions chimiques spécifiques qui garantissent cette propriété distinctive. Bien qu'il existe de nombreux alliages à mémoire de forme, seuls quelques-uns sont utilisés à des fins industrielles, principalement en raison de leur coût élevé et/ou de leurs propriétés partiellement avantageuses. Les deux principales familles d'alliages sont les

alliages nickel-titane-X (avec X étant un élément en faible proportion tel que Fe, Cu, Co, etc.) et les matériaux à base de cuivre, tels que Cu-Al (avec des ajouts de Zn, Ni, Be, etc.).

Ces matériaux sont qualifiés de « mémoire de forme » car ils démontrent la capacité de retrouver leur forme initiale, c'est-à-dire qu'ils "se souviennent" des traitements thermomécaniques auxquels ils ont été soumis. Le phénomène clé sous-jacent à la mémoire de forme repose sur une transformation structurale réversible de type martensitique, qui s'opère entre une phase mère austénitique (A, à haute température) et une phase fille martensitique (M, à basse température) [57].

II.2.1.2. Historique:

L'effet de mémoire de forme a été initialement observé vers 1939 par des chercheurs russes travaillant sur des alliages de type cupro-aluminium. Environ une décennie plus tard, des chercheurs américains ont démontré qu'une énergie significative était associée à la restitution de forme par chauffage d'un alliage or-cadmium. En 1961, Buehler et al. ont découvert cette même propriété sur un alliage nickel-titane équiatomique. Peu après, le premier développement d'application commerciale exploitant l'effet de mémoire de forme a été utilisé sur les raccords de tuyauterie des avions F-14.

Cependant, la compréhension réelle de ce comportement thermomécanique a progressé lentement, limitant le développement de nouveaux alliages et leur utilisation durable dans les années 1970-1980. Les recherches scientifiques visant à mieux comprendre ce phénomène ont véritablement débuté dans les années 80, avec les premières expériences et tentatives de modélisation associées [57].

II.2.1.3. Caractéristiques d'un alliage à mémoire de forme:

La propriété des Alliages à Mémoire de Forme (AMF) est définie comme la capacité d'un échantillon ayant subi une déformation significative à l'état martensitique, ce qui correspond à un changement de forme notable, à retrouver sa forme initiale à l'état austénitique. Cette forme initiale est "mémorisée" par le matériau, et peut être récupérée par chauffage à une température supérieure à la température de transition appelée "température austénite finale" (AF).

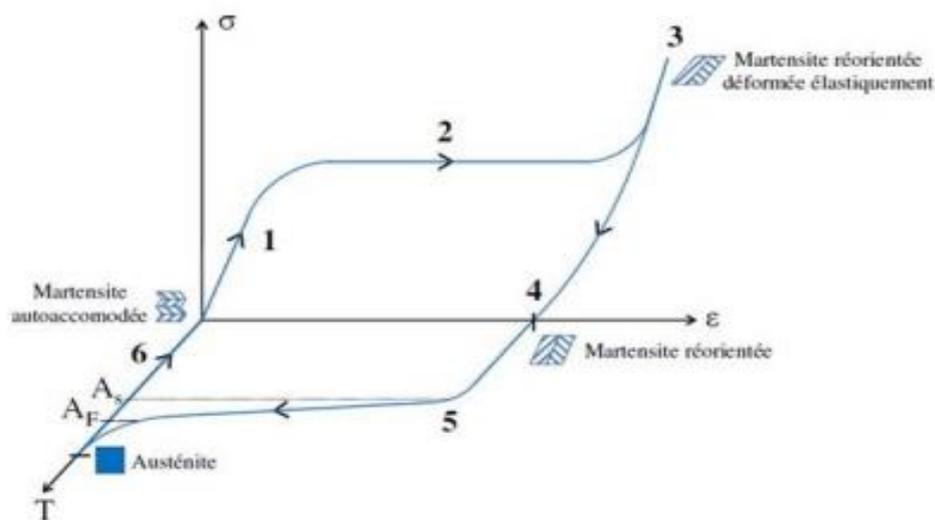


Figure II.1. Cycle thermodynamique typique d'un alliage à mémoire de forme [57].

Une représentation schématique de l'effet de mémoire de forme est illustrée ci-dessus, avec son mécanisme pouvant être résumé comme suit : L'application d'une contrainte sur une microstructure martensitique auto-accommodante (1) induit le déplacement des interfaces mobiles des différentes variantes, favorisant ainsi les variantes de martensite qui s'adaptent le mieux à la déformation, au détriment des autres (2). Ce réalignement des variantes permet d'atteindre la meilleure adaptation possible à la déformation, jusqu'à ce qu'une déformation maximale soit atteinte (3). Lorsque la contrainte cesse, une partie de la déformation est récupérée, correspondant à un retour partiel des interfaces inter-variantes.

Cependant, une déformation permanente subsiste car la martensite est stable à cette température (4). Pour restaurer l'état initial du matériau, il est nécessaire de le chauffer à une température supérieure à A_F , ce qui permet d'obtenir une transformation inverse complète (5).

Le recouvrement de la déformation s'explique par le retour du matériau à la phase austénitique. Enfin, le retour à la température ambiante entraîne une transformation de phase sous contrainte nulle. Le phénomène d'accommodation se produit alors, reformant le mélange initial de variantes de martensite (6) : c'est l'effet de mémoire de forme dans un seul sens [56].

II .2.1.4. Application classique des alliages à mémoire de forme:

Les alliages à mémoire de forme font partie d'une catégorie de matériaux adaptatifs, appréciés pour leurs excellentes propriétés mécaniques telles que la ténacité, et leur capacité à remplir de multiples fonctions dans divers domaines. Leur utilisation est étendue et variée, incluant des secteurs tels que l'industrie biomédicale (implants, prothèses, agrafes orthopédiques, fils pour

appareils orthodontiques, corbeilles pour calculs rénaux, stents, fabrication d'implants sur mesure par impression 3D en AMF), l'aéronautique (décalage de fréquences nuisibles, atténuation de bruits), l'aérospatiale (déploiement d'antennes), l'horlogerie (ressort dans le mécanisme d'une montre), le nucléaire (tubes), le bâtiment (lamelles de matériau à mémoire de forme pour renforcer par précontrainte le béton dans la construction de ponts, structures antisismiques), et enfin l'énergie (amélioration des performances des batteries lithium-ion) [57].

II .3. Matériaux piézoélectriques et électrostrictifs:

II .3.1. Phénomène de la piézoélectricité :

La piézoélectricité se réfère à la capacité de certains matériaux cristallins à générer une charge électrique en réponse à une contrainte mécanique, phénomène connu sous le nom d'effet piézoélectrique direct. Ce processus est réversible : l'application d'un champ électrique externe peut provoquer une déformation mécanique du matériau, ce qui est appelé l'effet piézoélectrique indirect. Les frères Pierre et Jacques Curie ont été les premiers à expliquer ces deux effets. Ils ont démontré que le quartz, soumis à une tension électrique, vibre à une fréquence très stable et bien définie, illustrant ainsi l'effet piézoélectrique indirect. Cette propriété a conduit à l'utilisation du quartz dans la fabrication de montres et d'horloges, où l'application d'une tension électrique provenant d'une pile permet au quartz de vibrer, facilitant ainsi la mesure du temps. Par ailleurs, la piézoélectricité directe est exploitée dans les briquets pour créer une charge électrique qui enflamme le gaz.[58]

Les propriétés piézoélectriques de ces céramiques sont attribuées à une polarisation initiale induite par un champ électrique contrôlé en température. Les céramiques ainsi produites peuvent générer une contrainte d'environ 40 MPa, avec une déformation relative allant de 1000 à 2000 ppm.



Figure II.2. Mécanisme de quartz qu'est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges [58].

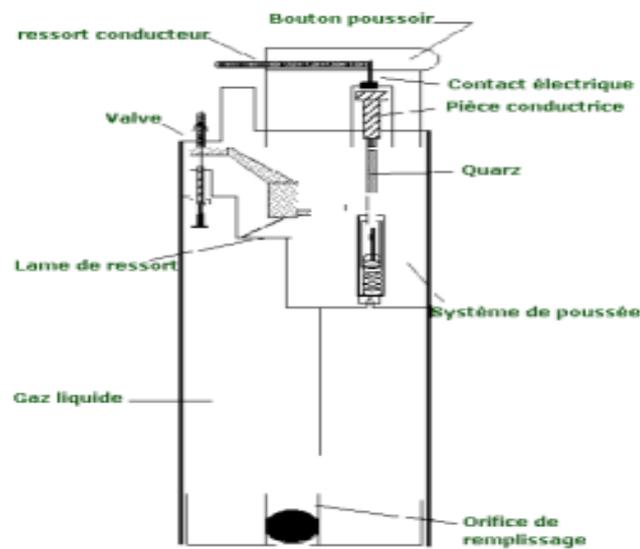


Figure II.3. Mécanisme de la piézoélectricité directe qu'est utilisé dans les briquets pour une charge électrique qui donne feu au gaz [58].

II.3.2. Principales classes de matériaux:

II.3.2.1. Céramiques massives:

Les céramiques piézoélectriques peuvent être catégorisées en céramiques dures, conçues pour des applications nécessitant l'application de hautes tensions, telles que les actionneurs, et en céramiques tendres, qui requièrent des tensions plus faibles et sont mieux adaptées aux applications à faible puissance, telles que les petits actionneurs ou capteurs [59].

II.3.2.2. Céramiques multicouches:

Pour réduire le niveau de tension requis sans compromettre l'intensité du champ électrique, une approche consiste à insérer un système d'électrodes de taille micrométrique dans le matériau. Dans ce cas, l'actionneur est constitué d'un empilement de plaques ou de disques minces entre lesquels sont insérées des électrodes interdigitées. Cette configuration permet d'atteindre la valeur d'intensité du champ électrique E à des tensions réduites, typiquement de l'ordre de 100 à 200 V, tout en permettant des déplacements relativement importants [60].

II.3.2.3. Composites piézoélectriques:

Un composite piézoélectrique, également appelé piézocomposite, est constitué de deux phases distinctes : une phase piézoélectrique, généralement une céramique de PZT, et une phase non piézoélectrique, typiquement une résine époxy. La structure du composite est déterminée par l'arrangement géométrique des deux phases. Les configurations les plus courantes comprennent

des bâtonnets de piézocéramique immergés dans la résine (composites notés 1-3) ou des couches empilées (composites notés 2-2). Les notations 1-3 et 2-2 se réfèrent à la connectivité de chacune des deux phases [62]. En modifiant la connectivité et les fractions volumiques des deux phases, il est possible de régler de manière quasi-continue les propriétés piézoélectriques et mécaniques du composite. En particulier, les piézocomposites ont démontré leur intérêt par rapport aux céramiques conventionnelles dans le domaine des transducteurs acoustiques à haute fréquence pour l'imagerie médicale : leur coefficient de couplage électromécanique amélioré et leur impédance acoustique plus adaptée permettent d'augmenter la résolution des images [61, 63].

II.3.3. Application :

II.3.3.1. Structures quasi-statiques:

Pour créer des actionneurs quasi-statiques à base de céramiques multicouches, un dispositif d'amplification de déplacement externe est nécessaire. Les bras de levier ou les structures métalliques précontraintes et amplifiées, tels que l'expandeur développé par CEDRAT Technologies, sont couramment employés à cette fin.

II.3.3.2. Structures résonnantes:

Il est possible de piloter des actionneurs utilisant des céramiques multicouches ou des bimorphes à des fréquences correspondant aux modes de résonance de la structure, afin d'obtenir une amplification significative des déformations disponibles. Des structures telles que les transducteurs de type Langevin sont souvent résonantes. Ces actionneurs se composent de disques céramiques piézoélectriques placés entre deux masselottes métalliques, et sont actionnés pour exciter les masselottes en résonance mécanique, ce qui peut générer des vibrations d'amplitude importante [60].

II.4. Matériaux magnétostrictifs:

II.4.1. Définition:

Les alliages magnétostrictifs jouent un rôle similaire au champ magnétique par rapport à ce que les matériaux piézoélectriques font vis-à-vis du champ électrique. Sous l'influence d'un champ magnétique, un barreau de fer s'allonge tout en subissant une contraction dans le sens transversal. À l'inverse, l'effet Villari se produit lorsque le barreau s'aimante sous l'effet d'un allongement. En fonction de la géométrie considérée, il est également possible d'exploiter des déformations en flexion ou en torsion.

Seuls les alliages de fer et de terres rares, tels que le Terfenol-D, permettent d'obtenir des déformations significatives, de l'ordre de 1000 à 2000 ppm, soit 10 à 50 fois supérieures à celles obtenues avec les métaux. Bien que ces déformations soient légèrement plus importantes que celles obtenues avec les piézoélectriques, elles sont plus difficiles à induire en raison de la perméabilité relativement faible des matériaux (4 dans le cas du Terfenol-D).

Ces alliages pourraient présenter un intérêt dans la conception de moteurs à fort couple et à faible vitesse [64].

II.4.2. Historique:

En 1842, le physicien britannique Joule découvrit que sous l'effet d'un champ magnétique longitudinal, une tige de fer s'étire tandis qu'elle se contracte latéralement lorsqu'elle est soumise à une traction mécanique. Il nomma ce phénomène la magnétostriction. Depuis lors, d'autres effets mécaniques des champs magnétiques ont été observés. Sous l'action d'un champ magnétique, certains échantillons de substances non seulement se dilatent ou se contractent, mais ils peuvent également se plier, se tordre, changer de densité, voire modifier leur module de Young. Suivant les découvertes de Joule, nous regroupons tous ces phénomènes magnétoélastiques sous le terme de magnétostriction.

Dans son sens le plus général, la magnétostriction désigne un ensemble de relations reliant les propriétés mécaniques d'un objet à ses propriétés magnétiques [65].

II.4.3. Application:

II.4.3.1. Capteur magnétostrictif :

Les matériaux ferromagnétiques présentent l'effet magnétostrictif inverse, qui altère la susceptibilité magnétique en réponse à des contraintes mécaniques dans le matériau. Nous prévoyons également d'exploiter cet effet inverse dans le capteur de déplacement [65].

En ce qui concerne les actionneurs :

Les actionneurs constituent les composants mécaniquement actifs de la chaîne d'asservissement, leur nombre étant commandé par le mouvement des pièces. Les actionneurs à déplacement longitudinal ou latéral reposent généralement sur des empilements piézoélectriques en PZT [66].

II.4.3.2. Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques:

Les résonateurs magnétostrictifs peuvent être employés en tant que transducteurs émetteurs ou récepteurs d'ondes élastiques. Le Terfenol-D présente des avantages significatifs par rapport aux céramiques piézoélectriques PZT dans le domaine des émetteurs ultrasonores basses fréquences (par exemple, 500 Hz) pour les applications sous-marines. La puissance ultrasonore maximale qu'un transducteur peut émettre sans altérer ses performances est limitée d'une part par l'énergie volumique élastique de rupture ou le seuil de non-linéarité élastique du matériau, et d'autre part par l'énergie volumique magnétique maximale que le matériau peut supporter [60].

II.4.3.3. Fluides électro-rhéologiques :

Les fluides électro-rhéologiques (ER) sont dispersés dans un liquide diélectrique. Sous l'effet d'un champ électrique, les particules s'alignent pour former des fibres parallèles à la direction du champ électrique. Cette structuration entraîne des modifications profondes dans les propriétés d'écoulement des fluides. À des champs électriques élevés, ces fluides acquièrent des propriétés mécaniques similaires à celles des gels solides. Cet état "solide" est caractérisé par la contrainte maximale qu'il peut supporter, dont la valeur dépend du champ électrique, constituant ainsi un critère de performance pour les fluides ER. À des champs électriques plus faibles, la viscosité du fluide devient variable. Ces fluides sont utilisés pour exploiter les propriétés mécaniques en réponse à des signaux électriques, ouvrant de nouvelles perspectives dans les dispositifs électromécaniques "intelligents" tels que les coupleurs, les amortisseurs actifs, les actionneurs, etc. [67].

II.5. MEMS :

II.5.1. Définition des microsystèmes :

Un microsystème électromécanique est constitué de matériaux semi-conducteurs et comprend un ou plusieurs éléments mécaniques. Il utilise l'électricité comme source d'énergie pour réaliser une fonction de capteur ou d'actionneur, avec au moins une structure possédant des dimensions micrométriques, la forme de cette structure contribuant en partie à la fonction du système. Le terme "systèmes microélectromécaniques" est l'équivalent français de l'acronyme anglais MEMS (Microelectromechanical systems). En Europe, on utilise également le terme MST pour "MicroSystem Technology", bien que moins courant.

Dérivés des techniques de la micro-électronique, les MEMS sont fabriqués à l'aide des microtechnologies, ce qui permet une production à grande échelle. Ils sont utilisés dans divers

domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, la biologie, les télécommunications, ainsi que dans des applications de la vie quotidienne telles que certains vidéoprojecteurs, téléviseurs haute-définition ou airbags pour automobiles [68].

II.5.2. Principes physiques du microsystème :

Le processus de conception d'un microsystème ne diffère pas fondamentalement de celui d'un macro-système, car les lois physiques et les équations qui les décrivent demeurent principalement les mêmes. Cependant, en tenant compte des lois d'échelle, l'importance des effets physiques dans ces équations change en fonction de la taille du système. En effet, les rapports entre les différentes forces en jeu sont altérés avec la réduction des dimensions : les forces de gravité étant proportionnelles au volume des objets, réduire les dimensions entraîne une diminution du poids dans des proportions au cube ; de même, une pression agissant sur une surface entraîne une diminution de la force résultante avec les dimensions dans des proportions au carré. Il convient également de mentionner l'importance de la capillarité, qui peut avoir un impact significatif sur un système de dimensions réduites.

La microélectronique se focalise sur l'étude et la fabrication de composants électroniques à l'échelle sub-micrométrique. Bien qu'il soit nécessaire de s'adapter aux dimensions, l'architecture micro-électronique ne présente pas de différences fondamentales avec l'électronique conventionnelle. La distinction réside dans la conception, car l'électronique requise pour le capteur est directement intégrée à celui-ci. Les avancées technologiques en matière de production permettent la fabrication de composants à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, et les fonctions électroniques sont intégrées directement à la surface de ce substrat [69].

II.5.3. Marché des MEMS – Contexte économique :

Actuellement, le marché des MEMS représente un chiffre d'affaires de 8 milliards de dollars, principalement alimenté par des composants tels que les têtes d'impression, les capteurs de pression, les accéléromètres, les capteurs inertiels et les gyroscopes (voir Figure II.7). Selon une deuxième étude de marché menée par I Supplie en 2013, 30% du chiffre d'affaires des MEMS sera généré par l'industrie, par rapport à seulement 19% en 2008.

La crise économique de 2009 a fortement affecté l'industrie des semi-conducteurs, avec une chute de 23% du chiffre d'affaires. En revanche, pendant cette période, le marché des MEMS et des applications grand public a plutôt bien résisté, générant 1,2 milliard de dollars et montrant une tendance à la hausse. Par conséquent, les recherches menées par I Supplie prévoient que ce marché

atteindra 2,5 milliards de dollars d'ici 2013, porté par la croissance des smartphones (incluant micros, accéléromètres, gyroscopes, etc.) et des télécommunications (filtres BAW, commutateurs RF, etc.) [96].

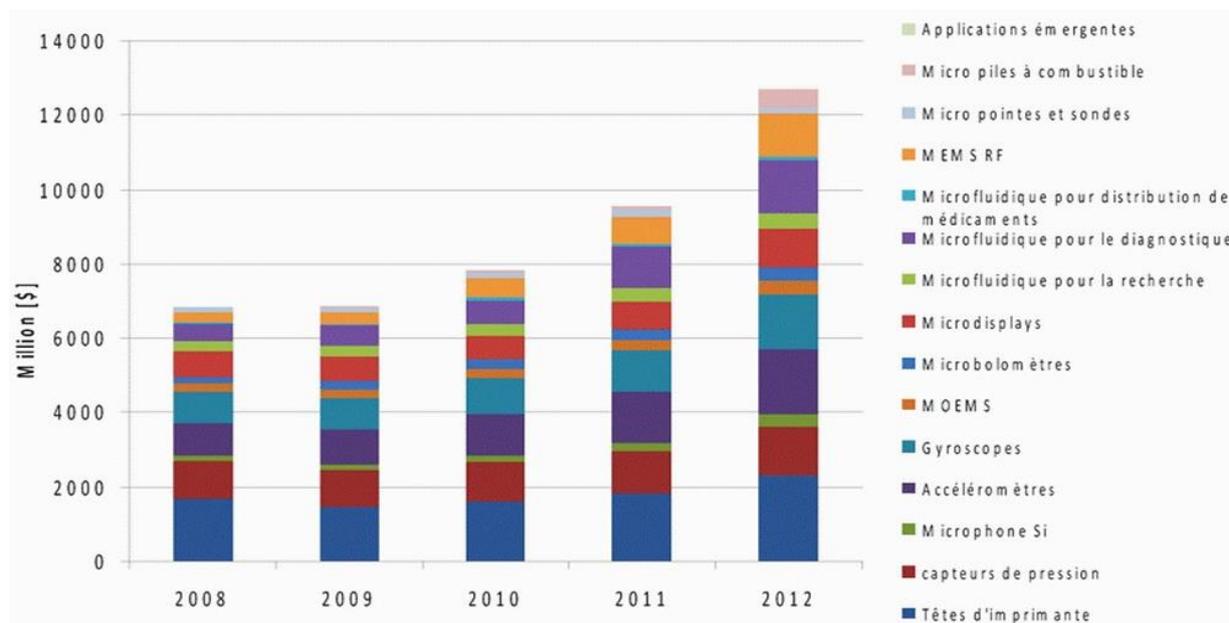


Figure II.4. Evolution du marché des MEMS par applications [96] [97].

L'année 2012 marque également un tournant pour l'industrie des MEMS, avec l'introduction de la législation européenne imposant la mesure de la pression des pneus en temps réel (TPMS), qui peut faire appel aux MEMS (cette réglementation est en vigueur aux États-Unis depuis 2007). Actuellement, les principaux fabricants de MEMS sont Hewlett-Packard et Texas Instruments. Bien que les MEMS aient donné naissance à de nombreuses start-ups, on compte aujourd'hui environ 300 entreprises travaillant dans ce domaine. Cependant, seulement 10 % d'entre elles réalisent 90 % du chiffre d'affaires mondial [98].

II.6. Textile intelligent:

Les textiles intelligents, ou smart textiles en anglais, sont des tissus capables de percevoir et d'interpréter des signaux pour y réagir de manière adaptée [70]. Ils peuvent être décrits comme des matériaux qui, de façon autonome, s'ajustent à leur environnement. Ces textiles peuvent intégrer des composants informatiques, numériques ou électroniques, ainsi que des matériaux polymères innovants tels que les polymères à mémoire de forme ou les matériaux chromiques changeant de couleur, en plus des fibres traditionnelles. Ils sont souvent confondus [71] avec les e-textiles (pour electronic textiles), une sous-branche des textiles intelligents utilisant des composants électroniques.

Les applications des textiles intelligents se trouvent dans divers domaines tels que l'habillement, l'ameublement et les textiles techniques. Les vêtements intelligents, par exemple, font partie du vaste domaine des "wearable technologies" (technologies portables), offrant des fonctions supplémentaires en plus de l'habillement classique.

La "fibretronique" (fibertronics) explore comment les fonctionnalités électroniques et informatiques peuvent être intégrées dans les fibres textiles.

La classification habituelle des textiles intelligents comprend :

- **Les systèmes à intelligence passive**, capables de détecter les changements dans leur environnement, équipés uniquement de capteurs.
- **Les systèmes à intelligence active**, capables de détecter et de réagir à un stimulus grâce à des capteurs et des actionneurs.
- **Les systèmes très intelligents**, qui, en plus de détecter et de réagir, sont également capables de s'adapter aux stimuli ou aux conditions environnementales [72].

Les textiles intelligents ne se présentent pas uniquement sous forme de tissus ou de mailles, mais peuvent aussi prendre la forme de fils ou de fibres.

II.6.1. Applications:

II.6.1.1. Fibretronique:

Comme dans l'électronique classique, l'intégration de fonctions électroniques dans des fibres textiles nécessite l'utilisation de matériaux conducteurs et semi-conducteurs, tels que les tissus conducteurs [73]. Actuellement, des tissus conducteurs composés d'un mélange de fibres traditionnelles et de fibres métalliques (argent, cuivre, etc.) sont disponibles dans le commerce. Ces tissus sont facilement manipulables et peuvent être brodés ou cousus [74].

L'un des défis majeurs des textiles électroniques est de rendre les fibres lavables, tout comme les vêtements ordinaires. Il est donc essentiel que les composants électroniques soient isolés pendant le lavage.

Une nouvelle catégorie de matériaux électroniques mieux adaptés aux textiles électroniques est celle des matériaux électroniques organiques [75], car ils peuvent être conducteurs, semi-conducteurs et se présenter sous forme d'encres et de plastiques [76,77].

Certaines des fonctionnalités les plus avancées démontrées en laboratoire comprennent :

II.6.1.1.1. Transistors en fibres organiques [78]:

Les transistors sont incorporés dans les fibres [79], comme le montre l'exemple des transistors électrochimiques en câble (WECT, ou Wire Electrochemical Transistor), où un monofilament textile peut être revêtu d'une fine couche de polythiophène, un polymère conducteur [80]. Cela représente les premiers transistors intégrés dans des fibres textiles, parfaitement adaptés à la fabrication de textiles et exempts de métaux.

II.6.1.1.2. Fils d'énergie solaire:

Les fils solaires représentent une alternative aux cellules photovoltaïques pour les textiles intelligents, en particulier pour les chandails intelligents qui offrent une plus grande mobilité à l'utilisateur. Bedeloglu et al. ont mis au point des fibres photovoltaïques utilisant deux types de polymères photoactifs. Ces fibres optimisées peuvent être utilisées comme des fibres conventionnelles dans le domaine des textiles intelligents, intégrant ainsi des cellules solaires organiques [81].

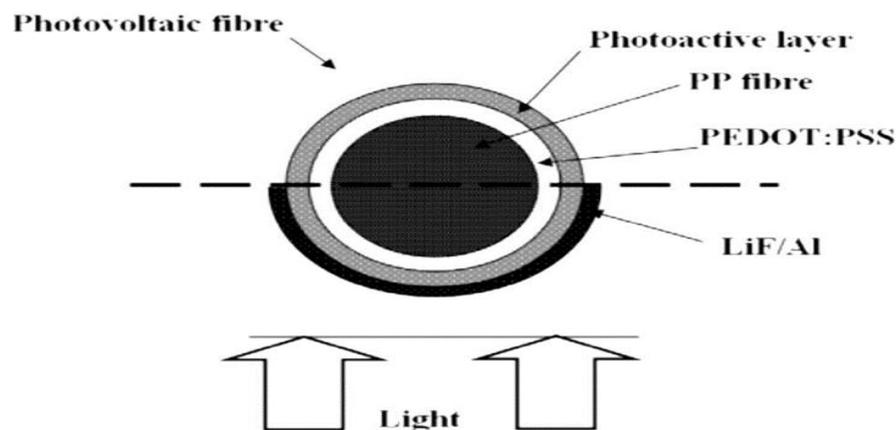


Figure II.5. Exemple de composition d'une fibre photovoltaïque [81].

II.6.1.2. Vêtements intelligents:

Voici quelques exemples d'applications des textiles intelligents dans le domaine de l'habillement :

II.6.1.2.1. Vêtements chauffants et rafraîchissants:

Ce paragraphe décrit l'utilisation de matériaux à mémoire de forme ou de fils conducteurs et de résistances chauffantes.

II.6.1.2.2. Vêtements communicants:

L'incorporation de systèmes de transmission de données tels que le Bluetooth ou le Wifi dans un vêtement le transforme en une interface de communication novatrice. En ajoutant un écran flexible, les possibilités sont encore plus étendues, permettant au porteur d'afficher des textes, des messages ou des vidéos sur son vêtement en fonction de son état d'esprit. De nombreux prototypes ont déjà été mis au point, dont le T-shirt OS de Cute Circuit, qui intègre un écran LED. [83].



Figure II.6. T-shirt OS by Cute Circuit intégrant un écran de LED.

II.6.1.2.3. Vêtements à usage sportif:

Incorporant des capteurs tels que l'accéléromètre, le capteur de rythme cardiaque et le podomètre, ainsi qu'un système de transmission de données pour comparer ses performances avec celles des autres utilisateurs du même système.



Figure II.7. En flux des vêtements intelligents / U0026 connectés pour les sportifs.

II.6.1.2.4. Vêtements changeant de couleurs:

Les phénomènes de chromisme permettent des applications esthétiques.

II.6.1.2.5. Vêtements au service de l'e-santé:

Outils de prévention santé ou d'alerte des services de secours en temps réel, tels que les capteurs accéléromètres intégrés aux fibres textiles, qui permettent de surveiller le rythme cardiaque et le cycle respiratoire du porteur. Ces dispositifs assurent le suivi des personnes âgées ou atteintes de diverses maladies. Par exemple, une ceinture ventrale pour femmes enceintes peut détecter les mouvements fœtaux, des bonnets peuvent réaliser des électro-encéphalogrammes pour détecter le risque de crise d'épilepsie, et des capteurs d'UV intégrés aux maillots de bain peuvent contribuer à la prévention solaire [84, 85, 86].

II.6.1.3. Textiles techniques et ameublement:

Le textile n'est pas restreint à l'habillement comme unique domaine d'application. Par conséquent, les textiles intelligents offrent également des avantages dans de nombreux autres domaines en dehors de l'habillement [82]:

II.6.1.3.1. Applications médicales :

Dispositifs de surveillance des paramètres physiologiques, qui intègrent des capteurs pour le rythme cardiaque, la fréquence respiratoire, la sudation, entre autres. De plus, les textiles fonctionnels offrent des propriétés antibactériennes, tandis que les textiles implantables sont utilisés pour les renforts pariétaux ou les prothèses. Les texticaments, qui intègrent des médicaments dans des textiles, ainsi que les textiles en fibres optiques tissées pour la thérapie photodynamique, représentent également des applications importantes [87].



Figure II.8. Le collier toSense's CoVa [88].

II.6.1.3.2. Sécurité :

Les équipements des pompiers peuvent être améliorés grâce à un système intégré de capteurs mesurant à la fois la température interne (la température à la surface de la peau) et externe (la température de l'environnement), avec un avertisseur pour alerter le porteur en cas de températures dangereuses.

II.6.1.3.3. Loisirs :

Des boutons tactiles ont été entièrement intégrés sous forme de textiles en utilisant des conducteurs textiles tissés, permettant leur connexion à des dispositifs tels que des lecteurs de musique [89].

II.6.1.3.4. Militaire :

Les textiles intelligents destinés à un usage militaire trouvent leur application non seulement dans les vêtements, mais également dans les tentes, les véhicules et les sacs [90].



Figure II.9. L'exosquelette X1 utilisé pour entrainer les futures astronautes pour protéger les muscles de la microgravité [91].

II.6.1.3.5. Surveillance :

Des capteurs électrochimiques et des biosenseurs imprimés ont été intégrés dans les textiles pour surveiller à la fois les paramètres physiologiques et environnementaux [92], que ce soit sur des élastiques [93] ou dans des environnements marins [94].

II.6.1.3.6. Ameublement :

La décoration est également un domaine où les textiles intelligents trouvent des applications. Par exemple, l'Electric Plaid [95], créé par Maggie Orth au sein d'une start-up du MIT, est capable

de changer de couleur en chauffant les fils métalliques du tissu, grâce à l'utilisation de matériaux thermochromiques.

II.7. Conclusion :

Les technologies émergentes les plus prometteuses visent à améliorer la durabilité et la fiabilité grâce à l'utilisation de structures et de matériaux intelligents. L'objectif principal de la recherche dans ce domaine est de mieux comprendre et contrôler la composition ainsi que la microstructure de nouveaux matériaux, tout en mettant l'accent sur la production de matériaux intelligents de haute qualité. Les connaissances acquises en observant le comportement des structures internes des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des variations de température, de déformation et de modifications seront cruciales pour accélérer le développement de nouveaux matériaux destinés à diverses applications, telles que les alliages à mémoire de forme, les matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs.

Ce chapitre comprend une exploration des différents domaines d'application des textiles intelligents, mettant en lumière les avancées récentes dans les domaines de la communication, de la médecine, du sport, de la défense, de la surveillance, de la sécurité, de l'ameublement et du divertissement.



Chapitre III

Système d'amélioration et maximisation de la puissance récupérée



III. Introduction :

Le marché des dispositifs électroniques portables a considérablement évolué au cours des dix dernières années, avec une baisse concomitante de leur consommation d'énergie. Par conséquent, l'idée de récupérer une partie de l'énergie mécanique dissipée dans notre environnement suscite un regain d'intérêt : de telles sources d'alimentation sont gratuites, non polluantes et durables, ce qui les distingue des batteries actuellement utilisées.

Les mouvements du corps humain [47] ou les vibrations de structures [99, 100, 101] peuvent servir de sources d'énergie mécanique, avec des fréquences d'excitation variant de quelques Hz pour les mouvements humains à quelques centaines de kHz pour les vibrations de machines. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique par des transducteurs qui peuvent être piézoélectriques [47, 100, 101], électromagnétiques [99] ou électrostatiques [102].

L'objectif de cette étude est l'hybridation deux systèmes électromécaniques différents en vue de les utiliser dans des générateurs portables autonomes, capables de récupérer l'énergie mécanique fournie par les mouvements volontaires ou involontaires des individus. Le premier système est électromagnétique, composé d'un aimant se déplaçant en translation à travers une bobine, tandis que le second est piézoélectrique, constitué d'une barre piézoélectrique polarisée longitudinalement, encastrée à une extrémité et contrainte à l'autre. Les deux systèmes sont comparés en termes de puissance électrique fournie en mode sinusoïdal.

Ce chapitre explore l'utilisation des polymères piézoélectriques et électromagnétiques pour récupérer l'énergie des mouvements humains, notamment en fabriquant une chaussure capable de générer et d'accumuler de l'énergie. Dans cette optique, le PVDF électro-actif et l'électromagnétisme sont utilisés comme éléments de récupération d'énergie intégrés dans la semelle de la chaussure, tandis qu'un générateur électrostatique est également inclus pour augmenter la récupération d'énergie. L'objectif ultime de cette étude est de développer un système intégré dans la semelle de chaussure permettant une meilleure récupération d'énergie par rapport aux structures précédentes.

III.1. Prototype utilisant des polymères piézoélectriques pour maximiser la récupération d'énergie :

Les figures III.1, III.2 et III.3 illustrent trois structures du système mécanique. Dans la Figure III.1, on observe une configuration classique où l'excitation mécanique et l'étirement du polymère vibrent à la même fréquence f_m et le courant récupéré est corrélé à cette fréquence. En considérant une déformation uniforme de l'échantillon, la puissance collectée sur la charge peut être calculée en utilisant la formule $P = RI^2$, où R représente la charge électrique [103].

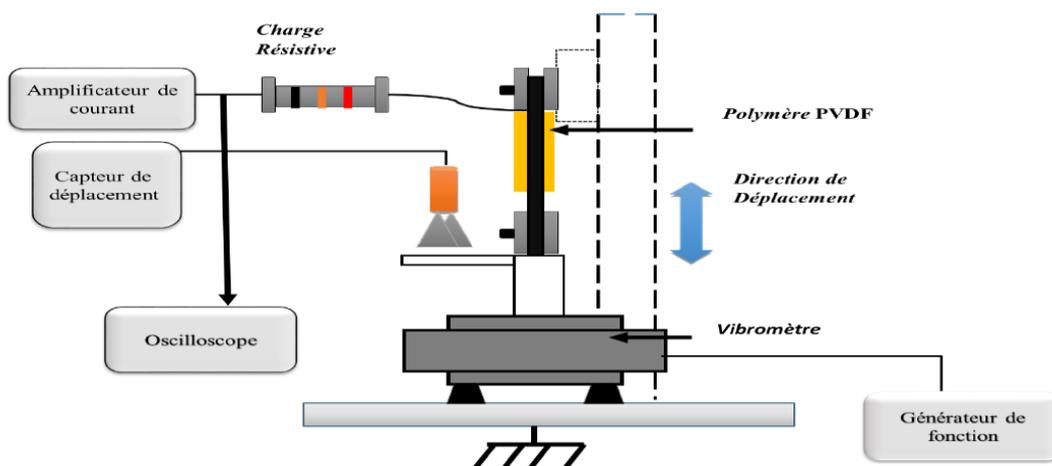


Figure III.1. Schéma du circuit prototype de la structure classique [103].

Dans la deuxième structure représentée dans la figure III.2, la composante principale consiste en une structure métallique avec un film polymère attaché. Ainsi, l'excitation mécanique génère deux cycles de déformation du polymère pour chaque cycle à une fréquence de $2 \cdot f_m$. L'avantage principal de cette configuration est de doubler la fréquence, amplifiant ainsi la valeur du courant, qui est proportionnelle à la puissance récupérée.

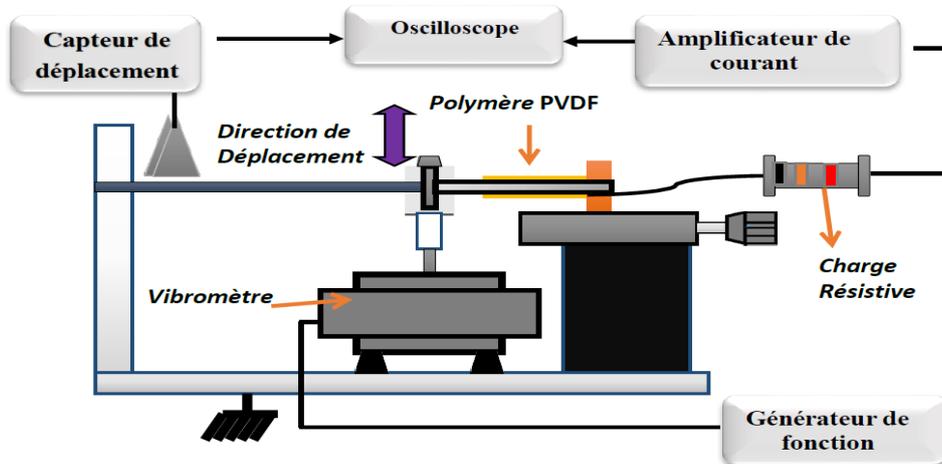


Figure III.2. Schéma du circuit prototype de la structure améliorée [103].

La Figure III.3 présente le système mécanique où le film de polymère PVDF est fixé à une extrémité au métal et à l'autre extrémité à la partie fixe du support de base. En utilisant un vibromètre pour l'excitation mécanique, l'échantillon de polymère est étiré dans les deux directions.

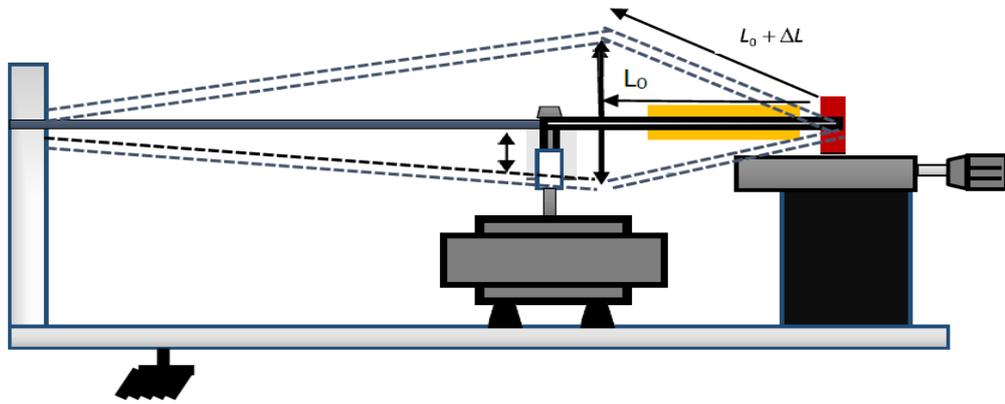


Figure III.3. La configuration du système mécanique améliorée [103].

Circuit équivalent :

Pour des informations plus détaillées, veuillez consulter et parcourir la référence [103].

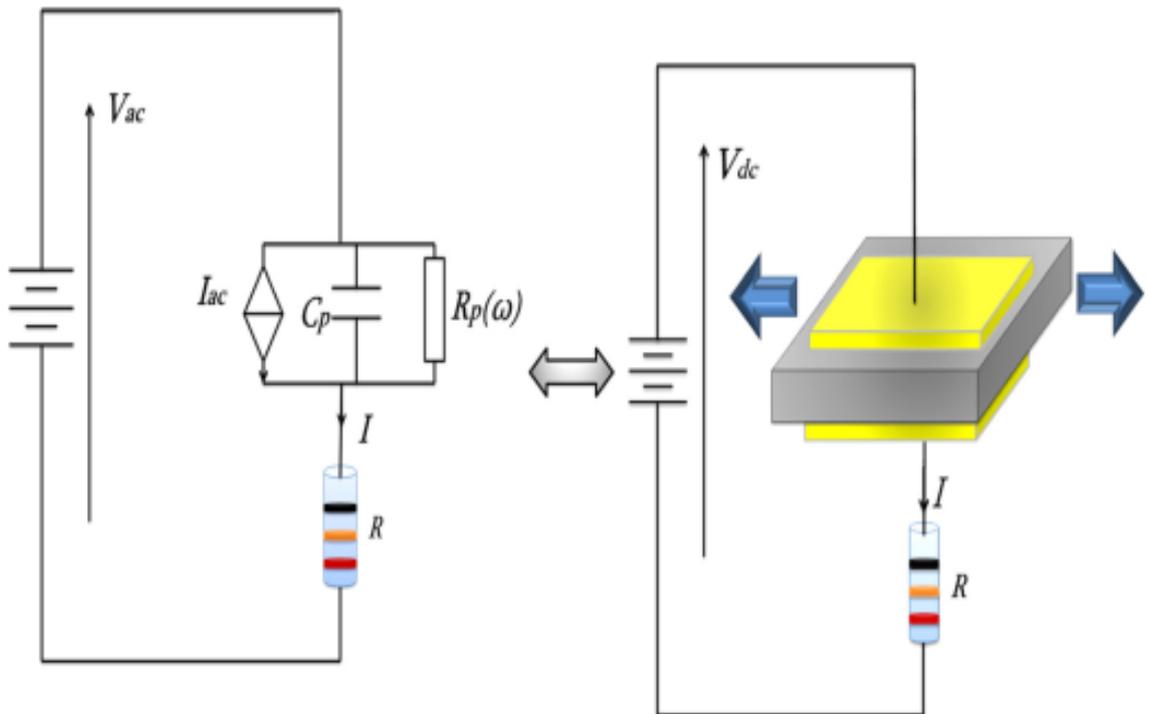


Figure III.4. Le schéma électrique équivalent simplifié [103].

III.2. Prototype utilisant des polymères électromagnétiques pour maximiser la récupération d'énergie :

Dans la figure III.5 nous observons le schéma d'un système électromagnétique composé d'une bobine et d'un aimant permanent relié à un ressort. L'application d'une force F sur l'aimant le déplace en translation à travers la bobine. Ce déplacement engendre une tension U aux bornes de la bobine, fournissant ainsi de l'énergie à une charge électrique représentée par une résistance R_L dans le schéma.

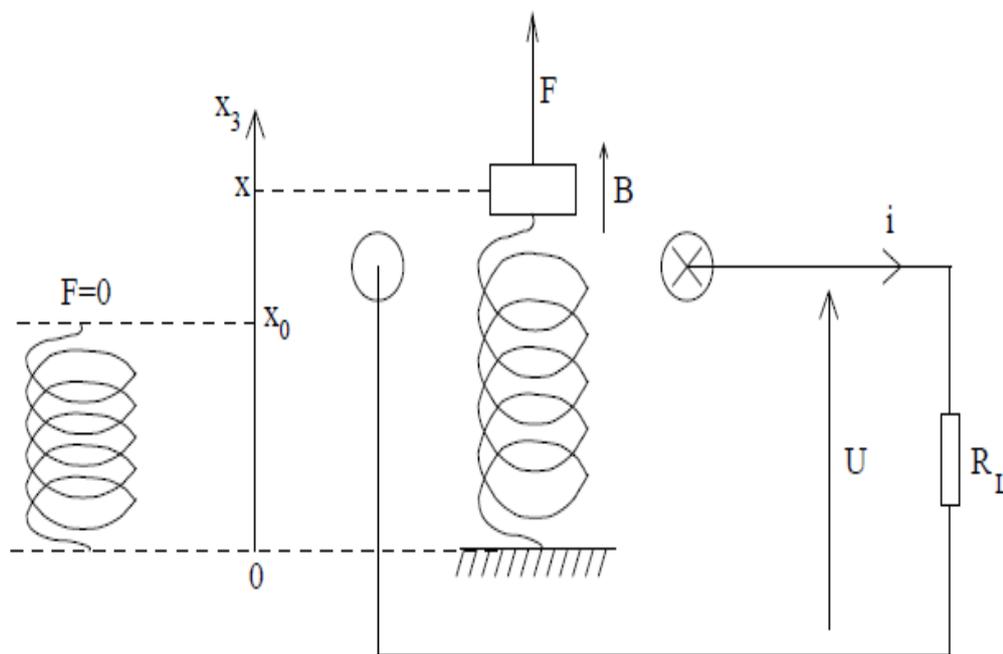


Figure III.5. Système électromagnétique linéaire.

Le mouvement est étudié dans une seule dimension, notée axe x_3 . Sur cet axe, x représente à la fois la position de l'aimant et la longueur du ressort. Les différentes forces appliquées à l'aimant, de masse M , sont les suivantes :

- Son poids : $P = Mg$, où $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ est l'accélération gravitationnelle.
- La force externe F .
- La force élastique du ressort : $F_{\text{ressort}} = -k(x - x_0)$, où k est la raideur du ressort et x_0 sa longueur sans aucune force, comme indiqué sur la figure III.4.
- La friction sèche, qui est négligée ici.

- La friction visqueuse : $F_{\text{visqueuse}} = -f \frac{dx}{dt}$, où f est le coefficient de friction visqueuse.
- La force électromagnétique due à la conversion électromécanique : $F_{\text{em}} = -Bli$, où i est le courant traversant RL, l est la longueur totale du fil constituant la bobine. Le champ magnétique B dû à l'aimant est supposé constant dans le temps et uniforme à proximité de la bobine

La loi mécanique fondamentale appliquée à l'aimant est :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = P + F_{\text{ressort}} + F_{\text{visqueuse}} + F_{\text{em}} + F$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -Mg - k(x - x_0) - f \frac{dx}{dt} - Bli + F$$

De plus, $U = E - R_e i - L_e \frac{di}{dt}$

R_e et L_e sont respectivement la résistance et l'auto-inductance de la bobine. E est la force électromotrice induite: $E = B - R_e i - L_e \frac{di}{dt}$. Cette expression simple suppose que les pertes magnétiques sont négligées dans cette étude.

Ces différentes relations conduisent au système d'équations :

$$\begin{cases} M \frac{d^2x_1}{dt^2} + f \frac{dx_1}{dt} + Kx_1 = -Bli + F \\ U = Bl \frac{dx_1}{dt} - R_e i - L_e \frac{di}{dt} \end{cases}$$

Circuit équivalent :

Dans le domaine de Laplace, $U, i, V_1 = \frac{dx_1}{dt} V_1$ et F deviennent respectivement $U(p), I(p), V_1(p)$.

$$Z_e(p) = R_e + L_e p \text{ et } Z(p) = \frac{k}{p} + f + Mp$$

Sont respectivement l'impédance électrique de la bobine et l'impédance électrique équivalente du système mécanique résonant.

$$\begin{cases} F + \frac{Bl}{Z_e}U = \frac{(Bl)^2}{Z_e}V_1 + Z(p)V_1 \\ I = -\frac{U}{Z_e} + \frac{Bl}{Z_e}V_1 \end{cases}$$

Ces équations correspondent à un circuit équivalent, basé sur l'analogie électromécanique entre {force, vitesse} et {tension, courant}. Le transformateur, dont le rapport est $N = \frac{Bl}{Z_e}$, connecte la branche mécanique et la branche électrique (Figure III.6 à gauche).

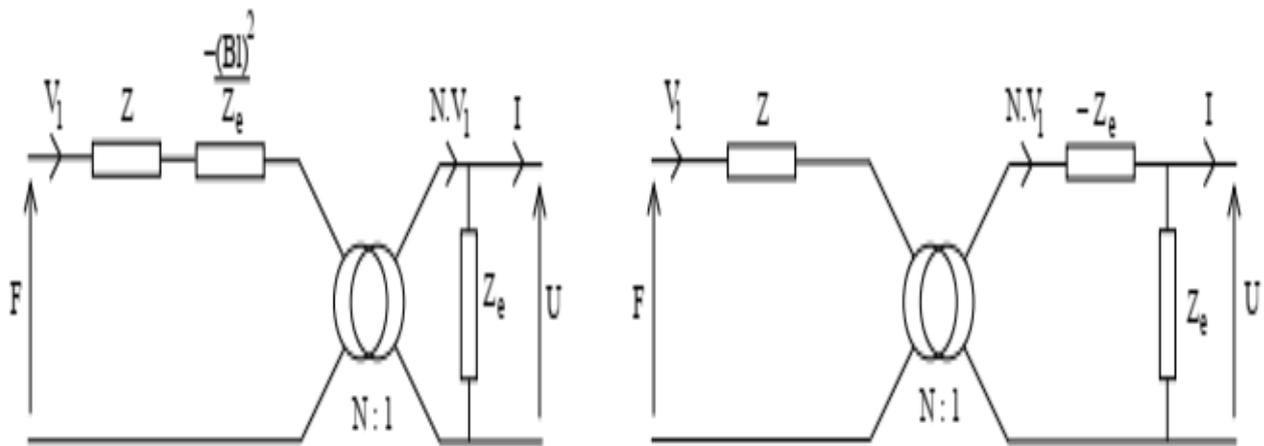


Figure III.6. Circuits équivalents du générateur électromagnétique. À gauche : forme initiale. À droite : forme modifiée.

L'impédance $\frac{(Bl)^2}{Z_e}$ au primaire devient $-\frac{(Bl)^2}{Z_e} \left(\frac{Z_e}{Bl}\right)^2 = -Z_e$ au secondaire, ce qui modifie le circuit équivalent comme sur la figure III.6 (droite). Cette impédance négative et le transformateur représentent la conversion électromécanique.

III.3. Prototype utilisant des polymères électromagnétiques et piézoélectriques (système hybride) pour maximiser la récupération d'énergie :

La structure développée est illustrée à la Figure III.5. Un nouveau système mécanique a été intégré dans la semelle de la chaussure, utilisant le polymère PVDF et l'électromagnétisme comme récupérateur d'énergie.

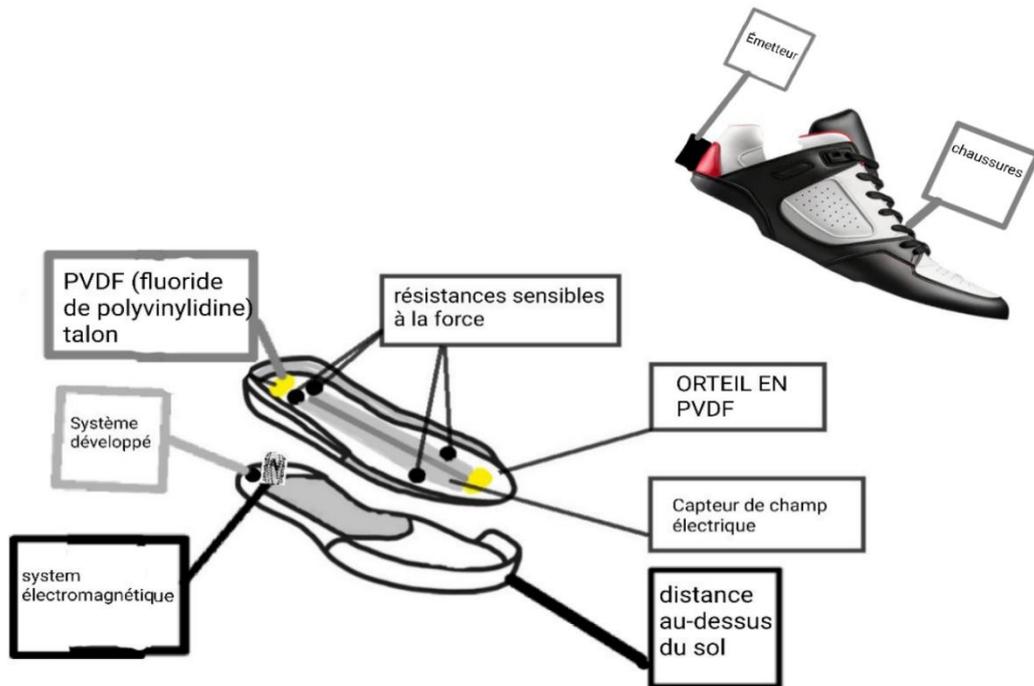


Figure III.7. Le schéma du film PVDF et électromagnétique intégré à la chaussure.

III.4. Modélisation :

III.4.1. Modélisation du système PVDF :

La modalisation et la simulation du système dépendent sur les équations de la tension et de la puissance qui nous représentait suivent :

$$U = \frac{R_L \cdot N \cdot Z_e \cdot F}{(Z_e + R_L) Z_m + (R_{conv})^2} \quad (III.1)$$

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

Avec : $Z_m = jL_m \omega + \frac{1}{jC_m \omega} + R_m$ (III.3) Représente l'impédance mécanique.

$R_{conv} = \frac{h_{33}}{\omega}$ (III.4) Correspondre à la conversion électromécanique.

$Z_e = \frac{1}{jC_0 \omega}$ (III.5)

$$C_m = \frac{8.L_3.S_{33}^D}{\pi^2.A_3} \quad (III.6)$$

C_0 Est généralement appelée capacité bloquée. C'est la capacité d'un condensateur dont le diélectrique.

$$L_m = \frac{\rho.L_3.S.A_3}{2} \quad (III.7)$$

$$N = \frac{g_{33}}{s_{33}^D} \cdot C_0 = h_{33} \cdot C_0 \quad (III.8)$$

$$R_m = \frac{2\pi}{Q_m} \cdot \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (III.9)$$

$$L_3 = \frac{A_3}{C_0 \cdot \beta_{33e}^S} \quad (III.10)$$

$$\beta_{33e}^S = \beta_{33e}^T \left(1 + \frac{g_{33}^2}{s_{33}^D \cdot \beta_{33}^T}\right) \quad (III.11)$$

$$\beta_{33}^T = \frac{1}{\epsilon_{33}^T} \quad (III.12)$$

Avec :

L_3 : Longueur de bar piézoélectrique.

Tableau III.1. Les paramètres de film piézoélectrique PVDF.

Symbole	Paramètre	
A_3	La surface	1000 (mm) ²
d_{33}	Constante de charge	-33×10 ⁻¹² C/N
g_{33}	Constante de tension	-330×10 ⁻³ V m/N
ρ	Densité	1780 Kg /m ³
Q_m	Facteur de qualité	10
h_{33}	Constant piézoélectrique	1.52 ×10 ⁹
C_0	Capacité bloquée	245 pF
C_m	La capacité mécanique	1.4320 nF
ϵ_{33}^T	La permittivité dans la direction z	12

F	La force appliqué	10 Ns/m
f	La fréquence	10 Hz
f_m	La fréquence de marche	3 Hz

III.4.2. Simulation du système PVDF :

III.4.2.1. Simulation de la puissance :

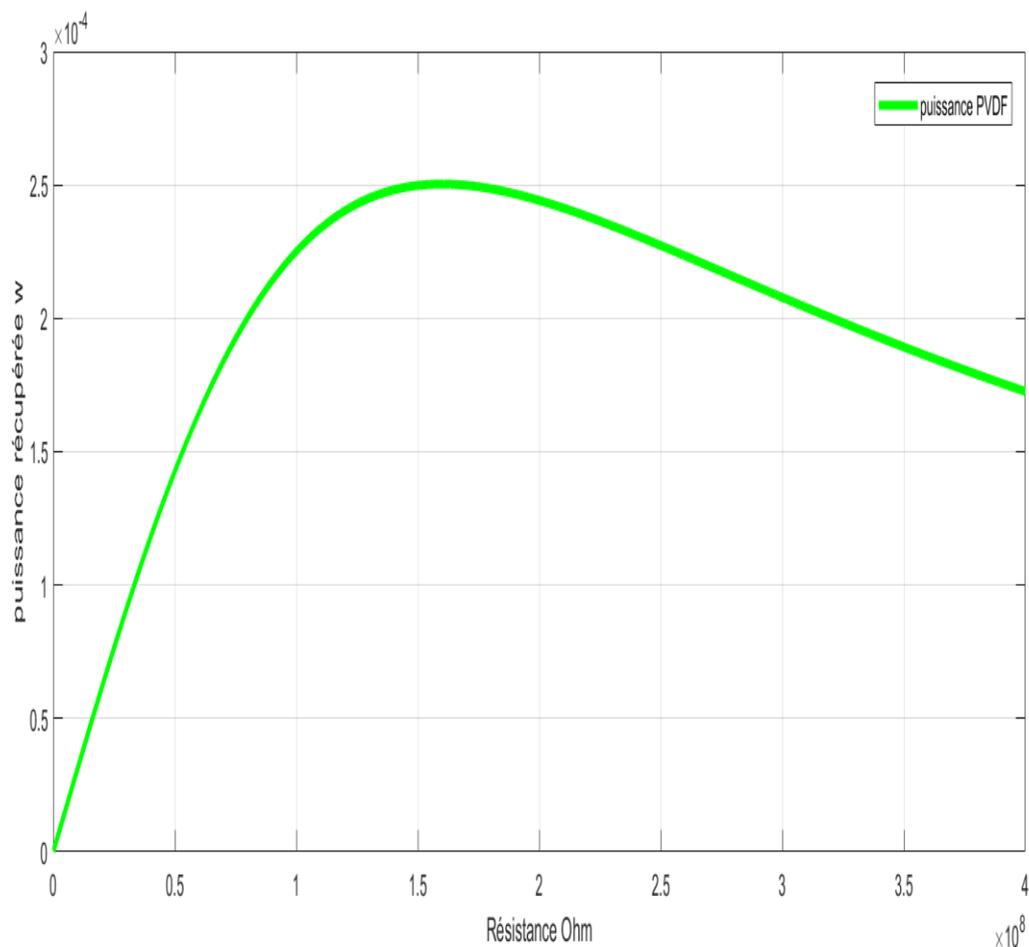


Figure III.6. La puissance récupérée par le film PVDF.

La figure montre la puissance récupérée en relation avec la charge électrique à une déformation de 0,1 %. Ces résultats révèlent qu'il y a une résistance de charge optimale de $150,5 \text{ M}\Omega$, correspondant à une puissance de récupération maximale de $249,9 \mu\text{W}$.

Dans la figure III.7, le courant de la structure développée possède une fréquence doublée quatre fois par rapport au déplacement

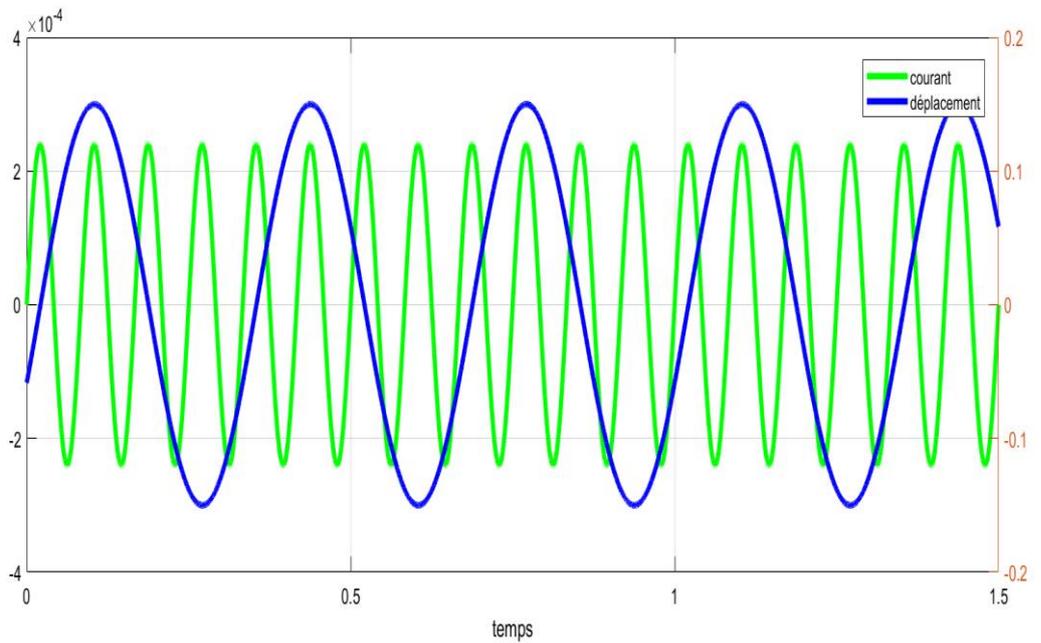


Figure III.7. L'évolution pratique de courant et le déplacement dans la structure développée.

III.4.2.2. Simulation de la tension :

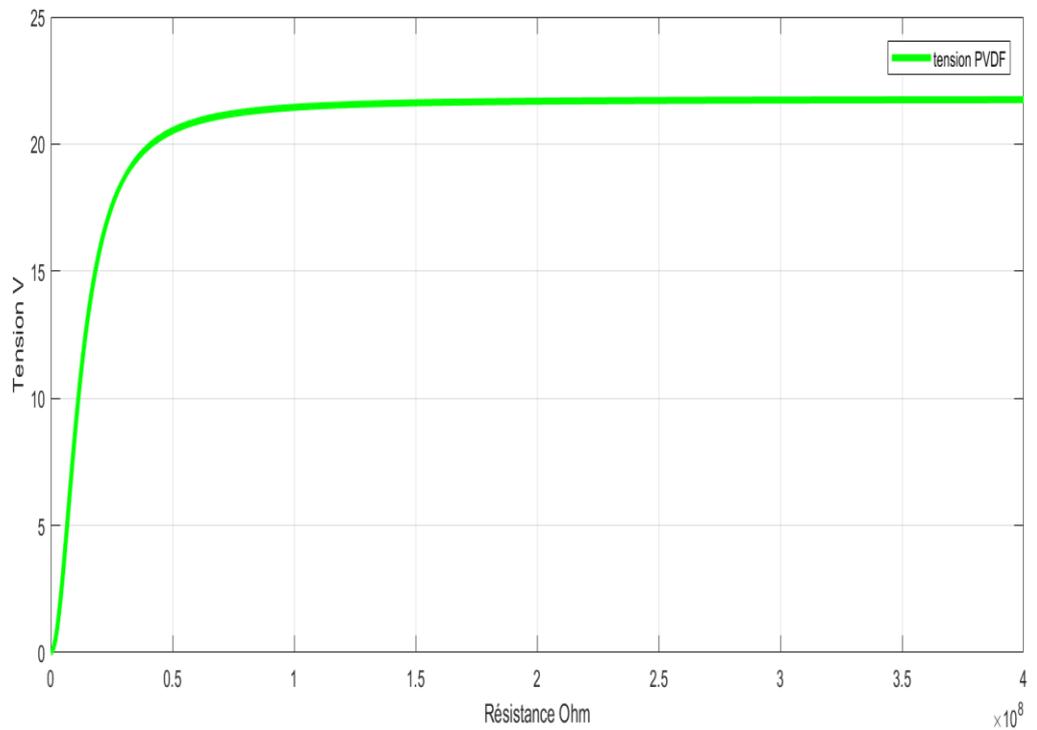


Figure III.8: la tension générée par le film PVDF.

Le graphique illustre la tension produite en fonction de la charge électrique à une déformation de 0,1 %. Ces données mettent en évidence l'existence d'une résistance de charge optimale de 60,42 MΩ, donnant lieu à une tension générée maximale de 20,9 V.

III.4.3. Modélisation du système électromagnétique :

La modalisation et la simulation du système dépendent sur les équations de la tension et de la puissance qui nous représentait suivent :

$$U = \frac{R_L Z_e N F}{(Z_e + R_L) Z_{(m)} + (R_{conv})^2} \quad (III.13)$$

$$P = \frac{R_L R_{conv}^2}{2|(Z_e + R_L) Z_{(m)} + (R_{conv})^2|^2} \quad (III.14)$$

$$Z_m = \frac{K}{j\omega} + f + jM\omega \quad (III.15) \text{ Représente l'impédance mécanique.}$$

$$Z_e = R_e + jL_e\omega \quad (III.16)$$

$$N = \frac{Bl}{Z_e} \quad (III.17)$$

$$R_{conv} = Bl \quad (III.18) \text{ Correspondre à la conversion électromécanique.}$$

$$R_e = \frac{\rho_{Cu} l}{S_{Cu}} \quad (III.19) \text{ La résistance de la bobine.}$$

$$L_e = \frac{\mu_0 n^2 \pi R^2}{h_b} \quad (III.20) \text{ La self-inductance de la bobine.}$$

Tableau III.2. Les paramètres de system électromagnétique

Symbole	Paramètre	
S_{Cu}	section de la bobine	$2 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
ρ_{Cu}	la résistivité de la bobine	$1.9 \times 10^{-5} \text{ } \Omega\text{m}$
h_b	La hauteur de la bobine	7 cm
R	le rayon de la bobine	2.4 cm
l	la longueur totale du fil	435.7 m
B	densité de flux	1.6T
M	Le poids	500 g

K	la primitivité de ressort	0.9
F	La force appliqué	7 Ns/m
f	La fréquence	10 Hz
n	le nombre de tours de fil	1981

III.4.4. Simulation du système électromagnétique :

III.4.4.1. Simulation de la puissance :

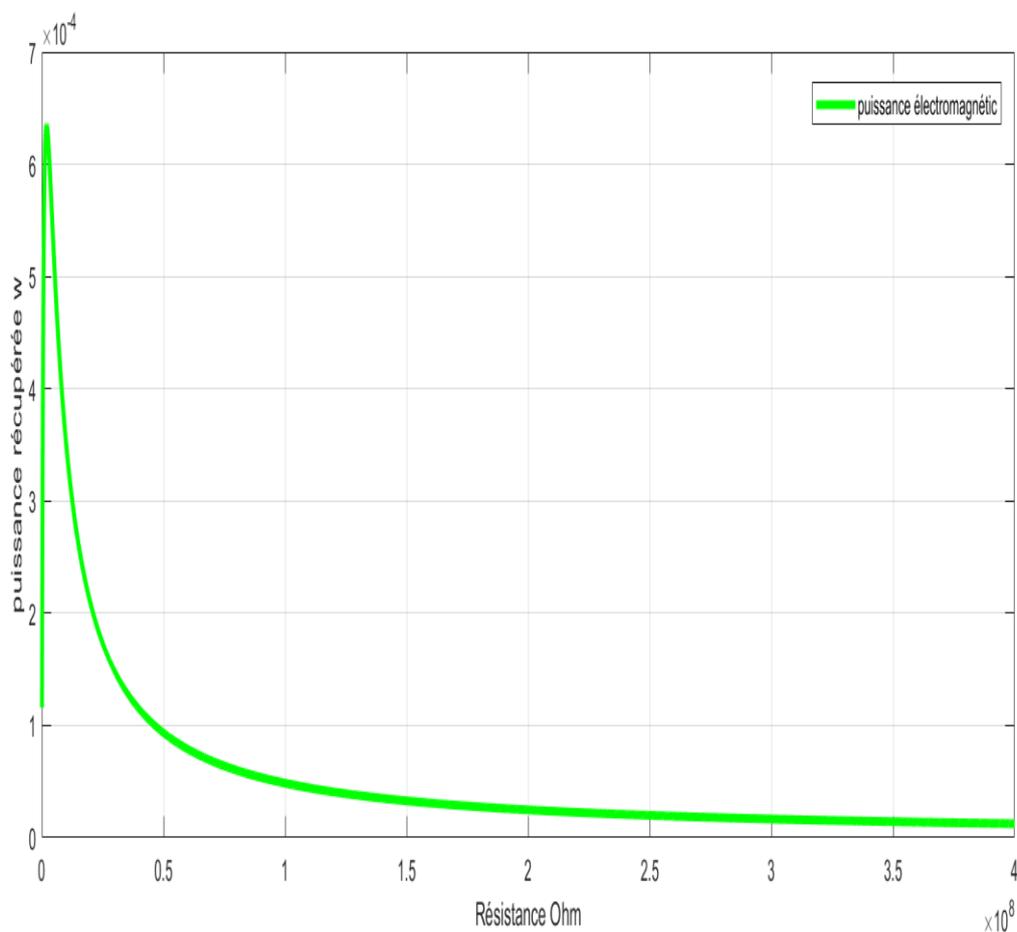


Figure III.9. La puissance récupérée par le system électromagnétique.

La figure montre la connexion à la fonction charge électrique pour une déformation de 0,1%. Ces résultats nécessitent la présence d'une résistance de charge optimale de $1,75 \text{ M}\Omega$, correspondant à une capacité de récupération maximale de $632,9 \text{ }\mu\text{W}$.

III.4.4.2. Simulation de la tension :

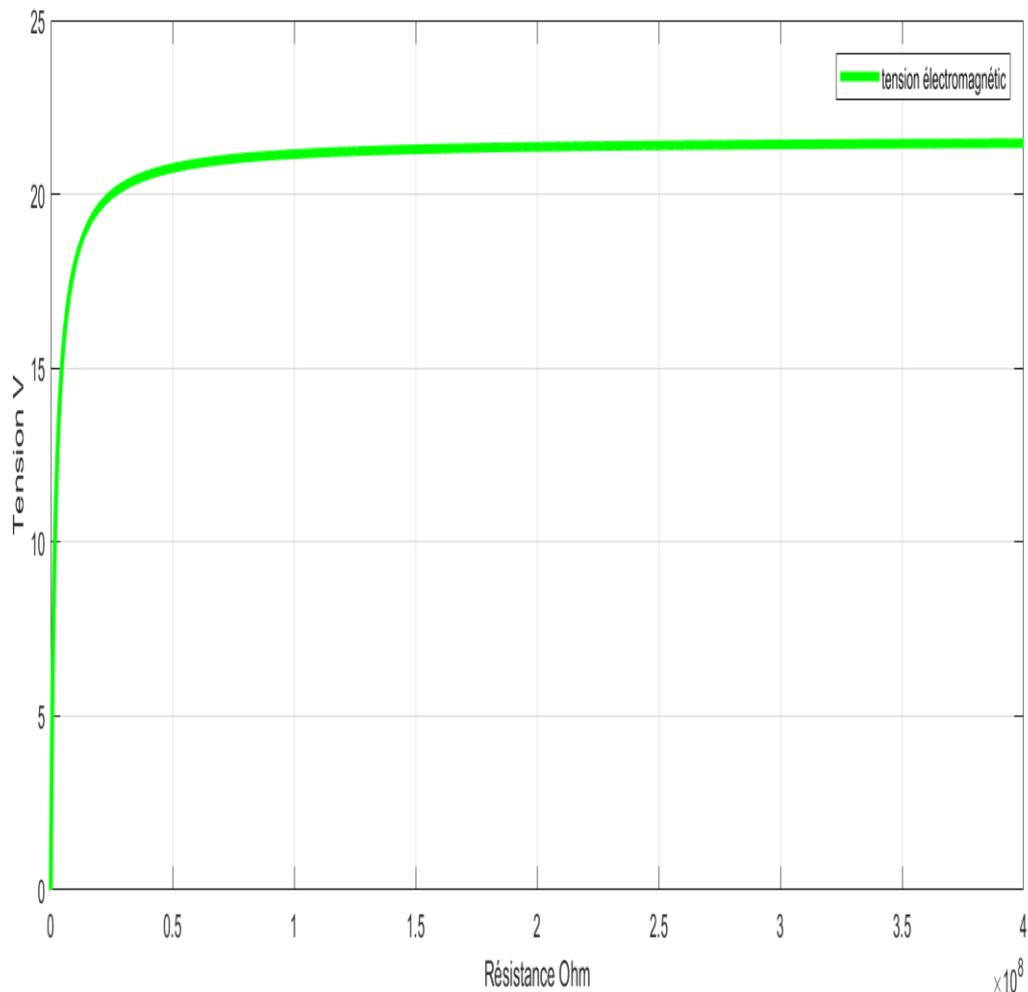


Figure III.10. La tension générée par le system électromagnétique.

Le graphique montre la tension produite en fonction de la charge électrique pour une déformation de 0,1 %. Ces données révèlent qu'il existe une résistance de charge optimale de 61.16 M Ω , conduisant à une tension générée maximale de 20.9V.

III.5. Simulation du système hybride (électromagnétique et PVDF) :

III.5.1. Simulation de la puissance:

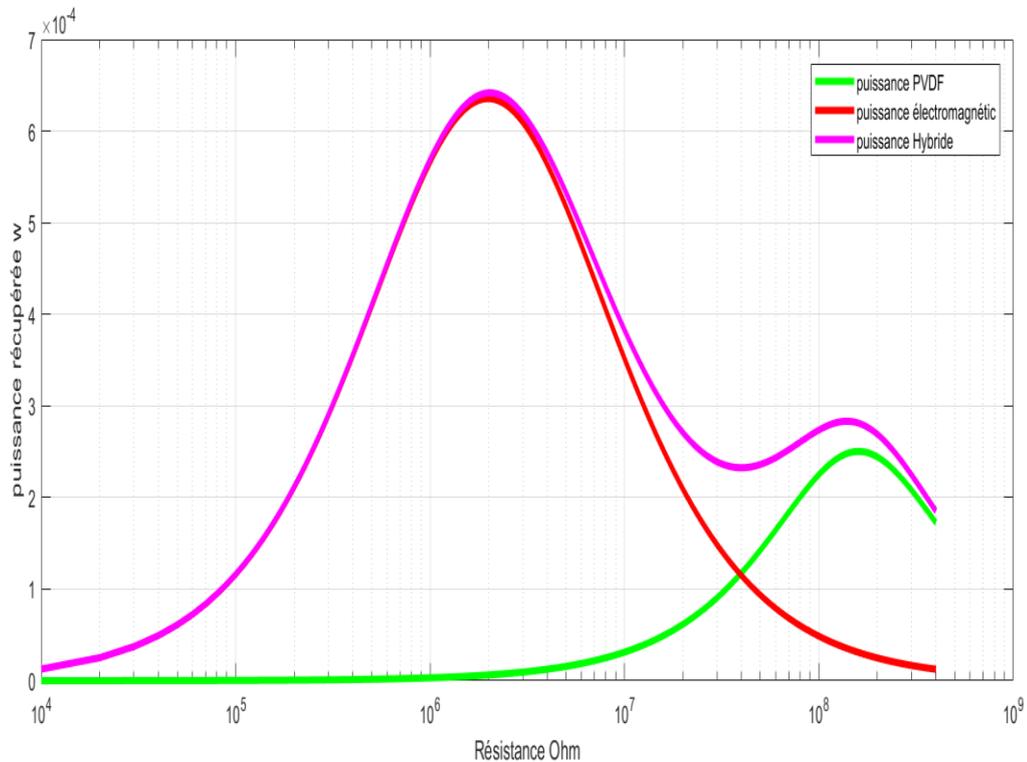


Figure III.11. La puissance récupérée par le système PVDF, système électromagnétique et le système hybride.

Cette figure illustre la puissance récupérée en fonction de la charge électrique à une déformation de 0,1 %. Ces données mettent en évidence une résistance de charge optimale de 72,5 M Ω dans le système PVDF, correspondant à une puissance de récupération maximale de 115,5 μ W. En revanche, dans le système électromagnétique, la puissance maximale atteint 632,9 μ W avec une résistance de charge optimale de 1,75 M Ω .

Quant au système hybride, il affiche une puissance maximale de récupération de 641,7 μ W avec une résistance de charge optimale de 2 M Ω .

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit un système hybride mécanique novateur, conçu pour être intégré dans la semelle d'une chaussure, dans le dessein d'optimiser les performances de conversion électromécanique des polymères piézoélectriques et électromagnétiques (système hybride) en vue de la récupération d'énergie vibratoire. Ce dispositif repose sur un mécanisme mécanique spécifique visant à améliorer à la fois la puissance et la tension récupérées.



Conclusion générale



Conclusion générale

Les travaux exposés dans ce mémoire portent sur l'amélioration du système de récupération d'énergie mécanique en vue de fournir de l'énergie à des vêtements intelligents. Ce domaine de recherche est largement ouvert, comme en témoigne la diversité des solutions technologiques mises en œuvre.

Dans la première section, une synthèse bibliographique a été réalisée sur le sujet de la récupération d'énergie, en mettant l'accent sur les différentes échelles de cette récupération. Cette revue de littérature s'est concentrée sur l'état de l'art des ressources et des systèmes de récupération d'énergie ambiante, notamment dans l'environnement humain, les situant dans le contexte global des systèmes de récupération d'énergie.

La deuxième partie de ce travail a abordé les matériaux intelligents et leurs applications, en explorant divers domaines d'application du textile intelligent. Des travaux récents ont été présentés dans les domaines de la communication, de la médecine, de la sécurité, des loisirs, de la surveillance, du sport et du militaire.

Enfin, un nouveau système hybride mécanique a été développé et intégré dans la semelle d'une chaussure, permettant d'amplifier la puissance récupérée par rapport aux structures précédentes.

En conclusion, les polymères piézoélectriques et électromagnétiques (système hybride) se positionnent comme des matériaux souples en expansion dotés de propriétés physiques particulières. Ils représentent les meilleurs candidats pour le développement futur de micro-générateurs flexibles et d'actionneurs souples.



Perspectives



Perspectives

Les perspectives de cette étude pour d'autres chercheurs dans leurs travaux futurs se déclinent comme suit :

- L'optimisation du système PVDF pour des performances améliorées.
- L'intégration d'un micro thermo-générateur dans la semelle de chaussure pour récupérer de l'énergie supplémentaire.
- L'ajout d'une carte pour le redressement et l'envoyer de l'énergie par émetteur dans le talon de la chaussure afin de permettre une connexion sans fil.
- La concrétisation de ce système dans des applications réelles.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27électricité.
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie>.
- [3] https://www.belgium.be/fr/environnement/consommation_durable/sources_d_energie/energie.
- [4] <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>.
- [5] FJ BLATT, PA SCHROEDER, CL FOILES ET D GREIG: Thermoelectric power of materials. Plenum Press, New York, 1976.
- [6] Farmer Justin RYAN: A comparison of power harvesting techniques and related energy storage. Thèse de doctorat, Dept. Mech. Eng., Virginia Polytechnic Institute and State Univ. Blacksburg, VA, 2007.
- [7] RL MYERS: The basics of physics. Greenwood Press, Westport, Conn, 2006.
- [8] R. ELLIOTT: Electromagnetics: History Theory and Applications, pages i–xxiii. Wiley-IEEE Press, 1993.
- [9] O. MAH: Fundamentals of photovoltaic materials. National Solar Power Research Institute, 1998.
- [10] J.M. DAMASCHKE: Design of a low-input-voltage converter for thermoelectric generator. Industry Applications, IEEE Transactions on, 33(5):1203–1207, Sep 1997.
- [11] GS NOLAS, J SHARP ET HJ GOLDSMID: Thermoelectrics: basic principles and new materials developments. Springer, New York, 2001.
- [12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Source_d%27énergie.
- [13] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne#Production_et_puissance_installée.
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Générateur_thermoélectrique.
- [15] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyroélectricité>.
- [16] Y. Zhu, S. R. Moheimani, et M. R. Yuce, « A 2-DOF MEMS ultrasonic energy harvester », Sens. J. IEEE, vol. 11, no 1, p. 155–161, 2011.
- [17] F. U. Khan ET others, « State of the art in acoustic energy harvesting », J. Micromechanics Micro engineering, vol. 25, no 2, p. 23001, 2015.
- [18] (en) « Data and statistics - Electricity - World 2019 [archive] », sur Agence internationale de l'énergie, octobre 2021 (consulté le 19 février 2022).
- [19] International Energy Agency, « Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy » [archive] [PDF], sur Agence internationale de l'énergie, 2014 (consulté le 12 janvier 2021).
- [20] Sébastien Boisseau, « Récupération d'énergie vibratoire à électrets », l'École Doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal (EEATS), 2006.
- [21] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, et T. C. Green, « Energy

Références bibliographiques

- harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices », Proc.
- [22] <https://theses.hal.science/tel-00618233/document> .
- [23] T STARNER et J PARADISO : Human generated power for mobile electronics. In : Low Power Electronics Design, C.Piguet, ed, 45:1–35, 2004.
- [24] JF ANTAKI, GE BERTOCC, EC GREEN et AL. : A gait powered autologous battery charging system for artificial organs. ASAIO Journal, 41(3):M588–M595, 1995.
- [25] LC ROME, L FLYNN, EM GOLDMAN et AL. : Generating electricity while walking with loads. Science, (309):1725–1728, 2005.
- [26] JM DONELAN, Q LI, V NAING et AL. : Biomechanical energy harvesting : generating electricity during walking with minimal user effort. Science, (319):807–810, 2008.
- [27] Q. LI, V. NAING, J.A. HOFFER, D.J. WEBER, A.D. KUO et J.M. DONELAN : Biomechanical energy harvesting : Apparatus and method. In Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, pages 3672–3677, 2008.
- [28] COMPANY : Demonstration experiment of the “Power-Generating Floor” at Tokyo station. East Japan Railway Company, 2008.
- [29] C.-Y. Sue ET N.-C. Tsai, « Human powered MEMS-based energy harvest devices », Appl. Energy, vol. 93, p. 390–403, 2012.
- [30] F. Davis ET S. P. Higson, « Biofuel cells—recent advances and applications »,
- [31] B. J. Hansen, Y. Liu, R. Yang, et Z. L. Wang, « Hybrid nanogenerator for concurrently harvesting biomechanical and biochemical energy », ACS Nano, vol. 4, no 7, p. 3647–3652, 2010.
- [32] C. Xu, C. Pan, Y. Liu, et Z. L. Wang, « Hybrid cells for simultaneously harvesting multi-type energies for self-powered micro/nanosystems », Nano Energy, vol. 1, no 2, p. 259–272, 2012.
- [33] R BOUD : Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Current Energy. UK Dept. of Trade and Industry (DTI), DTI Report FES-R-132, AEAT Report AEAT/ENV/1054, 2003.
- [34] GW TAYLOR : Wave energy commercialisation. London Energy Group, 2003.
- [35] Graeme MACKIE : Wave power and operator experience. Seatech Week, CDROM proc, pages 182–197, 2004.
- [36] B DREW, A PLUMMER et M SAHINKAYA : A review of wave energy converter technology. Part A : J. Power and Energy, page 887–902. Proc. IMechE Vol. 223, 2009.

Références bibliographiques

- [37] D BOWNESS, AC LOCK, W POWRIE et AL. : Monitoring the dynamic displacements of railway track. *Transportation Science and Technology* 20 out of 33, pages 13–22. SAGE, 2007.
- [38] GR PENAMALLI : Structural health monitoring and energy harvesting for railroad. Thèse de doctorat, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, NY., 2011.
- [39] John WANG, Teng LIN et Lei ZUO : High efficiency electromagnetic energy harvester for railroad application. In *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages V004T08A037–V004T08A037. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [40] Lamri, M., & Hachemi, C. (2013). « Récupération d'énergie mécanique à l'aide des matériaux intelligents par des méthodes non linéaires », (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).
- [41] CUGAT O., DELAMARE J. & REYNE G., Magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS), *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 6 pp. 3607–3612, 2003.
- [42] MITCHESON P.D., YEATMAN E.M., KONDALA RAO G., HOLMES A.S. & GREEN T.C., Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices, *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9 pp. 1457–1486, 2008.
- [43] <https://theses.hal.science/tel-00618233/document> .
- [44] <https://www.paris-art.com/lieux/mit-media-lab/> .
- [45] J. A. Paradiso et M. Feldmeier, A compact, wireless, self-powered pushbutton controller, *Internat. Conf. on Ubiquitous Computing (UbiComp 2001)*, Atlanta GA, sept. 2001, pp. 299-304.
- [46] A. Crisan, Typing power, Brevet américain US 5 911 529, Compaq Computer Corporation, Houston, 15 juin 1999.
- [47] N. S. Shenck et J. A. Paradiso, Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics, *IEEE Micro*, 21 (2001) pp. 30-42.
- [48] https://www.electricity-magnetism.org/fr/micro-generateurs-hydroelectriques/?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR2NVqSlgN0Wu-zyfXiwGzCGgXF66gmGj6b2zfCmbkb_7nAbL6YsfkrfjBQ_aem_ATpp3rvpISpVInFpOtaOmNFsV9pjTC_9Lmh-FTiHGFLXZ2MAschVtZMWWpBexYOLaCWW_vx_17bI_nzaeovCI2T .
- [49] <https://www.garanka.fr/2020/08/18/fonctionnement-chaudiere-micro-cogeneration/> .
- [50] <https://www.enerbee.fr/innovation/> .

Références bibliographiques

- [51] <https://www.encyclopedie-energie.org/le-micro-generateur-enerbee-une-solution-autonome-en-energie-sans-fil-ni-prise/> .
- [52] Le Neindre B & Cancouët P (2009) Des matériaux intelligents: les polymères stimulables. Ed. Techniques Ingénieur.
- [53] Bensaude-Vincent B (2000). Éloge du mixte. Des composites aux matériaux intelligents. Techniques et architecture, (448), 80-83.
- [54] Chetouh, S. (2010). Caractérisation mécanique des matériaux intelligents de type magnétostrictifs et leur application [archive].
- [55] Gonzalez C.H (2002). Étude des comportements électro-thermomécaniques et de la stabilisation martensitique d'alliages monocristallins à mémoire de forme base cuivre (Doctoral dissertation, Villeurbanne, INSA.
- [56] La technologie HP PageWide réinvente le jet d'encre. www.zednet.fr, janvier2014.
- [57] Cécile Fizanne-MichelTM “Les alliages à mémoire de forme, une nouvelle famille de matériaux” Publié le 20 juin 2022.
- [58] <https://speriengabriel.wixsite.com/footenergie/blank-1>.
- [59] J. Salenson, Motorisations piézoélectriques à fonctionnement quasi-résonant Ou quasi-statique : analyse des contraintes d'alimentation et expérimentation De structures innovantes, Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2000.
- [60] V. Monturet, Conception optimale des actionneurs piézoélectriques à l'aide D'une méthodologie de type « problème inverse » - Application au cas des Actionneurs répartis, Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2002.
- [61] (en) Shung KK, Cannata JM, Zhou QF, « Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: A review », Journal of Electroceramics, vol. 19, 2007, p. 139-145.
- [62] Uchino, 2010, p. 318-345.
- [63] (en) H. J. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen and S. Sherrit, « High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers », Sensors, vol. 14, 2014, p. 145326 (DOI 10.3390/s140814526, lire en ligne [archive]).
- [64] <https://dSPACE.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/055f2028-074f-4dd8-bea7-bc094d34feb9/content>.
- [65] G. Fournet, Electromagnétisme à partir des équations locales, Masson, 1985.
- [66] F. Claeysen, R. L. Letty, N. Lhermet, F. Barillot, H. Fabbro et T. Maillard, Actionneurs piezoélectriques pour du positionnement précis et rapide, dans 2e Colloque sur les matériaux

Références bibliographiques

- électro actif et leurs applications en génie électrique (MAGELEC), pp. 157-162, Toulouse, 2001.
- [67] J. N. Foulc, A. Frédéric et O. Tillement, 17ème Congrès Français de Mécanique, Communication, Troyes, France (2005).
- [68] https://fr.wikipedia.org/wiki/Microsystème_électromécanique#.
- [69] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi0nZmIwuyFAxVgaqQEhfXYAAsQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Feduscol.education.fr%2Fsti%2Fsites%2Feduscol.education.fr.sti%2Ffiles%2Fressources%2Fpedagogiques%2F5616%2F5616-les-technologies-mems-ens.docx&usq=AOvVaw2mQf3hYqrCMj3s215jnWWu&opi=89978449>.
- [70] O. L. Shanmugasundaram, Smart and intelligent textiles [archive], The Indian Textile Journal, février 2008.
- [71] (en-US) Ishan, « What's the difference between Electronic Textiles (E-Textiles) and Smart Textiles? [archive] », sur Electronic textiles & Wearables, 12 février 2023 (consulté le 18 avril 2023).
- [72] (en) Dilan Canan Çelikel, Smart E-Textile Materials, IntechOpen, 30 octobre 2020 (ISBN 978-1-83962-480-3, lire en ligne [archive]).
- [73] Direct Industry – Tissu conducteur – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [74] Electromagnetic Field Shielding & Conductive Fabrics – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [75] CNRS – Électronique organique – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [76] ISORG – Électronique imprimée organique – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [77] Agence d'études et de promotion de l'Isère – Électronique imprimée – Électronique organique – Vers une nouvelle filière électronique ? – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [78] University of California, Berkeley - Josephine B. Lee et Vivek Subramanian - Organic Transistors on Fiber: A first step towards electronic textiles – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [79] Electronic Textiles: Fiber-Embedded Electrolyte-Gated Field-Effect Transistors for e-Textiles - Mahiar Hamedi, Lars Herlogsson, Xavier Crispin, Rebeca Marcilla, Magnus Berggren, Olle Inganäs – publié le 22 janvier 2009 – consulté le 29 octobre 2013 [archive].
- [80] Nature Materials - Towards woven logic from organic electronic fibres - Mahiar Hamedi¹, Robert Forchheimer & Olle Inganäs – publié le 4 avril 2007 – consulté le 29 octobre 2013 [archive].

Références bibliographiques

- [81] Bedeloglu, A., Demir, A., Bozkurt, Y., & Sariciftci, N. S. (2010). A photovoltaic fiber Design for smart textiles. *Textile Research Journal*, 80(11), 1065-1074.
- [82] [Intelligent textiles, Robert R. Mather, Review of Progress in Coloration and Related Topics, 2001, 31 (1), pages 36-41, <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1478-4408.2001.tb00136.x> [archive]].
- [83] [T-shirt OS <http://cutecircuit.com/collections/t-shirt-os/> [archive]].
- [84] Matthieu Combe, « Les e-textiles au service de votre santé [archive] », sur techniques-ingenieur.fr, 28 février 2018.
- [85] «Des vêtements intelligents au service de la santé [archive] », sur futura-sciences.com, 6 décembre 2014.
- [86] « Un maillot de bain connecté pour éviter les coups de soleil [archive] », sur futura-sciences.com, 14 juin 2015.
- [87] Caroline David et Camille Beulque, *Futurotextiles : surprising textiles, design & art*, Stichting Kunstboek, 2012, 179 p. (ISBN 978-90-5856-422-1), p. 85.
- [88] Grifantini, K. (2016). The telltale heartbeat: heart-rate monitors are taking new shapes. *IEEE pulse*, 7(1), 35-38.
- [89] rosner|touch|mp3blue – consulté le 23 octobre 2013 [archive].
- [90] [Electronic textiles Wearable computers, reactive fashion and soft computation, Joanna Berzowska, *Textile*, 2005, Volume 3 (1), pages 2-19].
- [91] R. Rea, C. Beck, R. Rovekamp, M. Diftler, and P. Neuhaus, “X1: A robotic exoskeleton for in-space countermeasures and dynamometry,” in *Proc. AIAA SPACE Conf. Exposition*, 2013.
- [92] *Wearable Electrochemical Sensors and Biosensors: A Review* – Joshua Ray Windmiller, Joseph Wang – publié le 7 septembre 2012 - consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [93] Royal Society of Chemistry - Thick-film textile-based amperometric sensors and biosensors – Yang-Li Yang, Min-Chieh Chuang, Shyh-Liang Lou and Joseph Wang – publié le 22 mars 2010 – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [94] Royal Society of Chemistry - Wearable electrochemical sensors for in situ analysis in marine environments – Kerstin Malzahn, Joshua Ray Windmiller, Gabriela Valdès-Ramírez, Michael J. Schöning et Joseph Wang – publié le 2 juin 2011 – consulté le 25 octobre 2013 [archive].
- [95] [Fabrics and fibers: Chameleon Fabrics, P. Nolan, *Fabric Architecture*, 2004, 16 (1), pages 67-69].
- [96] www.isuppli.com.

Références bibliographiques

- [97] T. E. Starner, Powerful Change Part 1: Batteries and Possible Alternatives for the Mobile Market, *Pervasive Computing*, Vol. 4(1), 2005.
- [98] <http://www.yole.fr/>.
- [99] C. B. Williams et R. B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems, *Sensors and Actuators A*, 52 (1996) pp. 8-11.
- [100] K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt et G. A. Lesieutre, Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply, *IEEE Trans. Power Electronics*, 17 (2002) pp. 669-676.
- [101] A. Kasyap, S. Horowitz, J-S. Lim, K. Ngo, A. Kurdila, T. Nishida, M. Sheplak et L. Cattafesta, Energy Reclamation from a Vibrating Piezoceramic Composite Beam, 9th International Congress on Sound and Vibration (ICSV9), Orlando, USA, 8-11 juillet 2002.
- [102] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, S. Cho, J. Goodman, G. Konduri, J. Kulik, W. Rabiner et A. Wang, Design considerations for distributed microsensors systems, *IEEE Custom Integrated Circuits Conf.*, San Diego, Californie, USA, 16-19 mai 1999.
- [103] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Cherif et al. « An adaptive prototype design to maximize power harvesting using electrostrictive polymers », *J. Appl. Phys.* Vol 112, 054109 (2012).