

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA- JIJEL

Faculté des Sciences et technologies

Département d'électrotechnique



**Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Filière : électrotechnique
Option : électromécanique**

**Etude et modélisation d'un dispositif électromagnétique pour
la récupération d'énergie vibratoire**

Présenté par :

- Islam SALEM
- Zakaria SABA

Soutenu le : 30/06/2024

Devant le jury composé de :

M^r. Ammar TIBOUCHE

UNIVERSITE DE JIJEL

PRESIDENT

M^r. Lyes AOMAR

UNIVERSITE DE JIJEL

EXAMINATEUR

M^r. Naamane MOHDEB

UNIVERSITE DE JIJEL

RAPPORTEUR

Promotion :2023/2024

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre gratitude envers Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions notre Rapporteur M. **Naamane MOHDEB** nous guide et donne des suggestions précieuses.

Nos remerciements vont également à **M^r. Ammar TIBOUCHE** d'avoir fait l'honneur de Présider notre jury.

Nous remercions également à **M^r. Lyes AQMAR** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à notre travail de recherche. Leur soutien, leurs encouragements et leur collaboration ont été d'une importance capitale, et nous sommes reconnaissants pour leur contribution.

MERCI.....

Dédicace

MERCI À DIEU TOUT-PUISSANT QUI NOUS A DONNÉ LA
FORCE ET LA PATIENCE POUR ACCOMPLIR CE TRAVAIL.

JÉ DÉDIE CETTE RÉALISATION, DE MA MÈRE ET MON PÈRE
À MES FRÈRES ET SCEURS ET À TOUTE L'HONORABLE FAMILLE.

A TOUS MES AMIS ET PROCHES, À TOUTES LES PERSONNES
QUI ME CONNAISSENT DE PRÈS OU DE LOIN, JE DIS MERCI.....

Zakaria.S

DÉDICACE :

À MA PETITE MAMAN, MON CHER GRAND-PÈRE

**„ MALGRÉ QU'ILS AIENT QUITTÉ MA VIE, ILS ONT HABITÉ MON CŒUR”
À MON CHER PÈRE..., POUR TOUS TES SACRIFICES, TON AMOUR, TA
TENDRESSE, TON SOUTIEN ET TES PRIÈRES TOUT AU LONG DE MES
ÉTUDES, JE SUIS RECONNAISSANT DE TOUT MON CŒUR**

**MA CHÈRE SŒUR... POUR SES ENCOURAGEMENTS CONSTANTS ET SON
SOUTIEN MORAL,**

A MES CHERS FRÈRES, POUR LEUR APPUI ET LEUR ENCOURAGEMENT,

**A TOUTE MA FAMILLE, A TOUS MES AMIS(E) POUR LEUR SOUTIEN TOUT AU
LONG DE MON PARCOURS UNIVERSITAIRE,**

**QUE CE TRAVAIL SOIT L' ACCOMPLISSEMENT DE VOS VŒUX TANT
ALLÉGUÉS, ET LE FUT DE VOTRE SOUTIEN INFALLIBLE,**

MERCI D' ÊTRE TOUJOURS LÀ POUR MOI.

ISLAM.

Liste des figures

Chapitre I :

Figure.I.1 Principes permettant de convertir les différentes énergies considérées en énergie électrique. Source des dessins du moteur Stirling.....	4
Figure.I.2 (a) Récupération d'énergie vs Production d'énergie et (b) densité de puissance des sources ambiantes.....	5
Figure.I.3 Comparaison de la densité de puissance pouvant être récupérée Sur différentes sources d'énergie.....	6
Figure.I.4 Exemples de sources vibratoires exploitables pour la récupération d'énergie vibratoire. En notant $ a $ l'amplitude d'accélération et f la fréquence vibratoire, les traits pointillés représentent les isovaleurs de la quantité.....	7
Figure.I.5 (a) Exemples d'objets dans lesquels un système de récupération d'énergie peut être intégré et (b) quelques valeurs de puissances produites par le corps humain	8
Figure.I.6 Fréquence et amplitude de sources potentielles de vibration Pour des systèmes commerciaux.....	8
Figure.I.7 Les deux grands principes de récupération d'énergie vibratoire. Ici, l'exemple pris pour la source de vibrations est une machine tournante soumise à des sollicitations intérieures ou extérieures.....	9
Figure.I.8 Exemple de récupérateur d'énergie permettant la conversion d'une énergie mécanique en énergie électrique grâce à une conversion piézoélectrique.....	9
Figure.I.9 (a) Principe d'un dispositif MFC, des fibres de matériaux piézoélectriques PZT sont disposées entre des fibres d'époxy (en blanc). (b) Photo d'un dispositif en MFC.....	10
Figure.I.10. Récupération d'énergie dans les chaussures (a) conversion piézoélectrique [13], (b) conversion électromagnétique , (c) conversion électrostatique à base d'élastomères compressés et (d) conversion électrostatique à base de circulation de fluides.....	11
Figure.I.11 Exemple de récupérateur d'énergie permettant la conversion d'une énergie mécanique en énergie électrique grâce à une conversion électrostatique.....	12
Figure.I.12. Principe de fonctionnement d'un convertisseur électrostatique à électret.....	12
Figure.I.13. Exemple de structure de transducteur électrostatique.....	13

Figure.I.14. Exemple de structure de transducteur électromagnétique.....	14
Figure.I.15. Schéma mécanique du récupérateur d'énergie vibratoire à transduction électromagnétique.....	14
Figure.I.16 Loi de Faraday.....	15
Figure.I.17. Lampe torche utilisant la conversion électromagnétique.....	15
Figure.I.18. Récupération de l'énergie de la marche humaine à partir du sac à dos.....	16
Figure.I.19. Schéma du transducteur électromagnétique.....	16
Figure.I.20 Générateur électromagnétique pour récupérer l'énergie.....	17
Figure.I.21 Générateur électromagnétique développés par von Büren et Tröster	17
Figure.I.22 Générateur électromagnétique développé par Apo et Priya.....	18
Figure.I.23 Schéma d'un récupérateur d'énergie vibratoire.....	20
Figure.I.24 Circuit de récupération d'énergie vibratoire.....	20
Figure.I.25 Circuit d'extraction classique pour un EMG.....	21
Figure.I.26 Circuit d'extraction classique simplifié pour un EMG.....	21

Chapitre II :

Figure.II.1 Schéma du modèle décrivant un résonateur mécanique.....	25
Figure.II.2 Spectre de puissance mécanique moyenne normalisée fournie par la source vibratoire en fonction de la pulsation vibratoire (exprimée en pourcentage de la pulsation propre) pour différents facteurs de qualité mécaniques.....	26
Figure.II.3 Modèle générique d'un convertisseur mécano-électrique.....	27
Figure.II.4 Diagramme des forces appliquées sur la masse.....	28
Figure.II.5 Champ magnétique élémentaire dB induit par un élément de courant $I dl$	31
Figure.II.6 Deux aimants à aimantation parallèle.....	33
Figure.II.7 position angulaire des vecteurs K_{\perp} et ρ	34
Figure.II.8 Le modèle aimants-spire circulaire avec la position relative et les paramètres géométriques.....	34

Chapitre III :

Figure.III.1 Structure du générateur inertielle non-linéaire.....	38
Figure.III.1 Répulsion magnétique : exemple de calcul de la force entre aimants cylindriques et un aimant répulsif en fonction du gap d'air les séparant.....	40
Figure.III.2 Valeur absolue du flux magnétique en fonction du déplacement.....	40
Figure.III.3 Valeur absolue du gradient de flux magnétique.....	41
Figure.III.4 Positions de l'aimant mobile au cours du temps.....	42
Figure.III.5 Positions relative (z-y) au cours du temps.....	43
Figure.III.6 L'évolution de la force magnétique en fonction du temps.....	43
Figure.III.7 Détail du courant électrique traversant la charge.....	44
Figure.III.8 Détails temporels du courant reçu par la charge.....	44
Figure.III.9 Détails temporels de la puissance.....	44
Figure.III.10 la variation de la puissance en fonction de la fréquence pour Différentes valeurs du nombre de spires.....	45
Figure.III.11 la variation de la puissance en fonction de la fréquence pour Différentes valeurs du nombre de spires.....	45

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients des méthodes de récupération d'énergie.....	18
Tableau III.1 Données géométriques et électromagnétiques de récupérateur.....	39

Sommaire

I.	Introduction générale.....	1
	Références bibliographiques.....	3

Chapitre I :Récupération d'énergie vibratoire

I.	Introduction	4
II.	Sources D'énergie.....	5
III.	Récupération d'énergie.....	6
IV.	Récupération de l'énergie biomécanique.....	7
V.	Récupération de l'énergie cinétique.....	8
	V.1 Piézoélectrique.....	9
	V.2 Electrostatique.....	11
	V.3 Électromagnétique.....	13
VI.	Les avantages et inconvénients des méthodes de traduction.....	18
VII.	Système résonance.....	19
VIII.	Fonctionnement d'un récupérateur d'energie vibratoire.....	19
IX.	Circuit de récupération d'énergie	20
X.	Conclusion	21
	Références bibliographique.....	22

Chapitre II :Modélisation d'un système de récupération d'énergie

I.	Introduction.....	25
II.	Fonctionnement d'un résonateurs.....	25
	II.1 Résonateur mécanique.....	25
	II.2 Modèle générique pour la conversion mécano-électrique.....	26
III.	Diagramme des forces.....	28

IV.	Coefficient d'amortissement électromagnétique.....	29
	IV.1 Coefficient de transduction.....	30
	IV.2 Comportement dynamique.....	30
V.	Energie d'interaction entre deux aimants.....	30
VI.	Flux magnétique a travers une spire circulaire.....	34
VII.	Conclusion.....	35
	Références bibliographique.....	36

Chapitre III : Application et résultats

I.	Introduction.....	38
II.	Application et résultats.....	38
	II.1 Caractéristiques géométriques et physiques.....	38
	II.2 Evaluation de la force magnétique et le flux magnétique.....	39
	II.3 Etude du comportement dynamique d'un récupérateur.....	41
	II.4 Fréquence de résonance et charge optimale	45
III.	Conclusion.....	46
	Références bibliographique.....	47
Conclusion générale.....		48

INTRODUCTION GENERAL

Introduction générale

La récupération d'énergie consiste à transformer l'énergie ambiante présente dans l'environnement en électricité dans le but de lui fournir l'énergie nécessaire à son fonctionnement. Les formes d'énergie les plus couramment utilisées sont la lumière, les vibrations (et le mouvement de manière générale) et les différences de température. Ces sources se caractérisent bien souvent par une densité d'énergie assez faible et une disponibilité intermittente au cours du temps (selon la durée du jour, du fonctionnement d'un moteur, etc.). Un grand nombre de sources d'énergies pouvant être exploitées par l'homme existe dans la nature. Chacune d'entre elles présente des spécificités les rendant adaptées pour une exploitation bien précise. Parmi ces dernières, on trouve l'énergie vibratoire ambiante, produite par tout corps produisant des vibrations.

L'enjeu principal de la récupération d'énergie vibratoire est de générer suffisamment d'énergie électrique à partir d'une source vibratoire donnée. Pour cela, les récupérateurs intègrent généralement un résonateur mécanique, un composant capable d'amplifier la vibration lorsque la fréquence de cette dernière coïncide avec la fréquence propre du résonateur.

Parmi toutes les sources d'énergie récupérables, les vibrations mécaniques sont des plus étudiées et utilisées à l'heure actuelle. Comme nous l'avons vu dans le même axe de recherche, la récupération d'énergie vibratoire se fait en deux étapes:

- Transformer la vibration en un déplacement relatif
- Transformer ce déplacement relatif en une énergie électrique via un convertisseur mécano-électrique (piézoélectrique, électromagnétique, électrostatique ou autre).

Trois principales technologies de transducteurs sont utilisées pour récupérer cette forme d'énergie : des dispositifs piézoélectriques, électrostatiques ou électromagnétiques. Cette section fait le point sur les stratégies et prototypes différents développés par la communauté scientifique liée à la récupération d'énergie vibratoire. La troisième technique de récupération de l'énergie cinétique repose sur l'utilisation de l'induction électromagnétique, et se base sur le mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine. La quantité d'énergie récupérée dépend de la force du champ magnétique, de la vitesse de déplacement et de la bobine choisie.

Un des premiers modèles pour la conversion mécano-électrique a été proposé par Williams et Yates [1]. Il consiste en un système résonnant à base d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur. Ce modèle permet notamment de déterminer la puissance maximale

théorique récupérable d'un système de récupération d'énergie vibratoire à partir des paramètres du système et des caractéristiques des vibrations ambiantes.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de proposer un modèle mathématique pour la modélisation du dispositif de conversion dédié à la récupération de l'énergie mécanique, dont la conversion en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. Nous proposerons des formulations aboutissant à la modélisation.

Ce projet de fin d'étude s'articule autour de trois chapitres, qui peuvent être présentés de la façon suivante :

Le premier chapitre positionne le contexte de notre étude, en dressant un état de l'art des différents moyens d'alimentation en insistant sur les systèmes de récupération d'énergie. Nous passons en revue les différentes formes d'énergie utilisables et nous présentons une partie de la diversité des moyens de récupération d'énergie.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons un modèle mathématique pour la modélisation du dispositif de conversion dédié à la récupération de l'énergie mécanique, dont la conversion en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. Nous proposerons des formulations aboutissant à la modélisation. Dans cette section, nous présentons le calcul de la force électromotrice induite dans une bobine par un aimant permanent. On se place dans le cas d'un circuit conducteur immobile, de géométrie quelconque, soumis à un champ magnétique variable dans le temps.

Le dernier chapitre, un récupérateur de l'énergie cinétique innovant repose sur l'utilisation de l'induction électromagnétique est proposé dans le cadre du présent travail. L'objectif principal de modéliser le système de récupération d'énergie vibratoire en se focalisant sur les récupérateurs constitués d'un transducteur électromagnétique. Nous présentons l'application d'un modèle semi-analytique que nous avons mis en place pour l'étude de récupérateur d'énergie. Nous considérons pour cette étude un récupérateur qui alimente une charge résistive.

Références bibliographiques :

[1] P. Glynn-Jones, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.M. White, « An electromagnetic, vibration powered generator for intelligent sensor systems », Sensors and Actuators A 110, pp. 344-349, February 2004.

Chapitre I :

Récupération d'énergie vibratoire

Chapitre I : Récupération d'énergie vibratoire

I. INTRODUCTION

La récupération d'énergie consiste à transformer l'énergie ambiante présente dans l'environnement du capteur en électricité dans le but de lui fournir l'énergie nécessaire à son fonctionnement (Fig.I.1). Les formes d'énergie les plus couramment utilisées sont la lumière, les vibrations (et le mouvement de manière générale) et les différences de température [1].

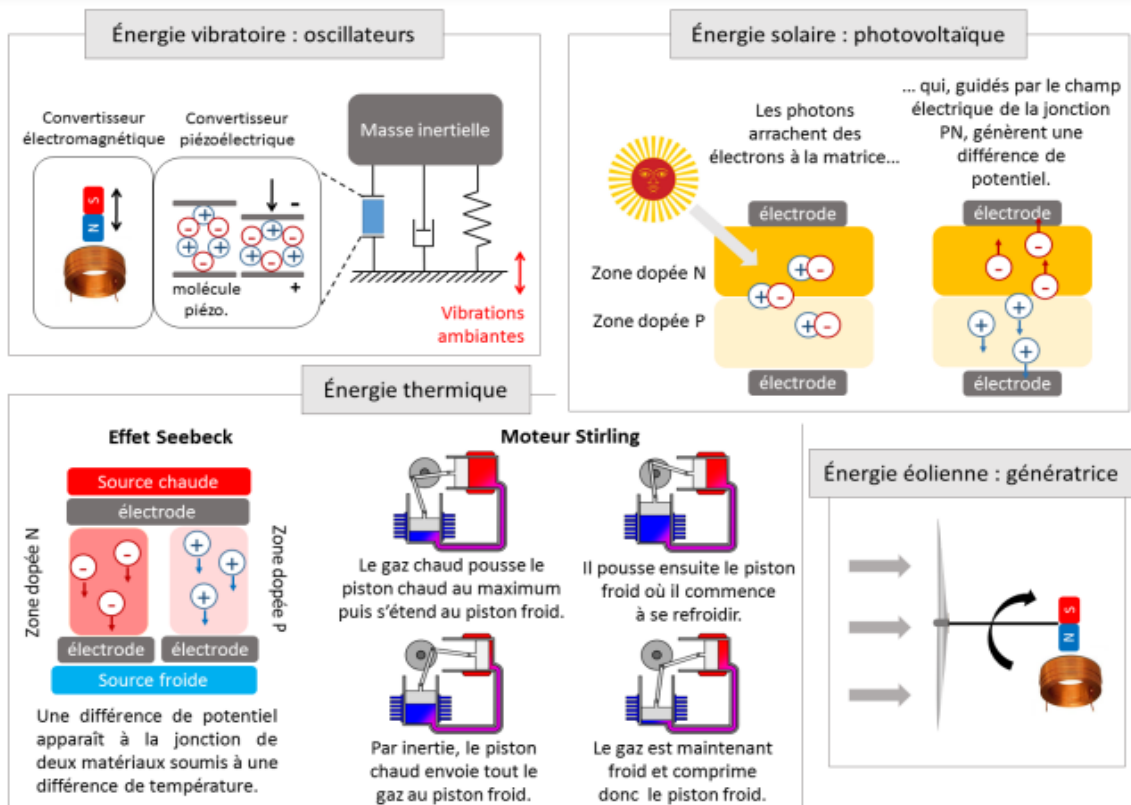


Fig.I.1 Principes permettant de convertir les différentes énergies considérées en énergie électrique. Source des dessins du moteur Stirling [2]

La récupération d'énergie inductive est une technologie révolutionnaire qui permet de convertir l'énergie magnétique en électricité. Ce processus est crucial dans diverses applications, notamment dans les domaines de l'électronique portable, de l'automobile et des dispositifs médicaux implantables. Les dispositifs de récupération d'énergie inductive offrent

une solution durable et efficace pour alimenter des appareils électroniques sans nécessiter de sources d'énergie externes constantes [3].

Le cabinet Gartner a classé la récupération d'énergie comme une technologie très prometteuse en cours de développement [4]. Nous allons maintenant nous intéresser au potentielle de cette technologie dans le cadre d'une application pour l'alimentation de capteurs sans fil dans l'aéronautique.

II. SOURCES D'ENERGIE

Les sources d'énergie (Fig.I.2) potentielles sont nombreuses et plus ou moins énergétiques. Quatre sources d'énergie ambiante peuvent être exploitées :

- L'énergie mécanique (contraintes, vibrations, chocs, déformations),
- L'énergie thermique (gradients thermiques ou variations temporelles de température),
- L'énergie radiante (radioactive, solaire, infra-rouge, radiofréquence) et
- L'énergie biochimique (bio-pile avec combustible renouvelé naturellement).

La Fig.I.2 présente des ordres de grandeurs des puissances volumiques disponibles dans l'environnement par type de source d'énergie. Ainsi, 100µW à 1mW par cm³ de récupérateur d'énergie est un bon ordre de grandeur ; et, bien que cette puissance soit relativement faible, elle se révèle être suffisante pour de nombreuses applications.

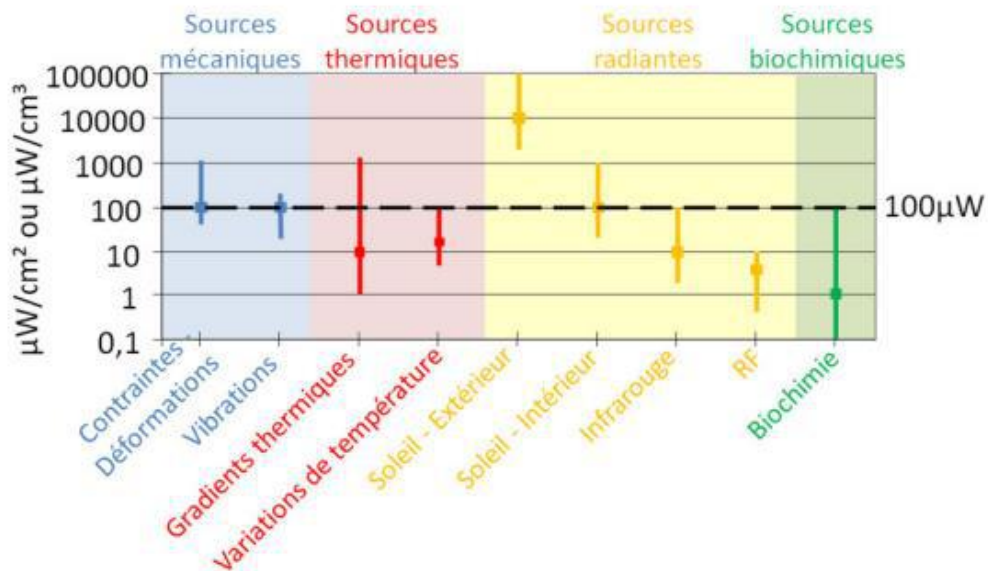


Fig.I.2 Récupération d'énergie vs Production d'énergie et densité de puissance des sources ambiantes [6]

Ces quatre sources ont toutes reçu beaucoup d'attention ces dernières années pour les dispositifs de taille réduite (de quelques millimètres à quelques centimètres).

III. RECUPERATION D'ENERGIE

Dans cette partie, nous passons en revue les différentes formes d'énergie utilisables et nous présentons une partie de la diversité des moyens de récupération d'énergie. Réussir à récupérer l'énergie présente dans l'environnement du système répond à ces défis : cela pourra procurer une autonomie totale si la quantité d'énergie captée est suffisante pour assurer l'intégralité de la consommation, ou pourra au moins prolonger la durée de vie de la pile [7].

Nous présentons Fig.I.3 les valeurs de densités d'énergie des sources couramment présentes dans l'environnement.

	Densité de puissance ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) sur un an	Densité de puissance ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) sur dix ans
Solaire (extérieur)	10000 – Plein soleil	
Solaire (intérieur)	10	
Vibrations/Mouvement (humain)	4	
Vibrations/Mouvement (industrie)	100	
Bruit acoustique	0,003 à 75dB, 0,96 à 100dB	
Gradient de température	15 – gradient de 10°C	
RF (GSM)	0.1	

Pile (lithium, non rechargeable)	45	3,5
Accumulateur (lithium, rechargeable)	7	0
Hydrocarbure	333	
Pile à combustible (méthanol)	280	

Fig.I.3 Comparaison de la densité de puissance pouvant être récupérée sur différentes sources d'énergie [7]

Le Fig.I.4 présente l'ordre de grandeur des amplitudes et des fréquences d'accélération disponibles sur différentes sources de vibrations courantes [8].

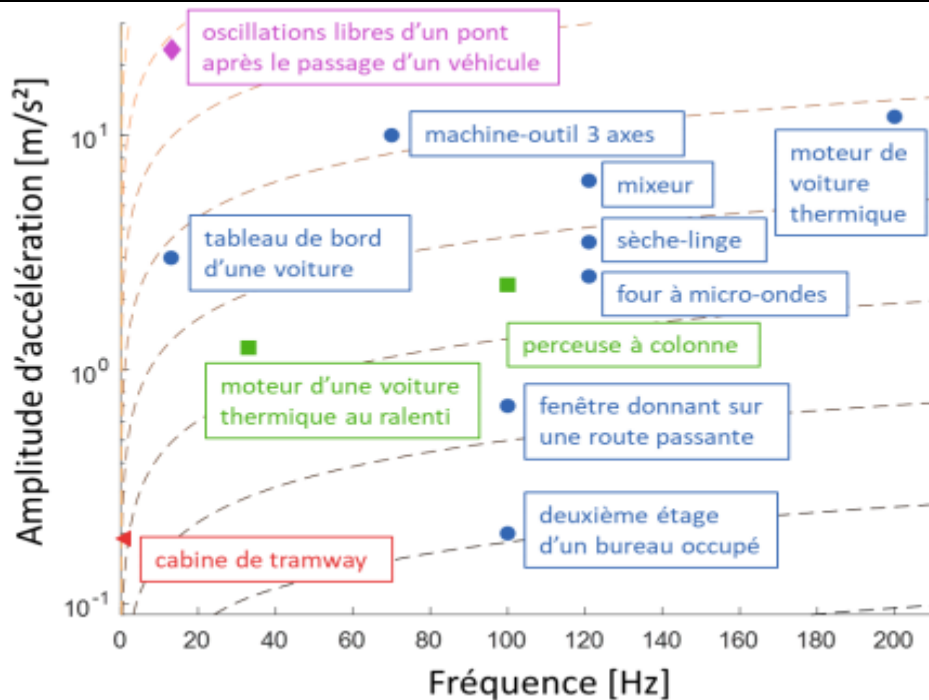


Fig.I.4 Exemples de sources vibratoires exploitables pour la récupération d'énergie vibratoire. En notant $|a|$ l'amplitude d'accélération et f la fréquence vibratoire, les traits pointillés représentent les iso-valeurs de la quantité $|a|^2/f$ [8]

IV. RECUPERATION DE L'ENERGIE BIOMECHANIQUE

Les puissances dissipées par le corps humain sont liées aux puissances consommées par le corps pour réaliser une action mécanique donnée que multiplie le rendement de la conversion. Un homme consomme de l'ordre de 11 MJ d'énergie par jour, soit 127 W en moyenne – 100 W lorsqu'il dort et 1630 W lorsqu'il court [9]. Une partie de cette énergie sera utilisée sous forme mécanique : pour se déplacer, respirer, faire circuler le sang... et pourra être récupérée grâce à un récupérateur d'énergie mécanique placé par exemple dans une chaussure, une genouillère voire à l'intérieur du corps humain (Fig.I.5. a).

Starner et al. [4] ont estimé les puissances mécaniques récupérables sur un être humain et ont montré qu'il était théoriquement possible d'atteindre une dizaine de watts (Fig.I.5. b), néanmoins les bons ordres de grandeurs sont plutôt dans la gamme 1m W-1 W [10].

A titre d'exemple, la puissance calorifique consommée est d'environ 160 W lorsque l'on conduit une voiture, et de 580 W lorsque l'on nage. Pour la production de travail mécanique, le rendement énergétique humain n'est pas unitaire, c'est-à-dire qu'il s'accompagne de pertes se traduisant par un dégagement de chaleur. Le rendement de conversion correspondant, évalué à 25 %, nous permet donc d'estimer la puissance récupérable. En reprenant les exemples précédents, pendant la conduite d'une voiture elle est de 40 W, et de 150 W pour la nage [11].

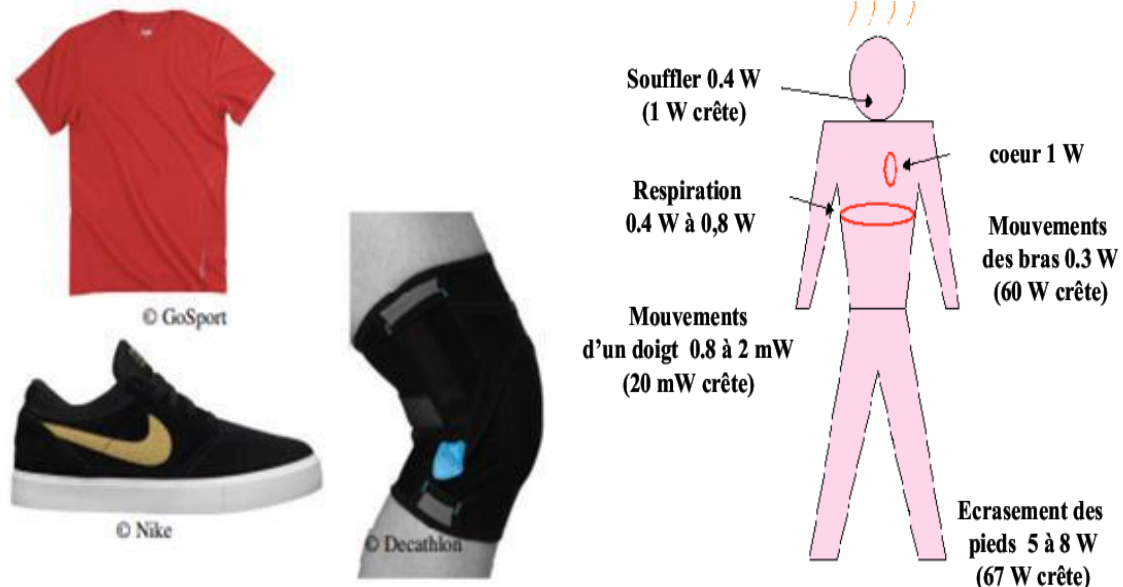


Fig.I.5 (a) Exemples d'objets dans lesquels un système de récupération d'énergie peut être intégré et (b) quelques valeurs de puissances produites par le corps humain [11]

Il existe de nombreuses sources de vibration dans notre environnement, la Fig.I.6 ci-dessous présente quelques exemples de sources exploitables, avec leur fréquence de vibration et leur amplitude d'accélération.

Source de vibration	Accélération ($m.s^{-2}$)	Fréquence de vibration principale
Carrosserie d'une voiture	12	200
Support d'une machine à tour	10	70
Armature d'un mixeur	6.4	121
Sèche linge	3.5	121
Clavier d'un ordinateur	3	1
Porte juste après fermeture	3	125
Four micro onde	2.5	121
Climatiseur	0.2-1.5	60
Lecteur CD d'un Net-book	0.6	75

Fig.I.6 Fréquence et amplitude de sources potentielles de vibration pour des systèmes commerciaux [12]-[13].

V. RECUPERATION DE L'ENERGIE CINETIQUE

La récupération de l'énergie cinétique consiste à générer un courant électrique à partir d'une action mécanique : un mouvement, une vibration ou une déformation. Cette source d'énergie est présente dans beaucoup d'applications, des environnements industriels aux transports en passant par le corps humain [12].

Trois principales technologies de transducteurs sont utilisées pour récupérer cette forme d'énergie : des dispositifs piézoélectriques, électrostatiques ou électromagnétiques. Cette section fait le point sur les stratégies et prototypes différents développés par la communauté scientifique liée à la récupération d'énergie vibratoire.

Les générateurs pour la récupération d'énergie vibratoire peuvent être séparés en deux grandes catégories distinctes illustrées en Fig.I.7.

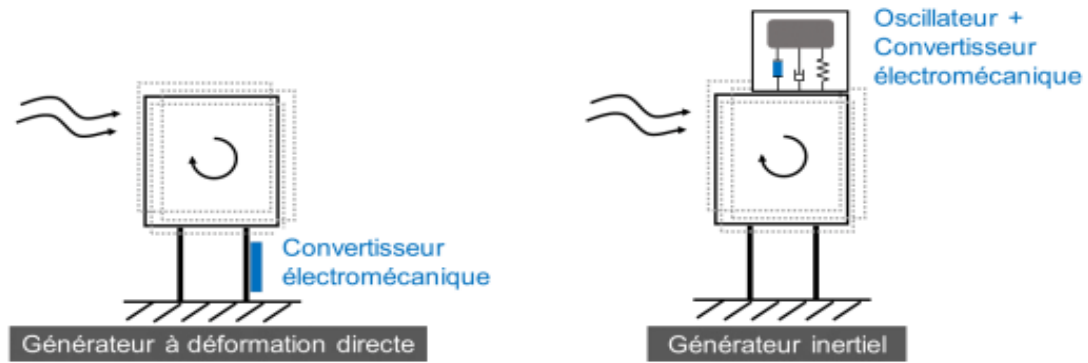


Fig.I.7 Les deux grands principes de récupération d'énergie vibratoire. Ici, l'exemple pris pour la source de vibrations est une machine tournante soumise à des sollicitations intérieures ou extérieures.

La première catégorie est constituée par les générateurs à déformation directe. Ces derniers, uniquement composés d'un convertisseur électromécanique (généralement piézoélectrique), sont directement placés sur le chemin de contrainte mécanique engendrée par les vibrations [14].

L'ajout d'une masse inertielle, dans le générateur inertiel, est la solution classique : le déplacement de cette masse par rapport à la coque joue ainsi le rôle de deuxième référence. Le système oscillant ainsi formé implique, une fois excité, un mouvement relatif de la masse par rapport à la source à l'intérieur même de la coque.

V.I. Piézoélectriques

L'effet piézoélectrique direct a été découvert par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880 grâce à leurs travaux sur les cristaux de quartz [16]. Un exemple classique de transducteur fonctionnant grâce à cet effet est présenté schématiquement sur la Fig.I.8.

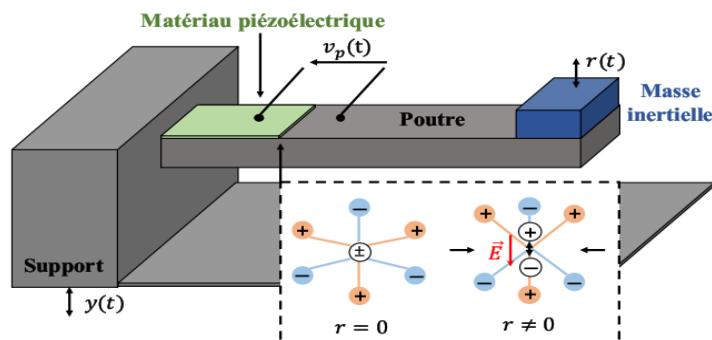


Fig.I.8 Exemple de récupérateur d'énergie permettant la conversion d'une énergie mécanique en énergie électrique grâce à une conversion piézoélectrique [15]

La vibration de la poutre entraîne la déformation du matériau piézoélectrique. La structure interne du matériau est déformée, provoquant la séparation des barycentres des charges positives et négatives de chaque maille du réseau cristallin. En conséquence, un

champ électrique se forme dans le matériau et des charges apparaissent à la surface de ce dernier [6].

Les structures piézoélectriques conçues pour la détection peuvent être adaptées à la récupération de l'énergie mécanique (Fig.I.8). L'ajout d'une masse est nécessaire pour faire coïncider la fréquence de résonance de la structure piézoélectrique avec la fréquence de sollicitation, ce qui maximise la puissance convertie. Leur performance dépend en grande partie des matériaux utilisés. Dans la plupart ce sont des céramiques capables de garder une polarisation électrique longtemps [16].

Différentes formes de récupérateurs piézoélectriques ont été étudiées pour élargir et abaisser la bande de fréquence d'utilisation [17]-[18]. Afin de contourner les montages reposant sur l'oscillation d'un montage mécanique, les Macro Fiber Composite (MFC) sont le résultat de l'intégration de fibres piézoélectriques dans une matrice en polymère (Fig.I.9). L'idée est de générer un courant lors de la déformation de la surface sur laquelle est fixé le récupérateur MFC. Cette technologie est intéressante pour récupérer des vibrations de grande amplitude et de basse fréquence. Pozzi et al rapportent avoir conçu un système pour l'aéronautique et avoir récupéré 12mW avec une excitation de 10Hz et une surface de 33cm² (330 μ W/cm²) [17].

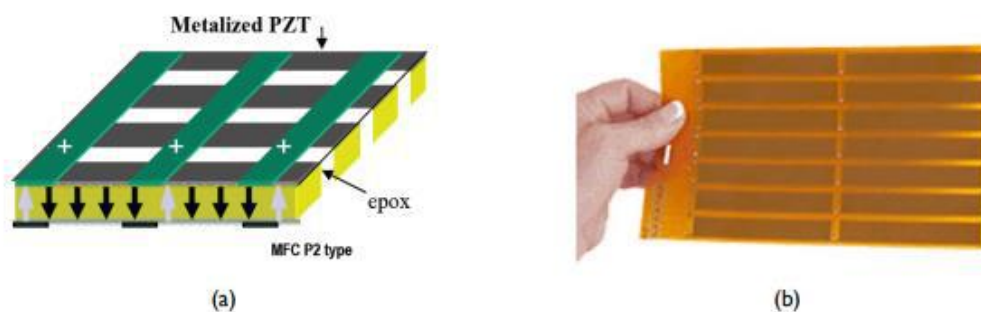


Fig.I.9 (a) Principe d'un dispositif MFC, des fibres de matériaux piézoélectriques PZT sont disposées entre des fibres d'époxy (en blanc). (b) Photo d'un dispositif en MFC.

Ainsi, dès 2001, le MIT s'est intéressé à cette récupération d'énergie à l'aide de systèmes piézoélectriques (Fig.I.10.a) et électromagnétiques (Fig.I.10.b). Les puissances générées atteignent 8.4 mW [13] pour la structure piézoélectrique et 60 mW pour la structure électromagnétique [14]. Des essais ont également été menés sur des systèmes électrostatiques à base d'élastomères comprimés sous l'effet du poids lors de la marche (Fig.I.10.c) avec des puissances de 0.7 W [15] ou exploitant les variations de permittivités induites par un fluide circulant dans une structure capacitive et mis en mouvement par appuis alternatifs sur des chambres placées à l'avant et à l'arrière de la chaussure (Fig.I.10.c). La société Instep Nanopower [16] qui a conçu ce récupérateur d'énergie annonce une puissance de sortie de 20 Watts.

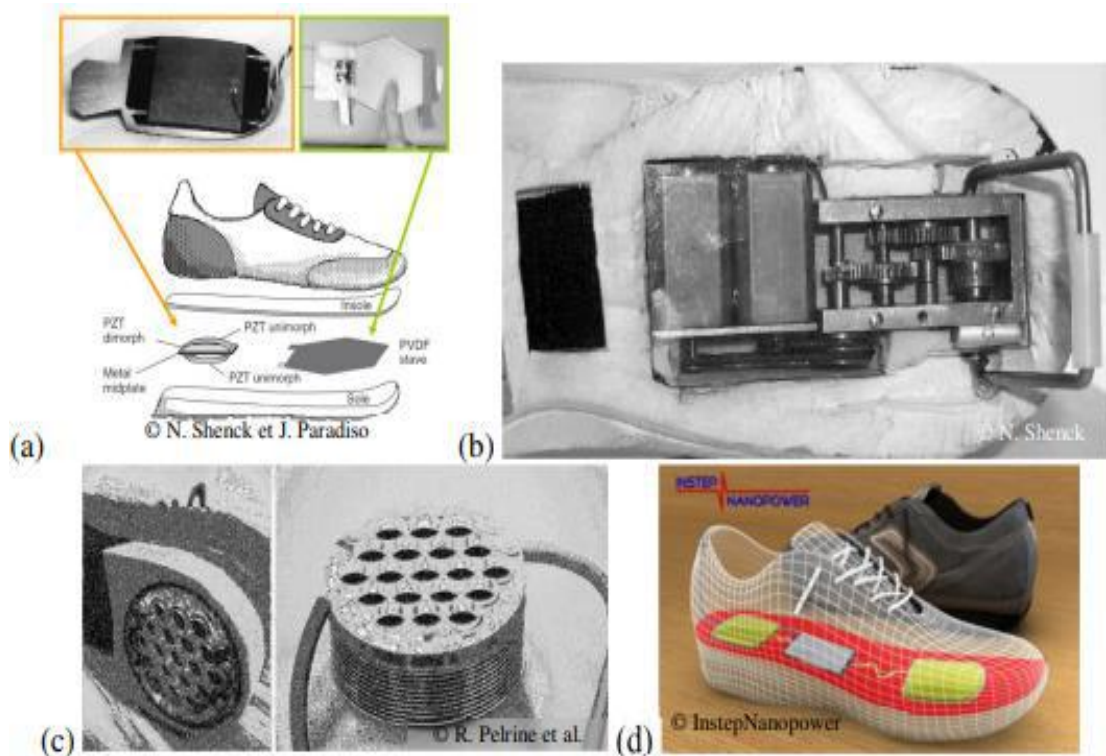


Fig.I.10. Récupération d'énergie dans les chaussures (a) conversion piézoélectrique [13], (b) conversion électromagnétique [14], (c) conversion électrostatique à base d'élastomères compressés [15] et (d) conversion électrostatique à base de circulation de fluides [17]

Le principe consiste dans l'apparition d'une différence de potentiel entre deux faces d'un matériau piézoélectrique qui est soumis à une déformation. L'application classique des matériaux piézoélectriques est la détection sonore ou de mouvement. Ce sont les matériaux de choix pour la construction des microphones. La tension générée lors de la déformation s'exprime comme :

$$V = g \frac{F}{S} \quad (\text{I.1})$$

avec g est la constante piézoélectrique de tension selon le mode de sollicitation, e , S est l'épaisseur et surface de l'échantillon sollicité, F la force appliquée. L'effet piézoélectrique est utilisé aussi en sens inverse, pour l'actionnement : en appliquant un champ électrique à un matériau, une déformation est induite. On peut ainsi générer une force mécanique ou une onde sonore si le matériau est mis en vibration.

. V.2. Electrostatique

Les convertisseurs électrostatiques sont des systèmes à capacité variable composés de deux surfaces séparées par du vide, de l'air ou n'importe quel matériau diélectrique [18]. Si une des deux surfaces est polarisée électriquement, un mouvement entre ces deux surfaces provoque une variation de la capacité et donc une variation des charges électriques par un courant (Fig.I.11).

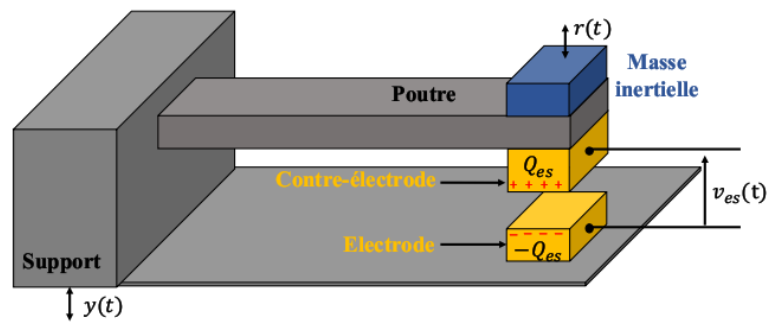


Fig.I.11 Exemple de récupérateur d'énergie permettant la conversion d'une énergie mécanique en énergie électrique grâce à une conversion électrostatique [19]

La déformation de la poutre permet de rapprocher ou éloigner la contre-électrode de l'électrode et génère ainsi une variation de la capacité C_{es} formée entre les deux électrodes. Cette variation de la capacité entraîne à son tour une variation de la charge électrique Q_{es} stockée dans les électrodes et/ou de la tension aux bornes des électrodes v_{es} [20]-[21]

On notera que, pour assurer le bon fonctionnement d'un générateur électrostatique et faire en sorte que l'énergie récupérée ne soit pas nulle, il est nécessaire qu'il y ait une tension initiale aux bornes des électrodes au moment où la capacité du générateur commence à changer.

Ces systèmes peuvent être séparés en deux catégories [13]-[18] :

- Ceux basés sur l'utilisation d'un électret (Un électret est en quelque sorte l'équivalent électrostatique d'un aimant : c'est un diélectrique dans un état de polarisation électrique quasi-permanent. Grâce à cette polarisation, la moindre déformation induira un changement de la tension v_{ec}) (Fig.I.12).
- Ceux sans électret reposant sur l'utilisation d'un circuit actif qui vient polariser une des surfaces du dispositif, en effectuant des cycles soit à charge constante, soit à tension constante.

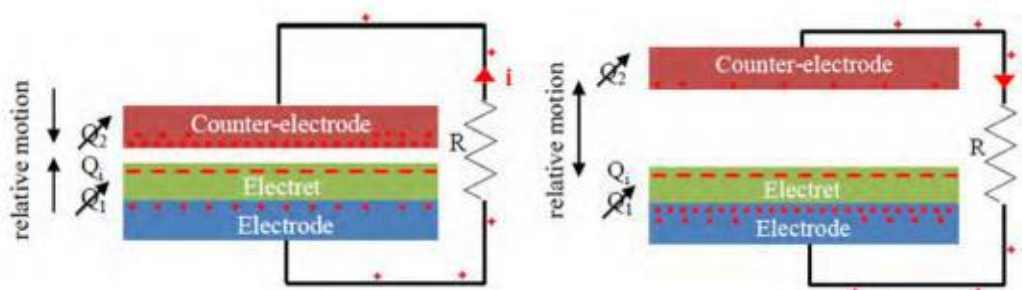


Fig.I.12. Principe de fonctionnement d'un convertisseur électrostatique à électret [22]

Récupérateurs électrostatiques à capacité variable sont facilement réalisables en MEMS car leur densité d'énergie augmente en diminuant l'espace entre les deux armatures du

condensateur, facilitant leur miniaturisation. Ils présentent une importante tension de sortie (>100 V) mais également une importante résistance interne, limitant la puissance produite [22].

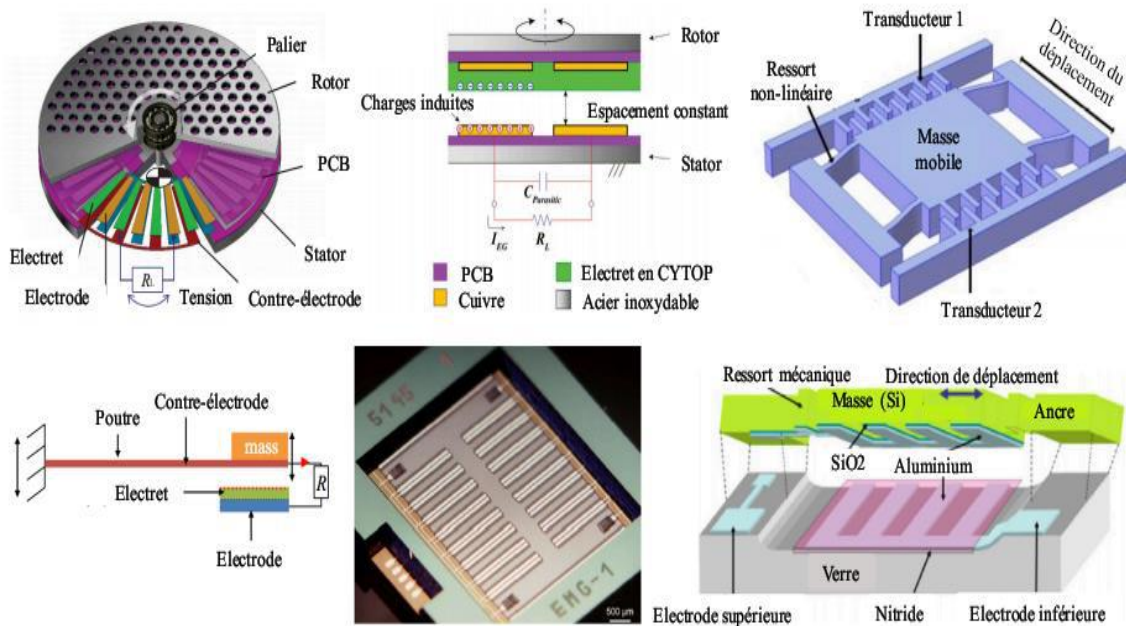


Fig.I.13. Exemple de structure de transducteur électrostatique [20]

La structure électrostatique est un condensateur composé de deux armatures séparées par de l'air, du vide ou un diélectrique. La majeure partie de ces dispositifs électrostatiques est rigide, ont une structure semblable à celle d'un accéléromètre et leur réalisation est tout à fait compatible avec les techniques de micro-fabrication collective issues de la microélectronique [22] (Fig.I.13). Les convertisseurs électrostatiques nécessitent une source extérieure pour polariser la structure en début de cycle. Cette source est souvent d'une valeur très importante (> 100 V), ce qui est sans nul conteste un inconvénient majeur.

V.3. Electromagnétique

La troisième technique de récupération de l'énergie cinétique repose sur l'utilisation de l'induction électromagnétique, et se base sur le mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine. La quantité d'énergie récupérée dépend de la force du champ magnétique, de la vitesse de déplacement et de la bobine choisie [15]. Williams et Yates [16] et Shearwood et Yates [17] en 1996 et 1997 ont montré la faisabilité de la récupération d'énergie à partir de vibrations ambiantes, et ont développé parmi les premiers un générateur électromagnétique composé d'une membrane flexible surmontée d'un aimant, et d'une bobine planaire, le tout générant 3 pW.

Bursa a développé un récupérateur d'énergie vibratoire à transducteur électromagnétique macroscopique ayant la capacité d'atteindre une puissance de 32 mW pour

une fréquence de 44 Hz [22]. Dans cette démarche, Bendam a développé un autre transducteur électromagnétique où une bobine est placée entre deux aimants. Cette technique lui a permis d'atteindre 5 mW de puissance pour une fréquence d'excitation de 5 Hz [23].

Un transducteur de type électromagnétique (Fig.I.14) simple se compose d'un ou plusieurs aimants créant un champ magnétique constant, et d'une bobine plongée dans ce champ. Le déplacement de l'aimant induit une variation du flux magnétique traversant les spires de la bobine, ce qui génère un courant électrique.

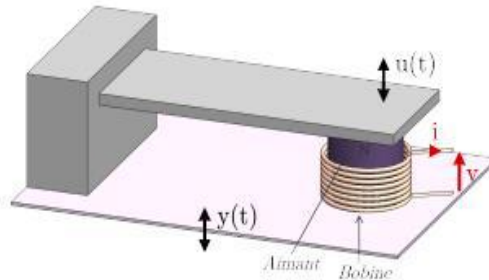


Fig.I.14. Exemple de structure de transducteur électromagnétique [24]

Un système mécanique (classiquement résonant) tel qu'une poutre encastree (Fig.I.15) ou un ressort permet de générer un déplacement relatif $u(t)$ entre l'aimant et la bobine lorsque le système est excité par une vibration $y(t)$.

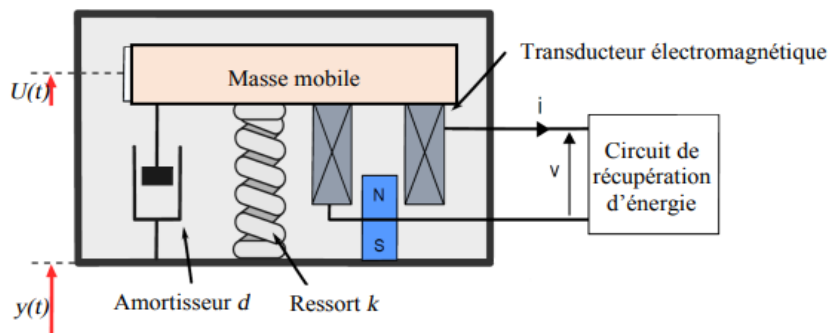


Fig.I.15. Schéma mécanique du récupérateur d'énergie vibratoire à transduction électromagnétique [14]

Ce déplacement entraîne une variation de flux magnétique au cours du temps générant ainsi une force électromotrice. D'après la loi de Faraday, la tension générée est donnée par l'expression suivante :

$$U = -N \frac{d\varphi}{dt} \tag{I.2}$$

Avec φ le flux magnétique et N le nombre de tours de la bobine Plusieurs transducteurs électromagnétiques ont été développés ces dernières années [12]-[13]-[14]. Le changement au cours du temps du flux magnétique à travers la surface entourée par la bobine crée une tension

V proportionnelle à la vitesse de changement du flux magnétique φ et au nombre de tours N de la bobine, selon la loi de Faraday.

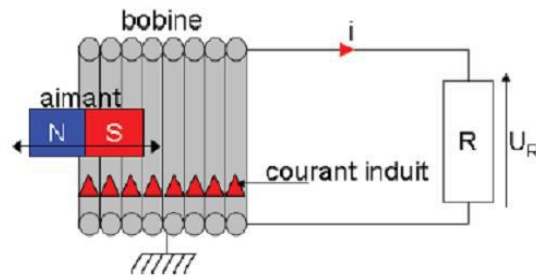


Fig.I.16 Loi de Faraday [15]

La société Applied Innovative Technology (Etats Unis) commercialise des lampes (Fig.I.17) conçues pour la plongée sous-marine qui fonctionnent sur le principe suivant : en secouant la lampe, un aimant se déplace à l'intérieur d'une bobine et crée un courant qui est stocké dans une capacité.

L'inventeur S. Veterino a choisi de réaliser l'éclairage par une LED, car elle permet de supporter des températures extrêmes, et sa durée de vie est de l'ordre de 100 000 heures. 30 secondes de secousses (avec environ 3 secousses par seconde) créent 5 minutes de lumière intense puis 2 minutes de lumière plus faible. Cette lampe pratiquement incassable pèse environ 390 g [16].

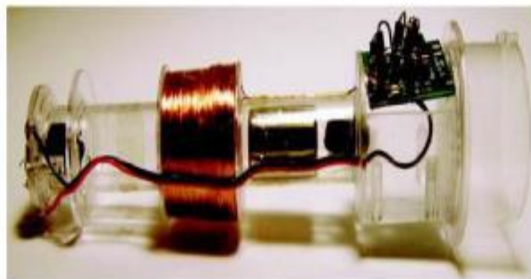


Fig.I.17. Lampe torche utilisant la conversion électromagnétique [16]

A noter également d'autres systèmes de récupération d'énergie qui sont plutôt au niveau de la recherche : par exemple, le sac à dos récupérateur d'énergie (Fig.I.18) utilisant une conversion électromagnétique et capable de récupérer jusqu'à 7 W lors de la marche [17].

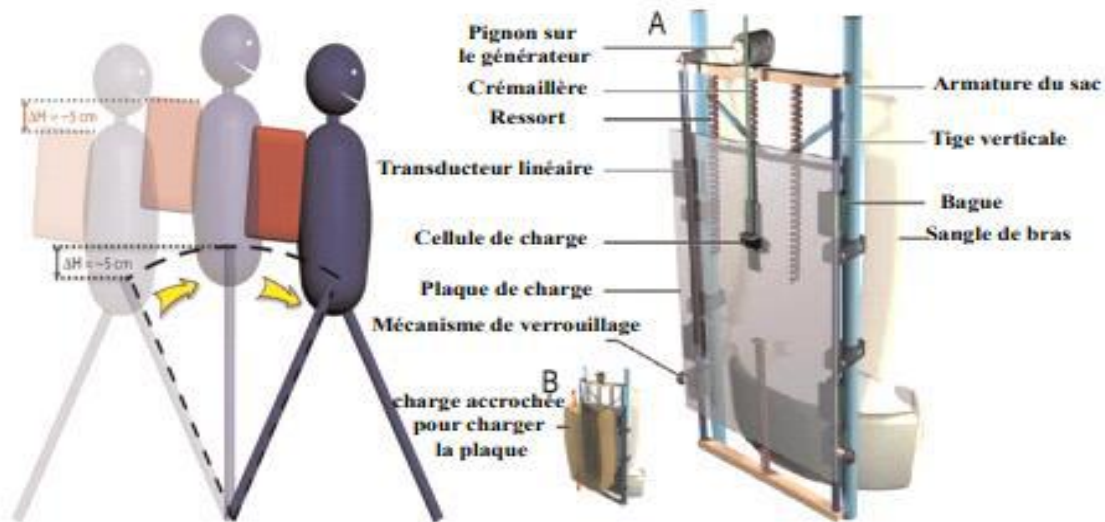


Fig.I.18. Récupération de l'énergie de la marche humaine à partir du sac à dos

En 2015 Qian Zhang et al ont développé un transducteur électromagnétique permettant de produire de l'énergie électrique à partir du mouvement du corps humain [15]. Il est composé d'une bobine flexible et d'un réseau d'aimants suspendu par un ressort magnétique. En plaçant le système dans un sac à dos, la tension générée augmente en fonction de la vitesse de marche. Une tension de 14.8 mV a été obtenue pour une vitesse de 2.68 m/s (Fig.I.19).

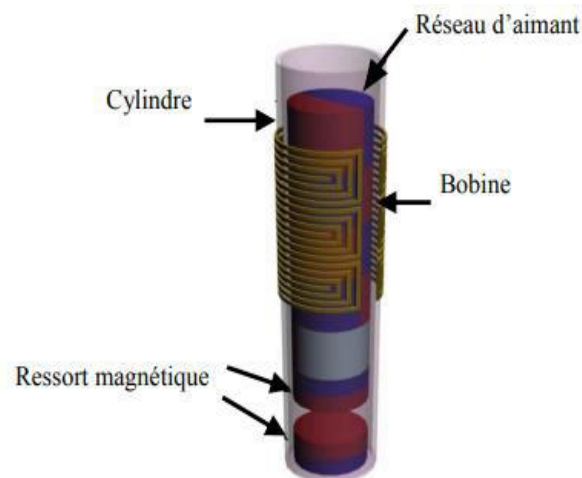


Fig.I.19. Schéma du transducteur électromagnétique [15]

Avec des dimensions macroscopiques, les générateurs électromagnétiques fonctionnent bien. Nous allons le montrer par quelques exemples. Nous pouvons observer sur la Fig.I.20 la taille du générateur, légèrement plus gros qu'une pile AA. Ce générateur a délivré de 0.3 à 2.46 mW placé sur un sac à dos d'une personne marchant ou courant lentement. Ce résultat est remarquable, d'autant plus qu'il est précisé que la structure n'a pas été optimisée.

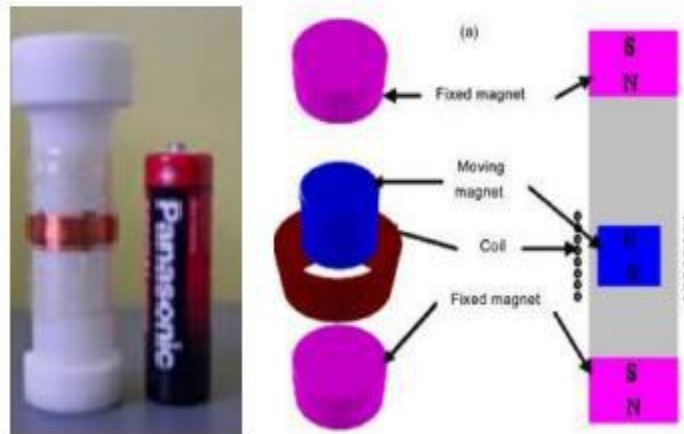


Fig.I.20 Générateur électromagnétique pour récupérer l'énergie [11]

De même von Büren et Tröster [19] ont proposé un récupérateur constitué d'un tube contenant plusieurs aimants permanents. Entre deux aimants consécutifs, ils ont mis une couche de polymère isolante. Les aimants consécutifs sont montés à polarité inversée. Les aimants ainsi que les couches de polymère sont collées. Une bobine est enroulée autour du tube pour récupérer les variations de ce champ magnétique. Cette structure (Fig.I.21) a un volume de 0.5 cm³ récupérant 35 μ W sur une résistance adaptée lorsqu'elle est montée sous le genou d'un piéton lors de la marche.

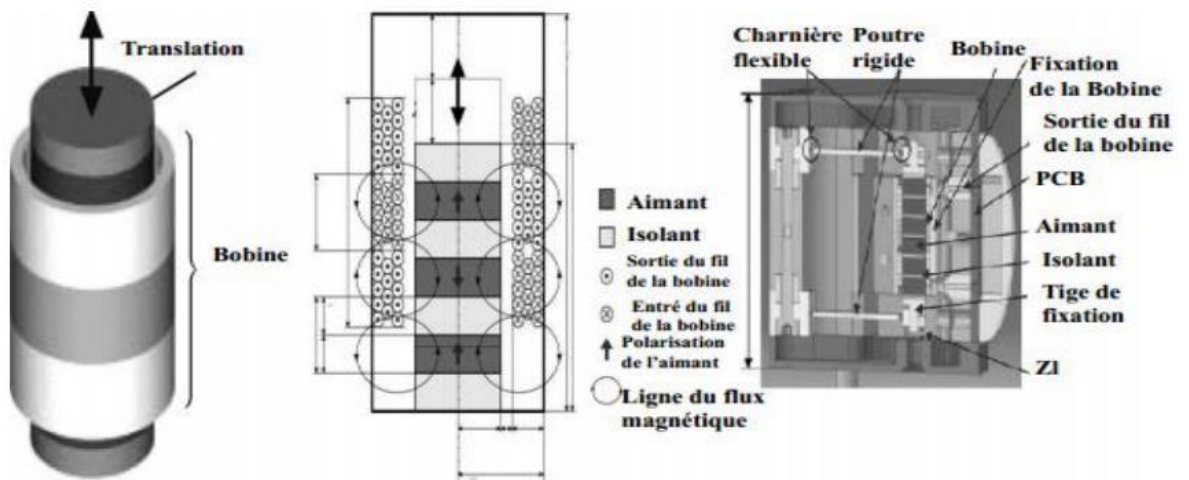


Fig.I.21 Générateur électromagnétique développés par von Büren et Tröster [22]

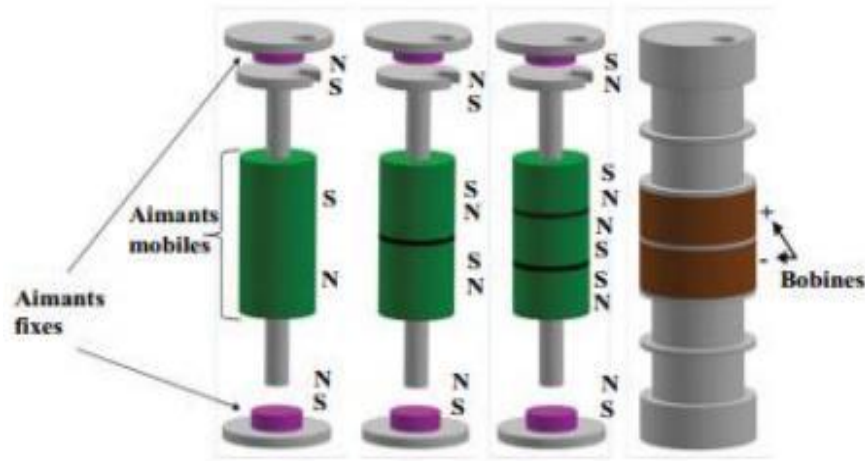


Fig.I.22 Générateur électromagnétique développé par Apo et Priya [25]

Dans le même contexte, Apo et Priya [25] ont proposé une comparaison entre les trois récupérateurs (Fig.I.22). Le premier récupérateur est composé d'un aimant oscillant entre deux aimants fixes, le deuxième est composé de deux aimants collés et à pôle opposé en lévitation entre deux aimants fixes et le troisième est composé de trois aimants collés comme illustré dans la Fig.I.22. Ils ont constaté que la troisième configuration est la meilleure pour la récupération d'énergie.

VI. LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES METHODES DE TRANSDUCTION

Le Tableau I.1 présente une comparaison qualitative des caractéristiques des récupérateurs électro-magnétiques, électrostatiques et piézoélectriques.

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients des méthodes de récupération d'énergie

Type	Avantage	Inconvénients
Piézoélectrique	-Absence de source de tension extérieure -fort couplage -fort tension générées	-Fragilité des couches piézoélectrique -Résistance élevée -Sensibilité à la température
Électromagnétique	-Forts couplages -pas de matériaux intelligents -Courant de sortie élevé	-Intégration MEMS difficile -Faibles tensions générées
Electrostatique	-Forte tension générée -compatible avec fabrications MEMS	-Nécessité d'une source de tension ou d'une charge externe -Faible capacité

De manière générale, les générateurs électromagnétiques, de par leur utilisation à grande échelle, sont considérés comme les récupérateurs les plus matures et les plus appropriés aux dispositifs de larges tailles (supérieures au centimètre cube).

Ce projet de fin d'étude se concentre principalement sur l'étude de solutions pour les récupérateurs d'énergie type électromagnétique.

VII. SYSTEMES RESONANTS

La récupération d'énergie à partir de vibrations mécaniques repose sur l'utilisation d'un système inertiel résonant dont la fréquence propre est égale ou proche de celle de l'excitation subie par le système. En général, on distingue trois types de générateurs [9] :

- Les générateurs résonants avec un amortissement proportionnel à la vitesse ;
- Les générateurs résonants avec une force d'amortissement ayant une amplitude constante et opposée au déplacement ;
- Les générateurs paramétriques fonctionnant hors résonance.

Lorsque la fréquence d'excitation est proche ou supérieure à la fréquence de résonance du système, les générateurs avec un amortissement proportionnel à la vitesse offrent les meilleures performances. En revanche, lorsque la fréquence d'excitation est inférieure, ce sont les générateurs avec une force d'amortissement constante qui deviennent plus efficaces. Les générateurs paramétriques sont utilisés, par exemple, lorsque la fréquence de résonance n'est pas connue ou lorsqu'il est impossible de dimensionner un système résonant à la fréquence d'excitation [10].

VIII. FONCTIONNEMENT D'UN RECUPERATEUR D'ENERGIE VIBRATOIRE

Les récupérateurs d'énergie vibratoire sont généralement constitués d'un résonateur mécanique, d'un transducteur électromécanique et d'une interface électronique. La puissance mécanique de la source vibratoire se transmet de l'un de ces constituants à l'autre au sein du récupérateur, avec une conversion du domaine mécanique au domaine électrique et des pertes à chaque étape. La Fig.I.23 résume le transfert de puissance au sein d'un récupérateur d'énergie vibratoire.

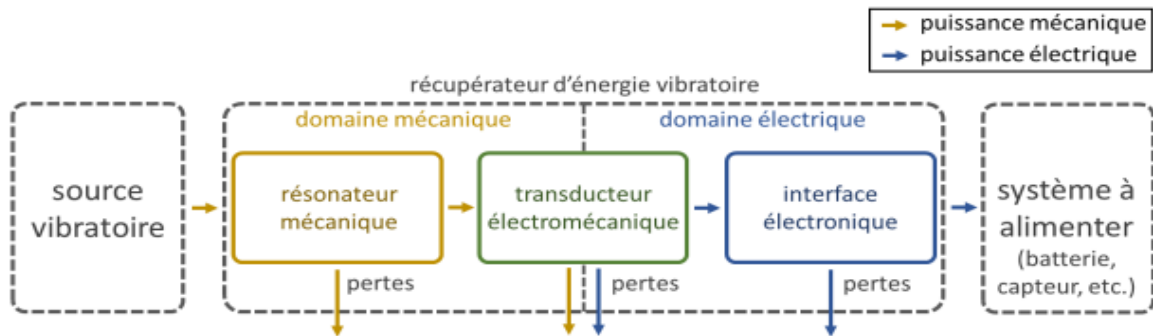


Fig.I.23 Schéma d'un récupérateur d'énergie vibratoire

IX. CIRCUIT DE RECUPERATION D'ENERGIE

Les circuits électroniques de puissance utilisés pour la récupération d'énergie se composent d'un redresseur, d'un onduleur convertisseur DC-DC, et d'un dispositif de stockage d'énergie. Ces circuits ont quatre fonctions principales :

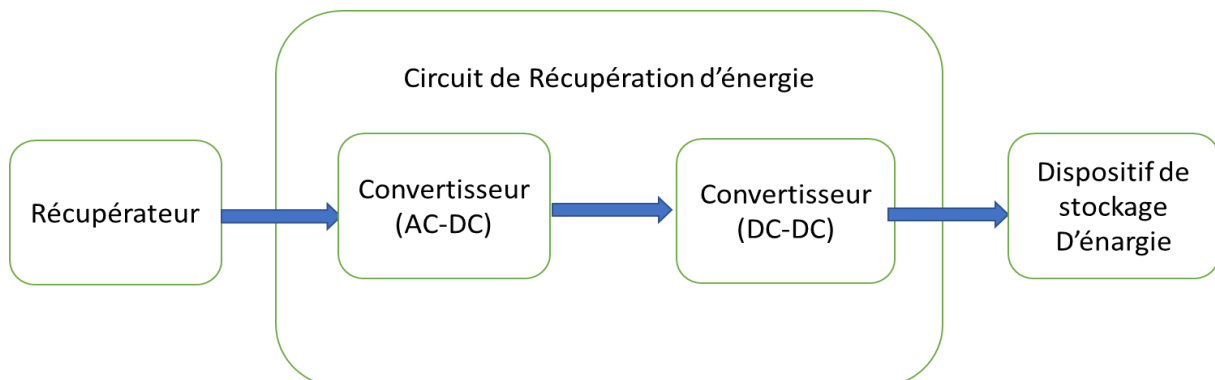


Fig.I.24 Circuit de récupération d'énergie vibratoire

- La régulation de la puissance récupérée à partir d'une tension alternative (AC) vers une tension continue (DC) pour qu'elle soit adaptée à un dispositif de charge ou de stockage d'énergie.
- Le contrôle du flux d'alimentation.
- L'amélioration de l'efficacité de récupération d'énergie obtenue par le choix des paramètres optimaux.
- L'amélioration de l'efficacité de récupération d'énergie est réalisée en choisissant les paramètres optimaux des circuits électroniques de puissance. Cette approche permet d'ajuster les paramètres en fonction du niveau de vibration ou de la charge externe, conduisant ainsi à une meilleure efficacité énergétique [12]-[13].

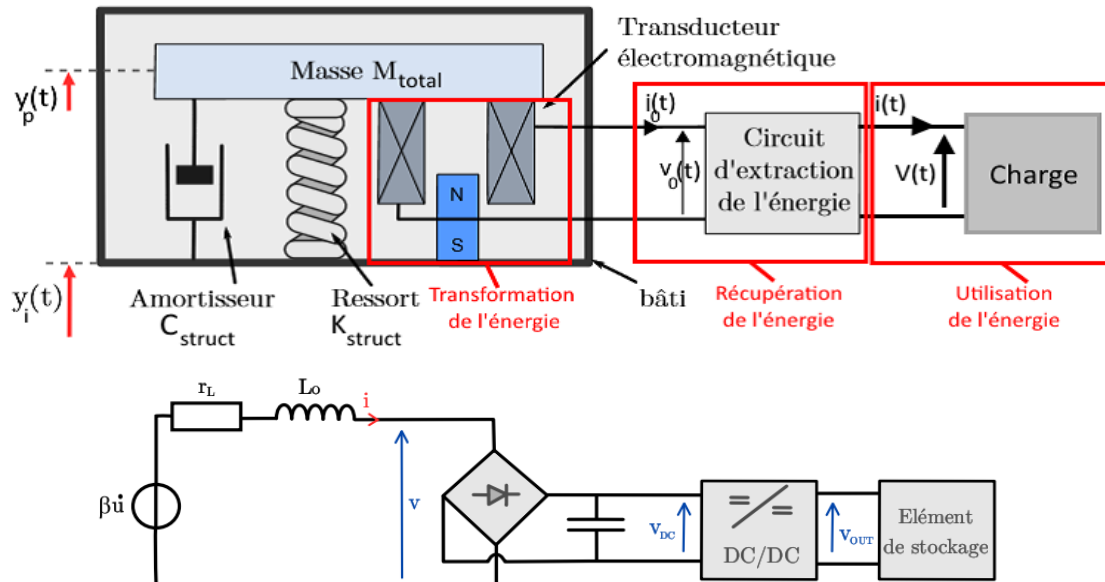


Fig.I.25 Circuit d'extraction classique pour un EMG

En pratique, la puissance fournie par le transducteur doit être convertie par un circuit d'extraction généralement composé d'un redresseur puis d'un convertisseur DC/DC (Fig.I.25). Pour simplifier le calcul, le redresseur est ici négligé, et une simple résistance adaptée est considérée (Fig.I.26). Cette approche est considérée dans de nombreuses publications [23].

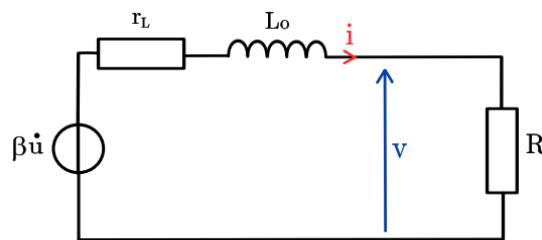


Fig.I.26 Circuit d'extraction classique simplifié pour un EMG

Ce convertisseur peut se résumer en deux sous-systèmes :

- Sous-système représentant la conversion électromagnétique, c'est-à-dire l'endroit où s'effectue la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Sous-système correspondant au circuit électrique couplé à cette conversion et destiné à la récupération de l'énergie électrique.

X. CONCLUSION

Dans ce chapitre introductif nous avons présenté un aperçu du contexte global de la récupération d'énergie. Nous avons commencé par les enjeux et les besoins liés à la récupération de l'énergie ainsi que la notion d'autonomie. Puis nous avons présenté un certain

nombre d'applications qui paraissait envisageable, ainsi que les sources d'énergie et leur principe de conversion.

Chaque application, chaque forme d'énergie et chaque méthode de conversion fait office de longues recherches scientifiques. Enfin nous avons mis en évidence les caractéristiques des microsystemes et la possibilité grâce à leur faible consommation de les alimenter en récupérant l'énergie ambiante. Ceci implique la conception de récupérateur intégrant une source, un système de conversion et de stockage.

Références bibliographiques :

- [1] G. Despesse, « Etude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micro-systèmes communicants », Thèse de doctorat de l'INPG, 2005
- [2] H. Durou, « conception et intégration d'un générateur piézoélectrique et d'un micro dispositif de stockage capacitif en technologie silicium », au LAAS-CNRS 2011.
- [3] université virtuelle environnement et développement Durable : La maîtrise de la demande d'énergie : état des lieux et perspectives, <http://uved.univperp.fr/module1/co/Module-maitrise-demande.html> 2013
- [4] E.Arroyo, « Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes - Dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone » ; Thèse de doctorat, Grenoble, novembre 2012.
- [5] D. Mammosser, « Conception et optimisation d'un transducteur électrodynamique pour la récupération d'énergie vibratoire », Thèse de doctorat; Besançon; Octobre 2010.
- [6] I. Abed. Modélisation et optimisation d'un récupérateur d'énergie vibratoire électromagnétique non-linéaire multimodale. Mécanique. Université de Franche-Comté; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2016.
- [7] B. A. Seddik, « Systèmes de récupération d'énergie vibratoire large bande », These de doctorat, Grenoble, 2012. Consulté le: 18 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2012GRENT057>.
- [8] B.Mutlu, E. Kurt, N.Bizon, and J.M.L. Guede. Design and fabrication of a new micro-power scaled electromagnetic harvester. *Journal of Energy Systems*, 3(2) :5166, 2019.
- [9] M. Bendame, E. Abdel-Rahman, and Mostafa Soliman. Electromagnetic impact vibration energy harvesters. In *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*, pages 2958. Springer, 2015.
- [10] S. Priya and D. J Inman. *Energy harvesting technologies*, volume 21. Springer, 2009.
- [11] P. Glynne Jones, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor Systems;" *Sensors and Actuators A : Physical*, February 2004.
- [12] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, et S. Roy, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting;" *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007.
- [13] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan et J. H. Lang, "Vibration-to-electric energy conversion;" *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI)*, 2001.
- [14] T. Ueno et S. Yamada, "Performance of Energy Harvester Using Iron–Gallium Alloy;" *IEEE transactions on magnetics*, 2011.

- [15] Zhu Y. et Zu J, "A magnetoelectric Generator for Energy Harvesting From the Vibration of magnetic levitation;" IEEE Transactions on Magnetics, 2012.
- [16] E. Arroyo « Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes », Grenoble, 2012.
- [17] B.P. Mann and N.D.Sims « Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation », Journal of Sound and Vibration, 2008.
- [18] « Actionneur électromagnétique comportant une structure statorique à trois pôles de longueurs différentes et distributeurs pneumatiques mettant en œuvre de tels actionneurs » Brevet : FR 2 682 542 – 1991
- [19] Z. Saddi, H. Takhedmit, W. Haboubi, JDLS. Luk, O. Picon et L. Cirio. "Conception d'une nouvelle rectenna bi-bande à 1.8 et 2.45 GHz", AREMIF 2013 , Paris, 27 Mai 2013.
- [20] A. Morel, « Interfaces électriques adaptatives dynamiquement au spectre fréquentiel pour la récupération d'énergie vibratoire large bande », These de doctorat, Chambéry, 2020. Consulté le: 6 février 2023.
- [21] T. Huguet, « Vers une meilleure exploitation des dispositifs de récupération d'énergie vibratoire bistables : Analyse et utilisation de comportements originaux pour améliorer la bande passante », These de doctorat, Lyon, 2018.
- [22] G. Despesse, « Étude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micros-systèmes communicants », These de doctorat, Grenoble INPG, 2005.
- [23] W.Q. Liu. Conception d'un dispositif de récupération d'énergie vibratoire large bande. PhD thesis, Université de Grenoble, 2014.
- [24] Louis Schmerber. Identification et caractérisation de sources électromagnétiques - Application à la discrétion des moteurs de propulsion navale.
- [25] A. S. Bouhadjar, "Systèmes de récupération d'énergie vibratoire large bande", Thèse de Doctorat, Energie électrique. Université de Grenoble, 2012

Chapitre II :
**Modélisation d'un système de
récupération d'énergie**

Chapitre II : Modélisation d'un système de récupération d'énergie

I. INTRODUCTION

Parmi toutes les sources d'énergie récupérable, les vibrations mécaniques sont une des plus étudiées et utilisées à l'heure actuelle. L'objectif de ce chapitre est de proposer un modèle mathématique pour la modélisation du dispositif de conversion dédié à la récupération de l'énergie mécanique, dont la conversion en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. Nous proposerons des formulations aboutissant à la modélisation. Dans cette section, nous présentons le calcul de la force électromotrice induite dans une bobine par un aimant permanent. On se place dans le cas d'un circuit conducteur immobile, de géométrie quelconque, soumis à un champ magnétique variable dans le temps.

II. FONCTIONNEMENT D'UN RESONATEURS

Les récupérateurs d'énergie vibratoire sont généralement constitués d'un résonateur mécanique, d'un transducteur électromécanique et d'une interface électronique.

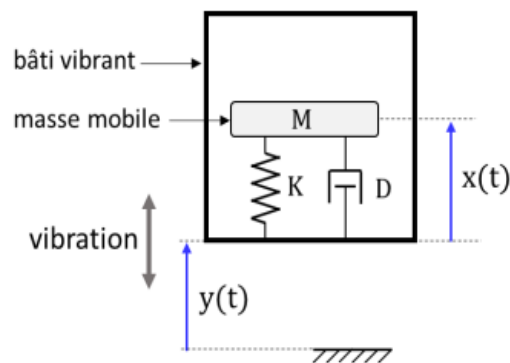


Fig.II.1 Schéma du modèle décrivant un résonateur mécanique [1]

II.1 Résonateur mécanique

Le résonateur mécanique consiste typiquement en une masse mobile reliée au bâti vibrant par l'intermédiaire d'un ressort. Pour une accélération vibratoire quelconque a , en notant x le déplacement de la masse mobile par rapport au bâti vibrant, un modèle très général et simple du résonateur mécanique est décrit :

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = -Ma \tag{II.1}$$

Où K , M et D représentent respectivement la raideur du ressort, la masse du mobile et le coefficient d'amortissement, qui décrit les pertes mécaniques liées à la déformation du ressort, l'encastrement, l'air, etc. Ce modèle est représenté en Fig.II.1, avec $y(t)$ désignant la position du bâti soumis à la vibration.

Les deux principales propriétés physiques caractérisant le comportement du résonateur mécanique sont la pulsation propre $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ et le facteur de qualité mécanique $Q = (M\omega_0)/D$. Pour une accélération vibratoire sinusoïdale d'amplitude $|a|$ et de pulsation ω , la puissance mécanique moyenne P_{source} fournie par la source vibratoire est donnée par la formule [1]-[2]:

$$P_{source}(\omega) = \frac{MQ|a|^2}{2\omega_0} \cdot \frac{\frac{\omega}{\omega_0}}{Q^2 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \tag{II.2}$$

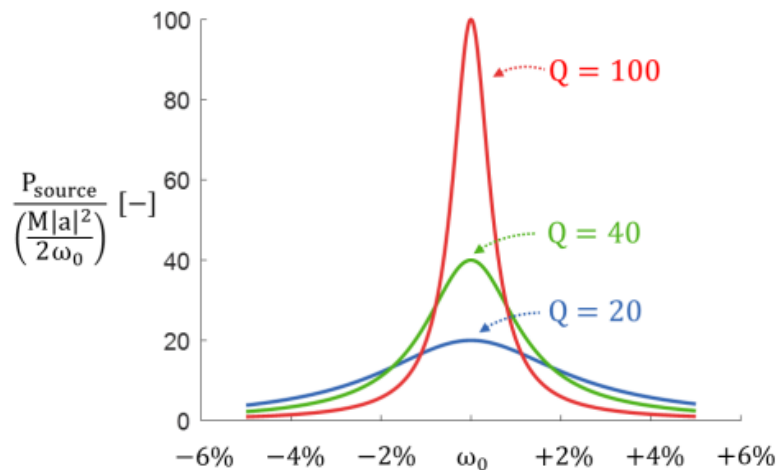


Fig.II.2 Spectre de puissance mécanique moyenne normalisée fournie par la source vibratoire en fonction de la pulsation vibratoire (exprimée en pourcentage de la pulsation propre) pour différents facteurs de qualité mécaniques [1]

Cette figure indique que la puissance maximale fournie par la source augmente avec le facteur de qualité.

II.2 Modèle générique pour la conversion mécano-électrique.

Un des premiers modèles pour la conversion mécano-électrique a été proposé par Williams et Yates [3]. Il consiste en un système résonnant à base d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur. Ce modèle permet notamment de déterminer la puissance maximale théorique récupérable d'un système de récupération d'énergie vibratoire à partir des

paramètres du système et des caractéristiques des vibrations ambiantes (fréquence, amplitude) (Fig.II.3) [6].

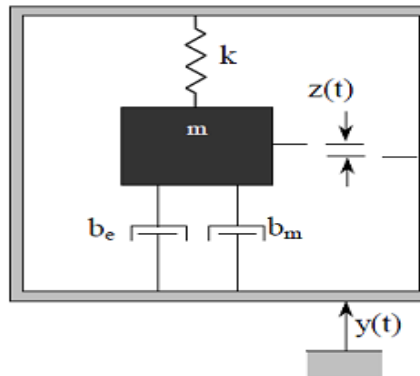


Fig.II.3 Modèle générique d'un convertisseur mécano-électrique [3]

Les vibrations du milieu ambiant $y(t)$ induisent un déplacement relatif $x(t)$ de la masse mobile m par rapport au cadre. Une partie de l'énergie cinétique de la masse mobile est perdue du fait de l'amortissement mécanique (F_{mec}) tandis que l'autre partie est convertie en électricité, ce qui est modélisé par un amortissement électrique (F_{ele}). Ces deux forces sont généralement représentées par des amortissements visqueux :

$$F_{ele} = b_e \dot{x} \tag{II.3}$$

$$F_{mec} = b_m \dot{x} \tag{II.4}$$

L'équation correspondant à ce modèle est la suivante :

$$m \ddot{z} + (b_e + b_m) \dot{z} + kz = -m\ddot{y} \tag{II.5}$$

Avec b_m et b_e sont le coefficient d'amortissement mécanique et électrique et k est la raideur du ressort. Le déplacement du cadre où le tout est fixé est noté $y(t)$ et le déplacement de la masse par rapport au cadre $z(t)$.

Considérons à présent un déplacement du support de type sinusoïdal $y(t) = Y \sin(\omega t)$. L'expression suivante du déplacement relatif de la masse m en régime permanent :

$$Z(\omega) = \frac{-\frac{1}{\omega_0^2}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j\left(\frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_e}\right) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} A_{in} \tag{II.6}$$

Avec $A_{in}(\omega) = -\omega^2 Y(\omega)$, ω_0 est la fréquence propre du système, Q_m est le facteur de qualité mécanique, Q_e est le facteur de qualité électrique. Ces constantes s'expriment comme :

$$Q_m = \sqrt{\frac{km}{b_m}} \quad (\text{II.7})$$

$$Q_e = \sqrt{\frac{km}{b_e}} \quad (\text{II.8})$$

La puissance débitée dans la charge électrique s'écrit comme :

$$P(\omega) = b_e \omega^2 Z^2 \quad (\text{II.9})$$

Il en découle donc que le maximum de puissance électrique est atteint lorsque le système fonctionne à la résonance et aussi lorsque l'amortissement électrique est égal à l'amortissement mécanique, ou Elle est maximisée lorsque le facteur de qualité mécanique est égal au facteur de qualité électrique [4]-[5].

III. DIAGRAMME DES FORCES

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, la récupération d'énergie vibratoire se fait en deux étapes:

- Transformer la vibration en un déplacement relatif
- Transformer ce déplacement relatif en une énergie électrique via un convertisseur mécano-électrique (piézoélectrique, électromagnétique, électrostatique ou autre).

La somme vectorielle des forces appliquées à un objet est égale à zéro (Fig.II.4). Nous présentons ci-dessous le diagramme des forces appliquées sur la masse sismique M :

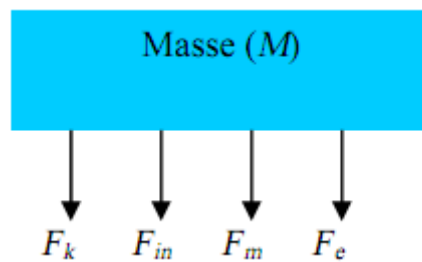


Fig.II.4 Diagramme des forces appliquées sur la masse

Avec F_e est la force due à l'amortissement électrique, F_m est la force due à l'amortissement mécanique, F_{in} est la force d'accélération interne et F_k est la force de rappel du ressort.

L'application du principe fondamental de la dynamique donne la relation suivante qui lie les différentes forces auxquelles la masse sismique est soumise:

$$Kz + m \frac{d^2}{dt^2} (z + y) + b_m \dot{z} + b_e \dot{z} = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\ddot{z} + \frac{(b_m + b_e)}{m} \dot{z} + \frac{K}{m} z = -\ddot{y} \quad (\text{II.11})$$

Puis, en posant :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{II.12})$$

$$D = b_m + b_e \quad (\text{II.13})$$

$$b_m = 2 m \xi_m \omega_0 \quad (\text{II.14})$$

$$b_e = 2 m \xi_e \omega_0 \quad (\text{II.15})$$

Avec ξ_e et ξ_m sont alors les coefficients d'amortissement des forces mécanique et électrique.

La pulsation de résonance du système vaut

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2(\xi_e + \xi_m)^2} \quad (\text{II.16})$$

La puissance récupérée est donc maximisée lorsque : $\xi_e = \xi_m$ et $\omega_r = \omega_0$

Nous nous proposons ici de déterminer quel coefficient d'amortissement b_e permet de maximiser la puissance de sortie avant de définir le type de convertisseur à utiliser pour atteindre ce coefficient d'amortissement optimal.

IV. COEFFICIENT D'AMORTISSEMENT ELECTROMAGNETIQUE

Le courant qui traverse la bobine crée un champ magnétique qui s'oppose à celui qui lui a donné naissance, à savoir le champ magnétique produit par l'aimant. La force électromagnétique est proportionnelle au courant électrique et donc à la vitesse de variation du champ magnétique, elle s'exprime comme étant le produit entre l'amortissement électromagnétique (ξ_e) et la vitesse du déplacement de l'aimant à l'intérieur de la bobine, ce qui est illustré par l'équation ci-dessous [6]-[7] :

$$F_{em} = \xi_e \frac{dy}{dt} \quad (\text{II.17})$$

La puissance instantanée en entrée d'un générateur :

$$P_{em} = F_{em} \frac{dy}{dt} \quad (\text{II.18})$$

La charge électrique vue par le générateur est considérée comme étant l'association série entre l'impédance de la bobine et celle de la charge réelle du dispositif connecté au générateur, ce qui donne

en réalité l'expression suivante de la puissance électrique instantanée [8]:

$$P_{em} = F_{em} \frac{dy}{dt} = \frac{v^2}{R_c + R_b + jL_b \omega} \quad (\text{II.19})$$

Ou $R_b + jL_b \omega$ l'impédance de la bobine, R_c est l'impédance de la charge résistive connectée et V est la tension qui apparait aux bornes de la bobine.

Ces équations nous permettent donc de développer un modèle mathématique du coefficient d'amortissement électromagnétique :

$$\xi_e = \frac{1}{R_c + R_b + jL_b \omega} (N \frac{d\phi}{dx})^2 \quad (\text{II.20})$$

Maximiser l'amortissement revient à maximiser la vitesse de variation du flux magnétique traversant la bobine et minimiser l'impédance liée à cette bobine.

IV.1 Coefficient de transduction

Pour ce type de système de récupération, on peut définir un coefficient de transduction, que l'on note β et qui correspond au taux de variation du flux magnétique par rapport au déplacement de la masse mobile. A partir de ce coefficient de transduction, on définit le couplage électromagnétique, qui s'écrit β^2/R_c où R_c est la résistance du bobinage [7]. Plus β est grand, plus la conversion énergétique entre le domaine mécanique et le domaine électrique est efficace.

IV.2 Comportement dynamique

Le comportement dynamique d'un récupérateur d'énergie vibratoire à conversion électromagnétique peut être décrit par les équations (II.21) et (II.22).

$$M \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + D \cdot \frac{dz}{dt} + K \cdot z + \beta \cdot i + M g = -M \cdot \ddot{y} \quad (\text{II.21})$$

$$V + R_c \cdot i + L_c \cdot \frac{di}{dt} = \beta \cdot \frac{dz}{dt} \quad (\text{II.22})$$

Une solution analytique plus précise étant trop complexe, nous nous sommes tournés vers un modèle numérique basé sur les deux équations dans lequel nous incluons des caractéristiques mécaniques et magnétiques du système issues de calculs par éléments finis.

V. ENERGIE D'INTERACTION ENTRE DEUX AIMANTS

Pour avoir une expression de l'énergie d'interaction entre deux aimants permanents, des travaux ont été réalisés sur la formulation exacte de l'énergie d'interaction entre aimants non-sphériques sans approximation dipolaire [12]-[13]-[14]. Une expression généralisée de

l'énergie d'interaction entre aimants en utilisant la transformée de Fourier en espace a notamment été développée [15].

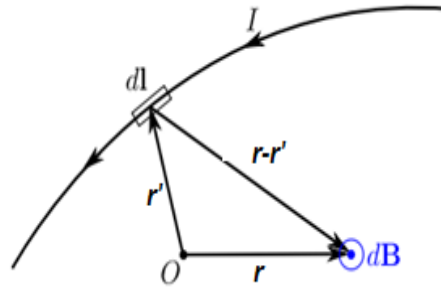


Fig.II.5 Champ magnétique élémentaire dB induit par un élément de courant Idl

Le champ magnétique élémentaire dB induit par l'élément de courant Idl est donné par :

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \times (r - r')}{4\pi |r - r'|^3} \quad (\text{II.23})$$

Où B est le champ magnétique résultant en un point, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, I est le vecteur courant électrique, r est le vecteur de position de l'élément courant au point où le champ est mesuré et r' est le vecteur de déplacement total depuis l'élément de câble (dl) au point (l) jusqu'au point où le champ est calculé (Fig.II.5).

Pour une densité de courant volumique $J(x)$ parcourant un volume V , l'équation fondamentale devient :

$$\mathbf{B}(x) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \mathbf{J}(r') \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} dV \quad (\text{II.24})$$

Le potentiel vecteur produit en r par un dipôle magnétique localisé en r' s'exprime :

$$\mathbf{A}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \mathbf{M}(r') \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} d^3r' \quad (\text{II.25})$$

L'exploitation de la transformée de Fourier en espace permet d'écrire le potentiel sous une forme [16]:

$$\mathbf{A}(k) = \frac{\mu_0}{4\pi} \mathbf{M}(k) \times \mathcal{F} \left[\frac{r}{r^3} \right] \quad (\text{II.26})$$

Où k est le vecteur des fréquences. La transformation de Fourier (\mathcal{F}) d'une fonction M est :

$$\mathcal{F}\{\mathbf{M}(r)\} = \mathbf{M}(k) \quad (\text{II.27})$$

On peut rendre la notation du $M(\mathbf{r})$ beaucoup plus compacte à l'aide de la notation complexe. D'après la définition du potentiel vecteur, on déduit finalement que :

$$\mathbf{A}(\mathbf{k}) = -i \frac{\mu_0}{k^2} \mathbf{M}(\mathbf{k}) \times \mathbf{k} \quad (\text{II.28})$$

Avec

$$\mathbf{M}(\mathbf{k}) = M_0 \mathbf{D}(\mathbf{k}) \quad (\text{II.29})$$

Par transformation de Fourier sur r , on obtient :

$$\mathbf{D}(\mathbf{k}) = \int \mathbf{D}(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{r} \quad (\text{II.30})$$

Nous définissons la transforme de Fourier du potentiel vectoriel magnétique par apport la variable k , telle que :

$$\mathbf{A}(\mathbf{k}) = -i \frac{\mu_0 B_0}{|k^2|} \mathbf{D}(\mathbf{k}) (\hat{\mathbf{m}} \times \mathbf{k}) \quad (\text{II.31})$$

La relation résultante entre induction et l'aimantation est :

$$B_0 = \mu_0 M_0 \quad (\text{II.32})$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{k}) = i\mathbf{k} \times \mathbf{A}(\mathbf{k}) = -i \frac{B_0}{|k^2|} \mathbf{D}(\mathbf{k}) (\mathbf{k} \times \hat{\mathbf{m}} \times \mathbf{k}) \quad (\text{II.33})$$

Et dans l'espace réel :

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \mathbf{M} - i \frac{B_0}{8\pi^3} \int d^3 \mathbf{k} \frac{\mathbf{D}(\mathbf{k})}{|k|^2} \mathbf{k} (\hat{\mathbf{m}} \cdot \mathbf{k}) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (\text{II.34})$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{8\pi^3} \int d^3 \mathbf{k} \frac{\mathbf{k}(\mathbf{M}(\mathbf{k}) \cdot \mathbf{k})}{|k|^2} \quad (\text{II.35})$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}) = \frac{M_0}{8\pi^3} \int d^3 \mathbf{k} \frac{\mathbf{D}(\mathbf{k})}{|k|^2} \hat{\mathbf{m}} e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (\text{II.36})$$

L'énergie d'interaction dans un système de deux aimants à aimantations perpendiculaires est donnée [16] :

$$E_m = -\frac{\mu_0}{2} \int_v \mathbf{H}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{M}(\mathbf{r}) d^3 r \quad (\text{II.37})$$

$$E_m = \frac{\mu_0 M_0^2}{16\pi^3} \int d^3 \mathbf{k} \frac{(\hat{\mathbf{m}} \cdot \mathbf{k})^2}{|k|^2} |D(\mathbf{k})|^2 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (\text{II.38})$$

Nous considérons que les aimants ont les aimantations uniformes M_1 et M_2 respectivement. L'énergie d'interaction magnétique entre deux particules dans l'espace réel est exprimée [16] :

$$E_{m,i} = \frac{\mu_0}{8\pi^3} M_1 M_2 R_e \left\{ \int d^3 \mathbf{k} D_1(\mathbf{k}) D_2(\mathbf{k}) (\hat{\mathbf{m}}_1 \cdot \mathbf{k}) (\hat{\mathbf{m}}_2 \cdot \mathbf{k}) e^{-i\mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\rho}} \right\} \quad (\text{II.40})$$

Où $\boldsymbol{\rho}$ est la position relative entre deux particules.

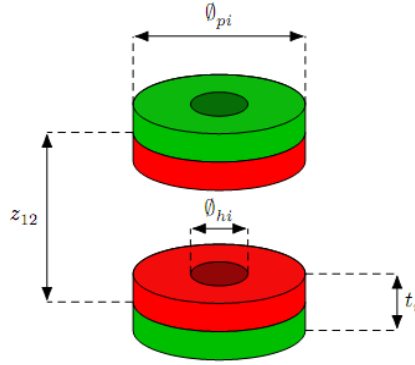


Fig.II.6 Deux aimants à aimantation parallèle

Après simplification l'énergie est donnée comme suivant :

$$E_m = 4\pi\mu_0 M_1 M_2 r_1 r_2^2 \int \frac{dq}{q^2} \left[J_1\left(\frac{r_1}{r_2} q\right) - \frac{r_{1h}}{r_1} J_1\left(\frac{r_{1h}}{r_2} q\right) \right] \left[J_1(q) - \frac{r_{2h}}{r_2} J_1\left(\frac{r_{2h}}{r_2} q\right) \right] \sinh\left(\frac{r_1}{r_2} \tau_1 q\right) \sinh(\tau_2 q) e^{-\xi q} \quad (\text{II.40})$$

La force magnétique est calculée toujours à partir du gradient :

$$F_m = -\nabla E_m \quad (\text{II.41})$$

Après le calcul complet, la force magnétique sera exprimée :

$$F_m = k_e r_2 \int \frac{dq}{q} \left[J_1\left(\frac{r_1}{r_2} q\right) - \frac{r_{1h}}{r_2} J_1\left(\frac{r_{1h}}{r_2} q\right) \right] \left[J_1(q) - \frac{r_{2h}}{r_2} J_1\left(\frac{r_{2h}}{r_2} q\right) \right] \sinh\left(\frac{r_1}{r_2} \tau_1 q\right) \sinh(\tau_2 q) e^{-\xi q} \quad (\text{II.42})$$

Les variables secondaires :

$$\alpha = \frac{t_1}{2}, \beta = \frac{t_2}{2}, t_1 = 2r_1\tau_1, t_2 = 2r_2\tau_2, q = r_2 k_{\perp}, dq = r_2 dk_{\perp}, z_{12} = r_2 \xi, \gamma = z_{12}, k_e = 4\pi\mu_0 M_1 M_2 r_1$$

Avec

$$k_{\perp} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (\text{II.43})$$

$$k = (k_x, k_y, k_z) \quad (\text{II.44})$$

La Fig.II.7 illustre la position angulaire relative des vecteurs de position dans les espaces réels de Fourier.

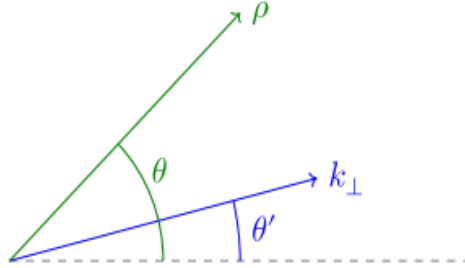


Fig.II.7 position angulaire des vecteurs k_{\perp} et ρ

VI. FLUX MAGNETIQUE A TRAVERS UNE SPIRE CIRCULAIRE

Dans cette partie, nous proposons une expression du flux lorsque l'aimant annulaire est au-dessus ou en dessous de la même bobine. le concept de fonction de forme $D(k)$ est à nouveau utilisé, avec les dimensions illustrées sur la Fig.II.8.

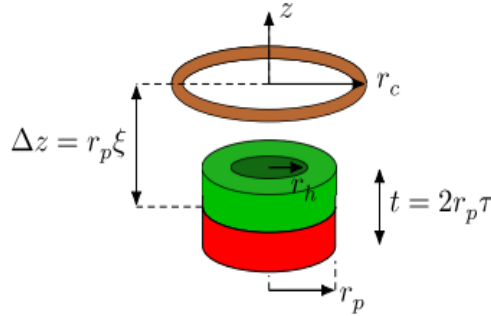


Fig.II.8 Le modèle aimants-spire circulaire avec la position relative et les paramètres géométriques

L'expression du flux magnétique sur une bobine qui entoure un aimant annulaire:

$$\Phi_{in} = 2\pi\mu_0 M_0 r_c \int_0^{\infty} \frac{dq}{q} J_1\left(\frac{r_c}{r_p} q\right) \left[r_p J_1(q) - \frac{r_h}{r_p} J_1\left(\frac{r_h}{r_p} q\right) \right] [1 - \cosh(\xi q) e^{-\tau q}] \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$$t = 2r_p\tau, q = k_{\perp} r_p, q = r_p dk_{\perp}, \Delta z = r_p \xi$$

Et

$$\Phi_{in} = K_{\phi} r_c \int_0^{\infty} \frac{dq}{q} J_1\left(\frac{r_c}{r_p} q\right) \left[r_p J_1(q) - \frac{r_h}{r_p} J_1\left(\frac{r_h}{r_p} q\right) \right] [1 - \cosh(\xi q) e^{-\tau q}] \quad (\text{II.46})$$

La dérivée du flux magnétique capté par chaque bobine est donnée par :

$$\gamma_{in} = \nabla\phi_{in} = 2\pi\mu_0 M_r r_c \int_0^\infty dq \left(\left(J_1(q) - \frac{r_h}{r_p} J_1\left(\frac{r_h}{r_p} q\right) \right) J_1\left(\frac{r_c}{r_p} q\right) \sinh(\xi q) e^{-\tau q} \right) \quad (\text{II.47})$$

$$\text{Où } K_\phi = 2\pi\mu_0 M_0$$

Le flux magnétique lorsque la bobine à une boucle est au-dessus ou en dessous de l'aimant annulaire s'écrit :

$$\phi_{out} = 2\pi\mu_0 M_0 r_c \int_0^\infty \frac{dq}{q} J_1\left(\frac{r_c}{r} q\right) \left[r J_1(q) - r_h J_1\left(\frac{r_h}{r} q\right) \right] \sinh(\tau q) e^{-\xi q} \quad (\text{II.48})$$

Avec

$$\phi_{out} = K_\phi r_c \int_0^\infty \frac{dq}{q} J_1\left(\frac{r_c}{r} q\right) \left[r J_1(q) - r_h J_1\left(\frac{r_h}{r} q\right) \right] \sinh(\tau q) e^{-\xi q} \quad (\text{II.49})$$

La dérivée par rapport à y du flux magnétique capté par chaque bobine est donnée par :

$$\gamma_{out} = \nabla\phi_{out} = 2\pi\mu_0 M_r r_c \int_0^\infty dq \left(\left(J_1(q) - \frac{r_h}{r_p} J_1\left(\frac{r_h}{r_p} q\right) \right) J_1\left(\frac{r_c}{r_p} q\right) \sinh(\tau q) e^{-\xi q} \right) \quad (\text{II.50})$$

VII. CONCLUSION

Dans ce chapitre, le principe de récupération d'énergie pour un convertisseur électromagnétique a tout d'abord été rappelé, puis des expressions ont été exposées afin de modéliser la structure du convertisseur. Le modèle nous permet de développer la force à vide de l'actionneur en fonction de la position, force qui correspond à la raideur magnétique du récupérateur d'énergie. Elle nous permet aussi de proposer le flux perçu par les bobines en fonction de la position et du courant qui les traverse.

Références bibliographiques:

- [1] F. Cottone, « Introduction to vibration energyharvesting », NiPSEnergyHarvestingSummerSchool, 2011.
- [2] J. Ajitsaria, S.Y. Choe, D. Shen et D.J. Kim, « Modeling and analysis of a bimorphpiezo-electric cantilever beam for voltage generation », Smart Materials and Structures, Vol. 16 pp. 447, April 2007.
- [3] P. Glynne-Jones, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.M. White, « An electromagnetic, vibration poweredgenerator for intelligent sensorsystems », Sensors and Actuators A 110, pp. 344-349, February 2004.
- [4] S. Meninger, J.O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A.P. Chandrakasan et J.H. Lang, « Vibration-to-electricenergy conversion », IEEE Transactions on Very Large ScaleIntegration (VLSI), Vol. 9, n°1, pp. 64-76, February 2001.
- [5] T. Ueno et S. Yamada, « Performance of Energy Harvester Using Iron– Gallium Alloy », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47 n°10, pp. 2407-2409, October 2011.
- [6] E. Arroyo, « Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes - Dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone » ; Thèse de doctorat, Grenoble, novembre 2012.
- [7] D. Mammosser, « Conception et optimisation d'un transducteur électrodynamique pour la récupération d'énergie vibratoire », Thèse de doctorat; Besançon; Octobre 2010.
- [8] B.P. Mann et N.D. Sims, « Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation », Journal of Sound and Vibration, Vol. 319, Issues 1-2), pp. 515-530, January 2009.
- [9] Y. Zhu et J. Zu, « A Magnetolectric Generator for Energy Harvesting From the Vibration of magneticlevitation » IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, n°11, pp. 3344-3447, November 2012.
- [10] N. Peyret, « Dissipation de l'énergie mécanique dans les assemblages: effets du frottement en sollicitation dynamique », Thèse de doctorat, Paris-Est, Octobre 2012.
- [11] « Actionneur électromagnétique comportant une structure statorique à trois pôles de longueurs différentes et distributeurs pneumatiques mettant en œuvre de tels actionneurs », Brevet: FR 2 682 542 – 1991
- [12] N. Mohdeb, H. Allag, and T. Hacib. A New Approximation for Calculating the Attraction Force in Cylindrical Permanent Magnets Arrays and Cylindrical Linear Single-

Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 91, 213-225, 2019.

[13] N. Mohdeb, T. Hacib. A New Application of an ANFIS for the Shape Optimal Design of Electromagnetic Devices. International Journal of Intelligent Systems and Applications. Vol 10, pp 11-19, 2014.

[14] D. Vokoun, M. Beleggia, and L. Heller. "Magnetic guns with cylindrical permanent magnets". In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials 324.9 (2012), pages 1715–1719. issn: 03048853. doi: 10.1016/j.jmmm.2011.12.026.

[15] A. G. Avila Bernal and L. E. Linares Garcia. "The modelling of an electromagnetic energy harvesting architecture". In: Applied Mathematical Modelling 36.10 (2012), pages 4728–4741

[16] M. Beleggia, D. Vokoun, and M. Graef. "Forces between a permanent magnet and a soft magnetic plate". In: IEEE Magnetics Letters 3 (2012), pages 2–5. issn: 1949307X. doi: 10.1109/LMAG.2012.2214027.

Chapitre III :

Application et résultats

Chapitre III : Application et résultats

I. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif principal de modéliser le système de récupération d'énergie vibratoire en se focalisant sur les récupérateurs constitués d'un transducteur électromagnétique. Dans ce contexte un récupérateur innovant est proposé dans le cadre du présent travail. Récupérer le maximum d'énergie implique donc, une analyse poussée de la source vibratoire suivie d'un réglage fin de la fréquence de résonance du récupérateur. Le travail que nous présentons ici traite exclusivement l'application d'un modèle semi-analytique que nous avons mis en place pour l'étude de récupérateur d'énergie. Nous considérons pour cette étude un récupérateur qui alimente une charge résistive.

II. APPLICATION ET RESULTATS

II.1 Caractéristiques géométriques et physiques

Le concept de transducteur électromagnétique étudié dans cette section est constitué d'un aimant en translation au travers de deux bobines multicouches. La structure du générateur non-linéaire étudiée dans ce chapitre est illustrée Fig.III.1.

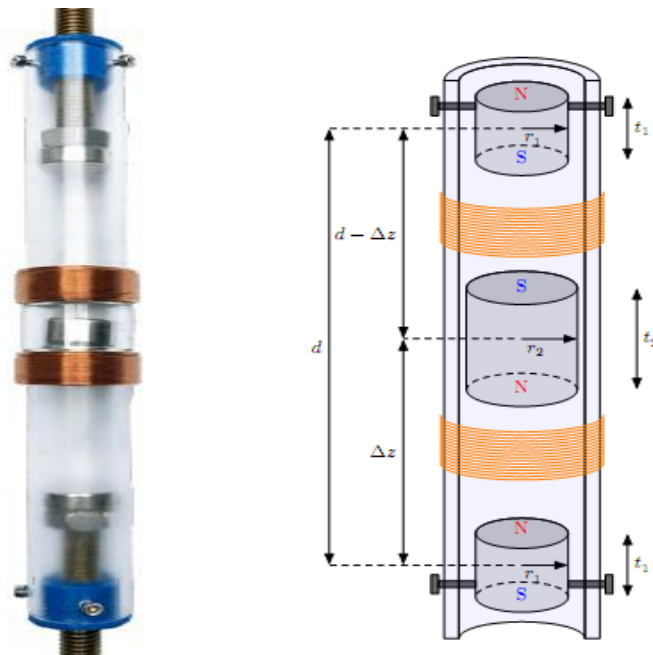


Fig.III.1 Structure du générateur inertiel non-linéaire

Cette forme de générateur a été étudiée de nombreuses fois dans la littérature, et son intérêt pour la conversion des stimulations basses-fréquences (inférieures à 50 Hz) a été démontré [1]-[2]-[3]-[4]. L'utilisation d'aimants répulsifs (ressort magnétique) à la place d'un ressort mécanique permet de limiter l'espace occupé par le système masse-ressort résonant et de fonctionner sans contact, ce qui est un atout pour la durabilité du système. La force de répulsion magnétique est cependant délicate à modéliser, et son caractère non-linéaire rend la réponse fréquentielle du système plus sensible aux caractéristiques de la stimulation d'entrée. Dans ce sens, une approche semi-analytique est proposée pour calculer la répulsion magnétique entre deux aimants permanents cylindriques. L'utilisation d'une force de rappel non-linéaire, comme celle fournie par des aimants répulsifs, a des conséquences sur le comportement fréquentiel du système. Pour illustrer certains de ces effets, nous considérons ici l'exemple d'un système horizontal (sans force de gravité) soumis à une excitation sinusoïdale $y(t) = A \sin(2\pi ft)$. Le récupérateur d'énergie a été placé sur un pot vibrant.

Les caractéristiques du dispositif sont rapportées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Données géométriques et électromagnétiques de récupérateur

Symbole	Description
Aimant mobile (NdFeB, N42)	
Hauteur (mm)	5
Diamètre intérieur (mm)	6
Diamètre extérieur (mm)	15
Rémanence (T)	1.15
Aimants fixes (NdFeB, N42)	
Hauteur (mm)	5
Diamètre intérieur (mm)	6
Diamètre extérieur (mm)	15
Rémanence	1.15
Bobine	
Nombre de spire	119 (17*7)
Diamètre intérieur (mm)	10
Diamètre extérieur (mm)	14
L'écart entre les bobines	20
Diamètre d'un fil électrique	0.555
Entrefer entre aimant bobine (mm)	2.5
Fréquence de travail (Hz)	9

II.2 Evaluation de la force magnétique et le flux magnétique

Un exemple de courbe de force de répulsion entre les aimants fixes et un aimant répulsif est proposé Fig.III.2.

La force magnétique entre deux aimants à aimantation opposés diminue lorsque la distance augmente. Vous pouvez également vérifier cette affirmation à l'aide de notre outil pour le calcul de la force.

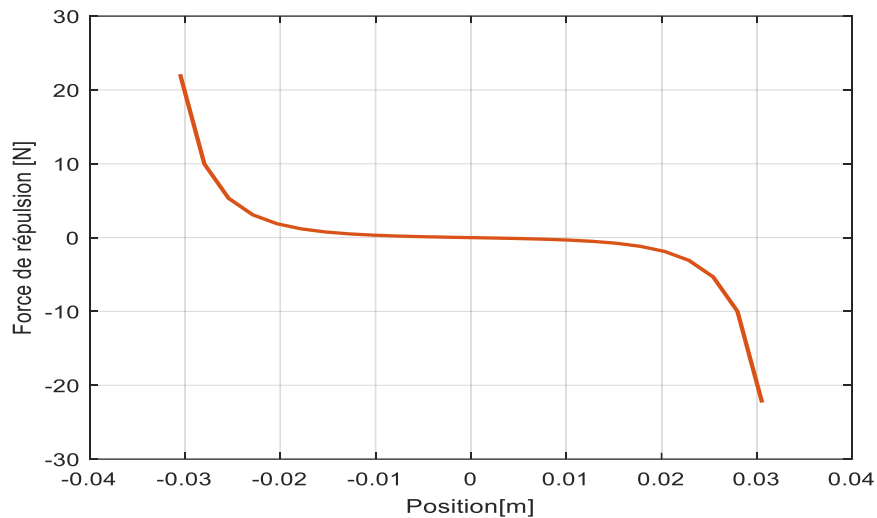


Fig.III.2 Répulsion magnétique : exemple de calcul de la force entre aimants cylindriques et un aimant répulsif en fonction du gap d'air les séparant.

L'aimant émet un flux de champ magnétique constant mais lorsqu'on le déplace par rapport à la bobine, le flux de champ magnétique qu'elle subit varie au cours du déplacement. On admet que le flux de champ magnétique subi par la bobine est maximum lorsque l'aimant est positionné face à son centre et est nul lorsqu'il se trouve à quelques centimètres de cette dernière. On peut alors dessiner la courbe représentant approximativement le flux de champ magnétique subi par la bobine en fonction du temps lorsque l'on réalise un seul passage de l'aimant face à la bobine (Fig.III.3).

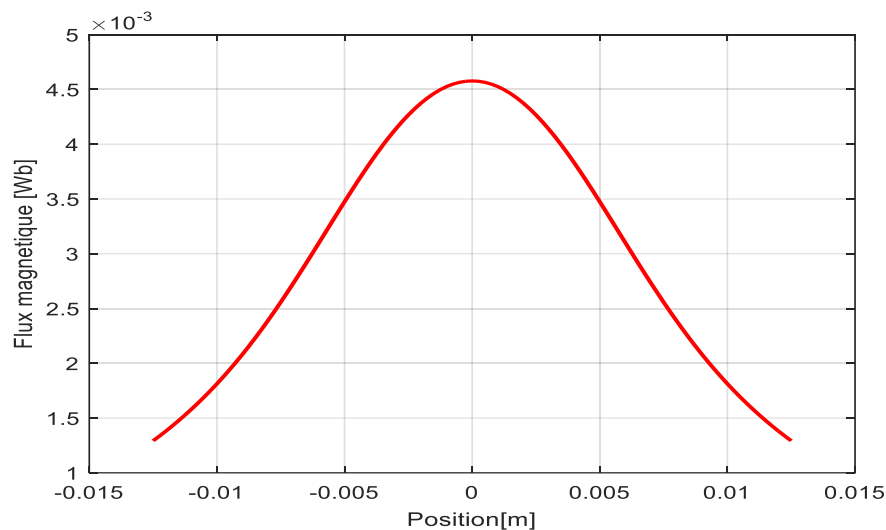


Fig.III.3 Valeur absolue du flux magnétique en fonction du déplacement

De la courbe (Fig.III.3) nous pouvons déduire la forme de la courbe qui représente la dérivée du flux de champ magnétique subi par la bobine en fonction de la position lors d'un seul passage de l'aimant.

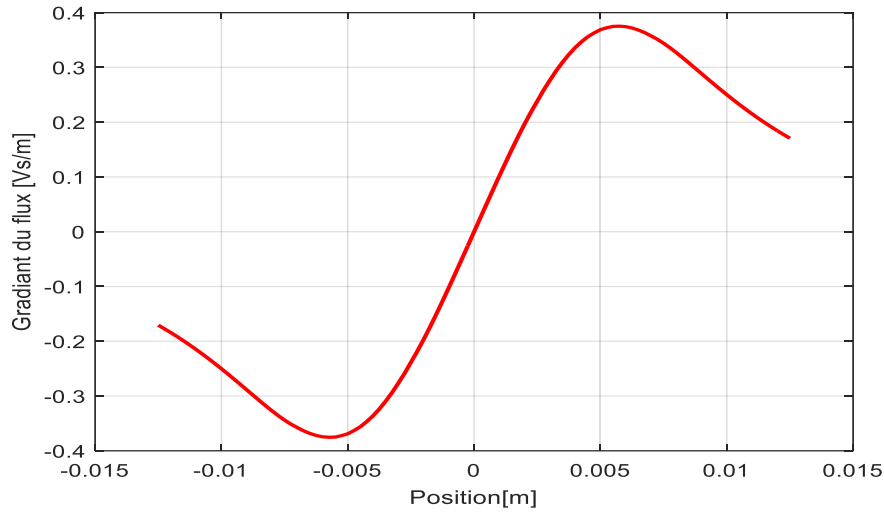


Fig.III.4 Valeur absolue du gradient de flux magnétique

II.3 Etude du comportement dynamique d'un récupérateur

En notre problème, on rencontre également des équations différentielles d'ordre supérieur, comme l'équation de système proposé :

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}(F_{ext} - F_m - c_m \dot{z} - \gamma i) - g \quad (\text{III.1})$$

$$i = \frac{1}{L_{eq}}(\gamma \dot{z} - R_{eq} i) \quad (\text{III.2})$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}(F_m[z - y] - c_m(\dot{z} - \dot{y}) - \gamma[z - y]i) - g \quad (\text{III.3})$$

$$i = \frac{1}{L_{eq}}(\gamma[z - y](\dot{z} - \dot{y}) - R_{eq} i) \quad (\text{III.4})$$

$$x_1 = z \quad (\text{III.5})$$

$$x_2 = \dot{z} \quad (\text{III.6})$$

$$x_3 = i \quad (\text{III.7})$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (\text{III.8})$$

$$z_0 = y \quad (\text{III.9})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m}(F_m[x_1 - y] - c_m(x_2 - \dot{y}) - \gamma[x_1 - y]x_3) - g \quad (\text{III.10})$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L_{eq}}(\gamma[x_1 - y](x_2 - \dot{y}) - R_{eq} x_3) \quad (\text{III.11})$$

Où z et \dot{z} sont la position et la vitesse de l'aimant en lévitation, y et \dot{y} la position et vitesse du système complet.

Le principe pour les résoudre consiste à se ramener à une équation différentielle d'ordre 1. Matlab propose sa propre méthode de résolution d'équation différentielle avec la fonction ode45. En pratique, la fonction ode45 ne résout que des équations différentielles d'ordre 1, mais de dimension quelconque. Il faut donc ramener une équation différentielle à une équation d'ordre 1 avant d'appeler ode45.

Grâce aux ressorts et à la disposition symétrique du récupérateur, la position d'équilibre de la masse sur l'axe z est située en position centrale par rapport aux deux bobines, position que l'on fixe en zéro. La variable z désigne ainsi le déplacement de l'aimant par rapport aux bobines. La forme du déplacement de l'aimant et celle du déplacement relatif ($z - y$) utilisés dans les calculs qui suivent sont données sur les Fig.III.5 et Fig.III.6.

Le temps final de la simulation a été défini en l'augmentant progressivement jusqu'à voir apparaître un régime stable pendant un temps suffisant. Ici 2 secondes sont suffisantes. Le pas de temps a été défini en le diminuant progressivement jusqu'à ce que les résultats soient indépendants de celui-ci (amplitudes des oscillations).

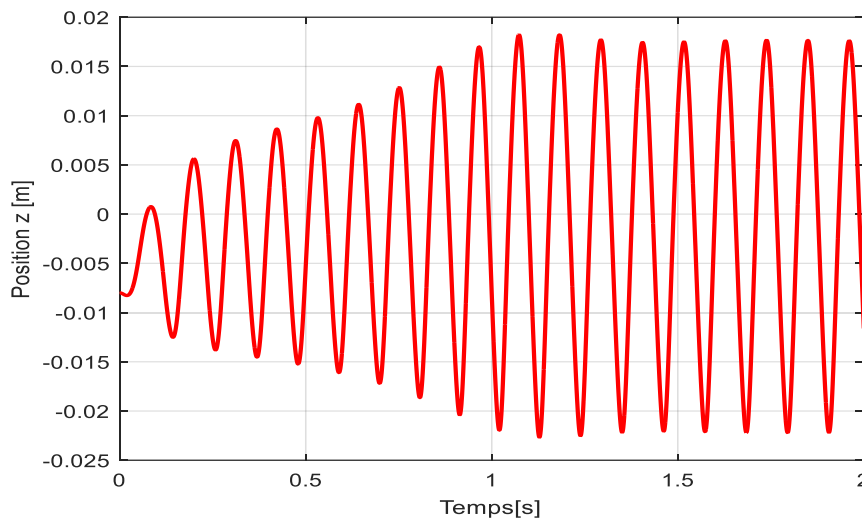


Fig.III.5 Positions de l'aimant mobile au cours du temps

On constate d'après les Fig.III.5 et Fig.III.6 deux comportements distincts. Un régime transitoire, qui dure environ 1 s, puis un régime établi après ça. Il est apparu que la durée du régime transitoire est liée à des paramètres de la simulation, comme le pas de temps utilisé. Pour cette raison, nous avons choisi d'ignorer ce régime transitoire, et d'étudier seulement le régime établi. En régime établi, la position est sinusoïdale.

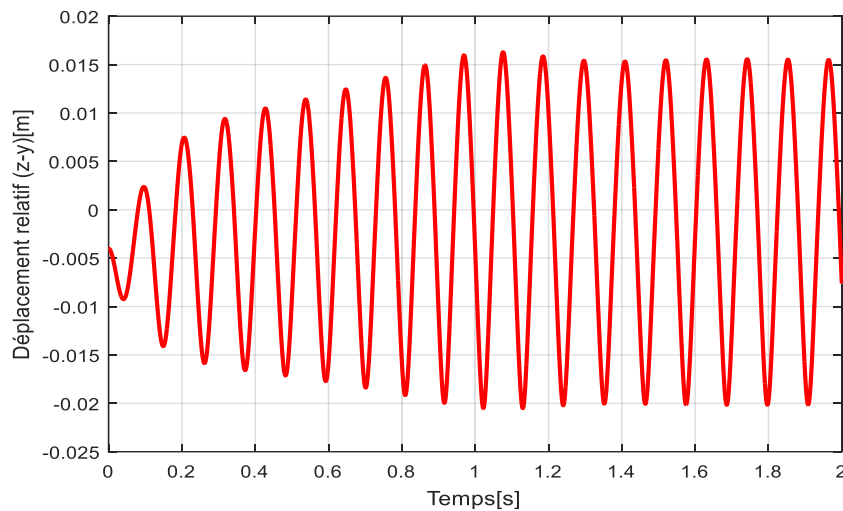


Fig.III.6 Positions relative (z-y) au cours du temps

Il faut signaler qu'au début du courant représente le régime transitoire. Au fil du temps la solution homogène devient négligeable devant la solution particulière ; à ce moment on a : le régime permanent. Pendant la période d'excitation du dispositif, on observe le phénomène transitoire, qui peut être suivi de la réponse en régime permanent puis de la vibration libre lorsque l'excitation cesse (Fig.III.7).

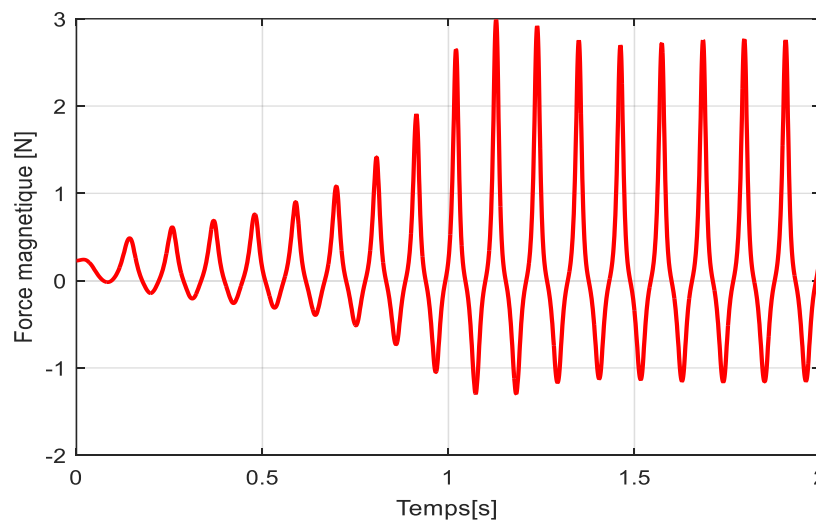


Fig.III.7 L'évolution de la force magnétique en fonction du temps

La forme de la puissance de récupérateur est représentée sur la Fig.III.10 Les amplitudes du signal peuvent changer en raison des différents paramètres du générateur proposé. Ceci est bien visible sur la Fig.III.10. Le système de récupération d'énergie peut produire des puissances jusqu'à 0.24 W en fonction de la vitesse du système vibratoire (suivant l'excitation).

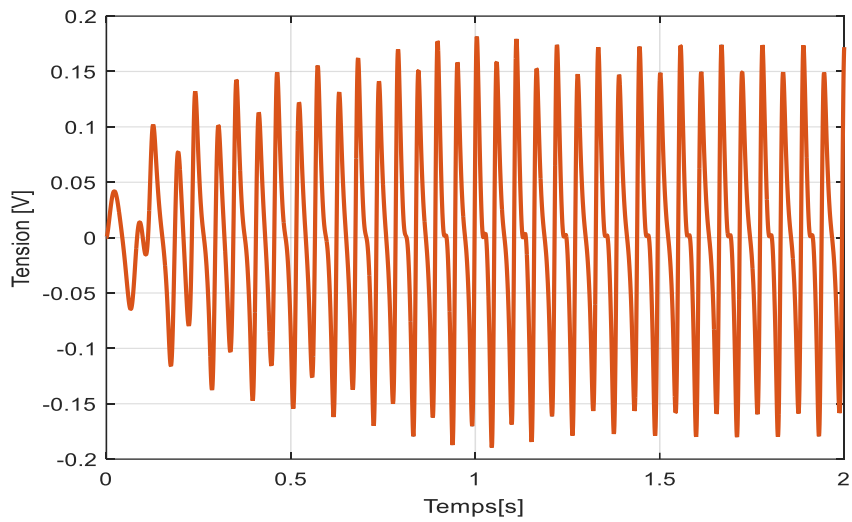


Fig.III.8 Détail du courant électrique traversant la charge

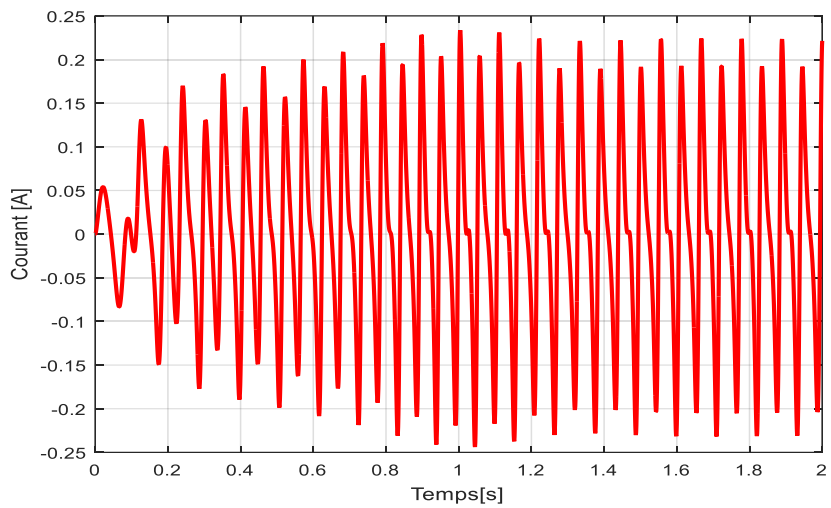


Fig.III.9 Détails temporels du courant i reçu par la charge

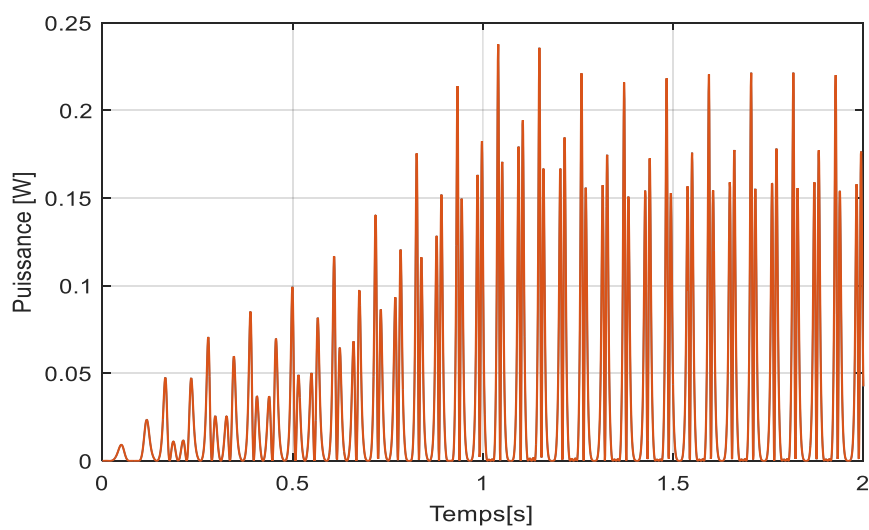


Fig.III.10 Détails temporels de la puissance

II.4 Fréquence de résonance et charge optimale

Lorsqu'il est soumis à une source d'excitation, un système mécanique dissipe de l'énergie par amortissement mécanique. Dans un système électromécanique fonctionnant à sa fréquence de résonance, une partie de l'énergie introduite par la source d'excitation est dissipée par l'amortissement mécanique (cm) et l'autre partie par l'amortissement électrique équivalent (ce).

Puisque l'étude paramétrique est suffisante pour déterminer les meilleures performances du système dynamique à deux variables de conception, on propose l'application d'une procédure de conception pour choisir la fréquence f et la charge optimale R_L .

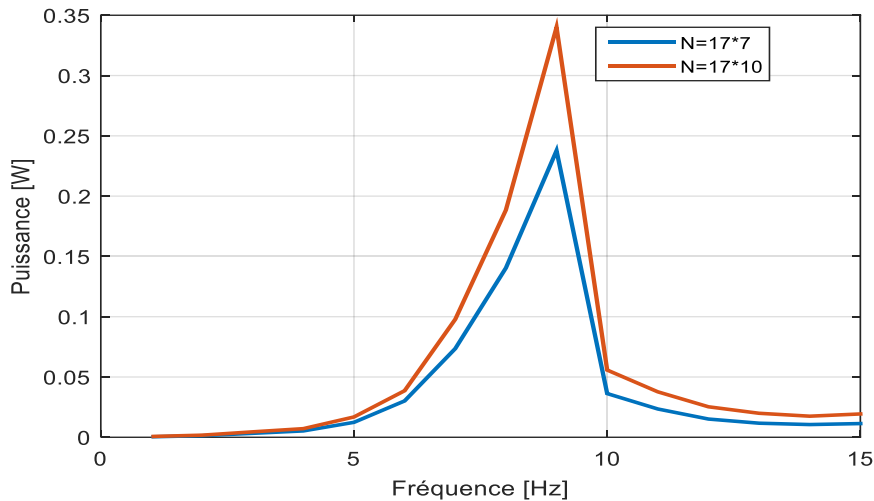


Fig.III.11 la variation de la puissance en fonction de la fréquence pour Différentes valeurs du nombre de spires

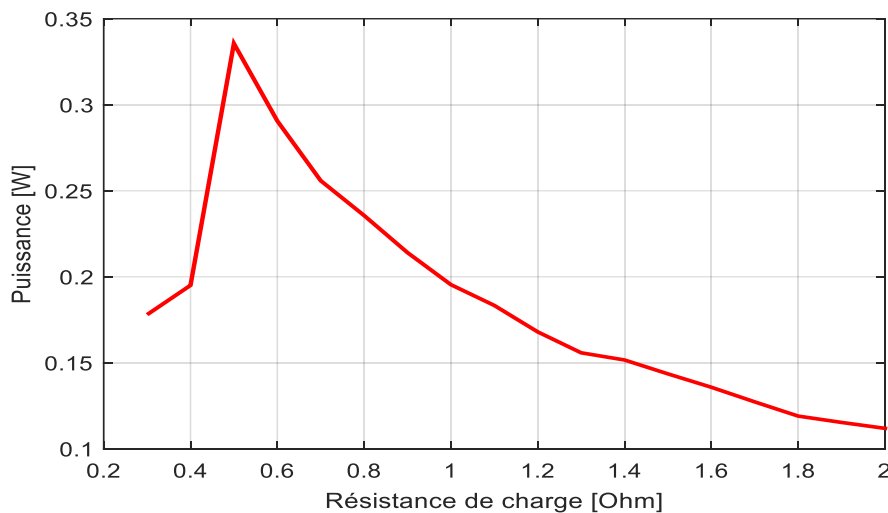


Fig.III.12 la variation de la puissance en fonction de la résistance de charge

Pour comprendre et vérifier la fréquence de résonance du système, la courbe de la puissance est tracée à la Fig.III.11 en fonction des fréquences, avec la même charge R. La fréquence de résonance se situe à 9 Hz, ce qui signifie qu'elle est située dans la plage de

fréquence attendue. Pour le même système, on fait varier le nombre de spires. On obtient les résultats montrés sur la figure. Le nombre de spire a une grande influence sur la puissance.

Pour identifier la résistance de charge optimale pour ce système, on propose de dessiner la puissance récupérée par celui-ci en effectuant une variation de charge résistive. La Fig.III.12 fournit tout d'abord les résultats associés à une variation de charge résistive sur le prototype. L'influence de la résistance a également été évaluée. La simulation révèle l'existence d'une valeur optimale de cette résistance.

III. CONCLUSION

Ce chapitre concerne l'étude du dispositif de conversion dédié à la récupération de l'énergie mécanique, dont la conversion en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. L'outil de modélisation que nous avons mis en place est basé sur une modélisation semi-analytique du récupérateur et est alimenté par des données magnétiques issues d'un logiciel de simulation par MATLAB.

Les résultats obtenus montrent qu'on peut facilement récupérer de l'énergie sous forme de tension induite et cela en tenant compte de plusieurs paramètres. Dans le cadre de la récupération d'énergie. L'étude qui a été faite nous a permis de révéler les avantages de ce type de structures ainsi que de mettre en évidence les paramètres importants pour le calcul du dispositif

Références bibliographiques :

[1] E. Arroyo, « Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes - Dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone » ; Thèse de doctorat, Grenoble, novembre 2012.

[2] D. Mammosser, « Conception et optimisation d'un transducteur électrodynamique pour la récupération d'énergie vibratoire », Thèse de doctorat ; Besançon; Octobre 2010.

[3] B.P. Mann et N.D. Sims, « Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation », Journal of Sound and Vibration, Vol. 319, Issues 1-2), pp. 515-530, January 2009.

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude nous avons exposé un état de l'art sur la récupération d'énergie. Nous avons expliqué bien les besoins liés à la récupération de l'énergie ainsi que la notion d'autonomie. Puis nous avons mis en évidence les caractéristiques des microsystemes et la possibilité grâce à leur faible consommation de les alimenter en récupérant l'énergie ambiante. Ceci implique la conception de récupérateur intégrant une source, un système de conversion et de stockage.

Parmi toutes les sources d'énergie récupérable, les vibrations mécaniques sont une des plus étudiées et utilisées à l'heure actuelle. L'objectif de ce projet est de proposer un modèle mathématique pour la modélisation du dispositif de conversion dédié à la récupération de l'énergie mécanique, dont la conversion en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. Le modèle nous permet de développer la force à vide de l'actionneur en fonction de la position, force qui correspond à la raideur magnétique du récupérateur d'énergie. Elle nous permet aussi de proposer le flux perçu par les bobines en fonction de la position et du courant qui les traverse. Le transducteur électromagnétique proposé dans le troisième chapitre est constitué d'un aimant en translation au travers de deux bobines multicouches. Cette forme de générateur a été étudiée de nombreuses fois dans la littérature, et son intérêt pour la conversion des stimulations basses-fréquences (inférieures à 50 Hz) a été démontré. La force de répulsion magnétique est cependant délicate à modéliser, et son caractère non-linéaire rend la réponse fréquentielle du système plus sensible aux caractéristiques de la stimulation d'entrée. Dans ce sens, une approche semi-analytique est proposée pour calculer la répulsion magnétique entre deux aimants permanents cylindriques. Nous avons considéré un système horizontal (sans force de gravité) soumis à une excitation sinusoïdale $i(t) = A \sin(2\pi f t)$. Le récupérateur d'énergie a été placé sur un pot vibrant.

L'outil de modélisation que nous avons mis en place est basé sur une modélisation semi analytique du récupérateur et est alimenté par des données magnétiques issues d'un logiciel de simulation par MATLAB. Les résultats obtenus montrent qu'on peut facilement récupérer de l'énergie sous forme de tension induite et cela en tenant compte de plusieurs paramètres. Dans le cadre de la récupération d'énergie. L'étude qui a été faite nous a permis de révéler les avantages de ce type de structures ainsi que de mettre en évidence les paramètres importants pour le calcul du dispositif

Résumé

Dans ce travail nous avons expliqué bien les besoins liés à la récupération de l'énergie ainsi que la notion d'autonomie. Puis nous avons mis en évidence les caractéristiques des microsystèmes et la possibilité grâce à leur faible consommation de les alimenter en récupérant l'énergie ambiante. Le premier chapitre positionne le contexte de notre étude, en dressant un état de l'art des différents moyens d'alimentation en insistant sur les systèmes de récupération d'énergie. Nous passons en revue les différentes formes d'énergie utilisables et nous présentons une partie de la diversité des moyens de récupération d'énergie. Dans le deuxième chapitre, nous proposons un modèle mathématique pour la modélisation du dispositif de conversion dédié à la récupération de l'énergie mécanique, dont la conversion en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. Le dernier chapitre, un récupérateur de l'énergie cinétique innovant repose sur l'utilisation de l'induction électromagnétique est proposé dans le cadre du présent travail. L'objectif principal de modéliser le système de récupération d'énergie vibratoire en se focalisant sur les récupérateurs constitués d'un transducteur électromagnétique. Nous présentons l'application d'un modèle semi analytique que nous avons mis en place pour l'étude de récupérateur d'énergie. Nous considérons pour cette étude un récupérateur qui alimente une charge résistive.

Abstract

In this work we have clearly explained the needs linked to energy recovery as well as the notion of autonomy. Then we highlighted the characteristics of microsystems and the possibility, thanks to their low consumption, of powering them by recovering ambient energy. The first chapter positions the context of our study, by providing a state of the art of the different means of power supply with an emphasis on energy recovery systems. We review the different forms of energy that can be used and we present some of the diversity of means of energy recovery. In the second chapter, we propose a mathematical model for modeling the conversion device dedicated to the recovery of mechanical energy, the conversion of which into electrical energy is ensured by the movement of a magnet inside a coil. The last chapter, an innovative kinetic energy harvester based on the use of electromagnetic induction is proposed as part of this work. The main objective of modeling the vibration energy harvesting system by focusing on the harvesters made up of an electromagnetic transducer. We present the application of a semi-analytical model that we have implemented for the study of energy harvesters. For this study, we consider a recuperator which supplies a resistive load.

ملخص

لقد شرحنا في هذا العمل بوضوح الاحتياجات المرتبطة باستعادة الطاقة بالإضافة إلى مفهوم الاستقلالية. ثم سلطنا الضوء على خصائص الأنظمة الدقيقة وإمكانية إمدادها بالطاقة عن طريق استعادة الطاقة المحيطة بفضل استهلاكها المنخفض. يعرض الفصل

الأول سياق دراستنا، من خلال توفير أحدث الوسائل المختلفة لإمدادات الطاقة مع التركيز على أنظمة استعادة الطاقة. ونستعرض الأشكال المختلفة للطاقة التي يمكن استخدامها ونعرض بعضًا من تنوع وسائل استعادة الطاقة. وفي الفصل الثاني نقترح نموذج رياضي لنمذجة جهاز التحويل المخصص لاستعادة الطاقة الميكانيكية والتي يتم تحويلها إلى طاقة كهربائية عن طريق حركة مغناطيس داخل ملف. الفصل الأخير طاقة حركية مبتكرة ويقترح الحصاد على أساس استخدام الحث الكهرومغناطيسي كجزء من هذا العمل. الهدف الرئيسي هو نمذجة نظام حصاد الطاقة الاهتزازية من خلال التركيز على الحصادات المكونة من محول كهرومغناطيسي. نقدم تطبيق نموذج شبه تحليلي قمنا بتنفيذه لدراسة حاصدات الطاقة. في هذه الدراسة، نحن نعتبر جهاز استرداد يوفر حملًا مقاومًا