

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin de cycle

Présenté par :

IDIRENE Dimya

MOKRANI Souhila

Pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique Industrielle

Thème

Modélisation, par les circuits électriques couplés,
de la récupération de l'énergie électromécanique
inductive

Encadré par :

Pr. Bachir MAOUCHE

Année universitaire

2018/2019

Remerciements

Nous remercions d'abord « **Dieu** » le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé au cours de notre travail.

Nous tenons à exprimer notre grand respect et notre admiration pour notre promoteur **Pr B.MAUCHE**, on le remercie tout d'abord pour sa contribution à notre formation dans ce domaine.

Nos sincères remerciements d'avoir accepté de nous encadrer et de nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques.

Nos vifs remerciements sont aussi destinés à sa doctorante **IDIR Badea** pour son aide et conseils appréciables.

Nous adressons aussi nos remerciements les plus sincères aux membres de jury, pour avoir accepté de juger et d'examiner notre travail.

Nous remercions aussi tous nos **enseignants** pour leurs efforts tout au long de notre cursus.

Nous voudrions maintenant faire une place particulière à nos **parents** pour leur exprimer notre amour et notre éternelle reconnaissance.

Dédicaces

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

Mon très cher père ***Mokrane***

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

La meilleure de toutes les mères ***Merieme***

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

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

Mon cher frère ***Sofiane*** et ma chère sœur ***Manel***,

A mes amies,

A mon binôme ***Dimya***

A toute la famille ***MOKRANI*** et ***MOKHTARI***,

Souhila

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère, le soleil qui illumine mon existence, à mon plus fort repère, le meilleur des pères.

A mes chers parents pour qui je porte un grand respect, une profonde et éternelle gratitude. Ainsi j'exprime ma reconnaissance pour leur soutien, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de ces années.

Que ce soit pour eux un faible témoignage de ma profonde affection et tendresse.

Que dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Ma sœur

Toute ma famille

Mon binôme

Mes amis

Toutes les personnes qui comptent pour moi.

Dimya

Liste des figures

Figure I.1: Smart Dust de l'université de Berkeley, Californie	17
Figure I.2 : Placement d'un pacemaker dans le corps humain	18
Figure I.3: Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque	21
Figure I.4: Vue schématique d'un module thermoélectrique	22
Figure I.5: Principe de la récupération temporelle de température	23
Figure I.6 : Principe de conversion électromécanique	23
Figure I.7 : Schéma d'un transducteur électromagnétique	26
Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique	27
Figure I.9 : Chaussure dotée d'un générateur électrostatique	29
Figure I.10 : Générateurs piézoélectriques	29
Figure I.11 : Générateur piézoélectrique de Roundy	30
Figure I.12: Densité de puissance des différentes sources d'énergie avant conversion	32
Figure I.13 : Architecture d'un microsystème	33
Figure I.14 : Principe de fonctionnement d'un microsystème	34
<hr/>	
Figure II.1 : Présentation qualitative du phénomène d'induction électromagnétique	40
Figure II.2 : Moments magnétiques atomiques orbital et de spin	42
Figure II.3: Carte de champ magnétique	43
Figure II.4: Moment magnétique d'une boucle de courant d'un aimant	43
Figure II.5: Modèle ampérien d'un aimant permanent	44
Figure II.6 : Représentation relative à la loi de Biot-savart	46
<hr/>	

Figure III.1 : Géométrie du système	50
Figure III.2 : 2D axisymétrique	51
Figure III.3 : Modèle mécanique du dispositif	52
Figure III.4 : Effet mutuel entre deux points quelconques	54
Figure III.5 : Potentiel vecteur magnétique créé par une spire circulaire	55
Figure III.6 : Vue du plan de la spire	57
Figure III.7 : Organigramme du processus des calculs numériques	62
Figure III.8 : Déplacement de l'aimant en fonction du temps	64
Figure III.9 : Vitesse de l'aimant en fonction du temps	65
Figure III.10 : Description géométrique de la bobine	66
Figure III.11 : Tension induite en fonction du déplacement pour les différentes valeurs de a et b (Influence de la largeur)	66
Figure III.12 : Tension induite en fonction du déplacement pour les différentes valeurs de a et b (Influence de la hauteur)	67
Figure III.13 : Tension induite en fonction du déplacement pour les différentes valeurs de l'entrefer	68
Figure III.14 : Tension induite en fonction du déplacement pour différentes valeurs du nombre de spires	69
Figure III.15 : Tension induite en fonction du déplacement pour différentes hauteurs de l'aimant	70
Figure III.16 : Tension induite en fonction du déplacement pour différents rayons du système	71

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison entre la récupération d'énergie 16
macroscopique et microscopique

Tableau I.2 : Puissance disponible en fonction de l'ensoleillement 21

Tableau I.3 : Vibrations ambiantes 25

Tableau I.4: Taux de conversion maximal pour différents types de 30
matériaux piézoélectriques

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des trois types de 31
conversion

Tableau III.1 : Données géométriques et électromagnétiques de 63
l'aimant

Table des matières

Remerciements.....	2
<i>Dédicaces</i>	3
<i>Dédicaces</i>	4
<i>Liste des figures</i>	5
<i>Liste des tableaux</i>	7
<i>Table des matières</i>	8
Introduction générale	11
I. Contexte et applications de la récupération d'énergie.....	13
I.1 Introduction.....	14
I.2 Les enjeux.....	14
I.3 Les besoins	14
I.4 Notion d'autonomie	15
I.5 Concept de la récupération d'énergie	15
I.6 Principales applications de la récupération d'énergie ambiante....	16
I.6.1 L'alimentation des capteurs sans fil.....	16
I.6.2 Applications dans le médicale.....	17
I.6.3 Applications dans le domaine aéronautique	18
I.6.4 Applications dans le domaine du transport urbain	19
I.6.5 Applications dans le milieu industriel.....	19
I.6.6 Applications dans l'habitat	19
I.7 Sources d'énergie et principes de conversion	19
I.7.1 Les sources finies : stockage électrochimique.....	20
I.7.2 Les sources d'énergie potentielles	20
I.7.2.1 Energie rayonnante.....	20
I.7.2.2 Energie thermique	22
I.7.2.3 Energie mécanique.....	23
I.7.3 Formes d'énergie mécanique.....	24
I.7.3.1 Énergie de déformation	24
I.7.3.2 Énergie de vibration.....	24
I.7.4 Techniques de transduction de l'énergie mécanique.....	25
I.7.4.1 Transduction électromagnétique	25

I.7.4.2	Transduction électrostatique.....	27
I.7.4.3	Conversion piézoélectrique.....	29
I.7.5	Caractéristiques des différentes techniques de transduction ..	31
I.8	Comparaison des niveaux de puissance récupérées.....	31
I.9	Stockage de l'énergie.....	32
I.10	Caractéristiques des microsystèmes.....	33
I.11	Conclusion.....	34
II.	Etude électromagnétique.....	36
II.1	Introduction.....	37
II.2	Equations de base de l'électromagnétisme.....	37
II.2.1	Equations de Maxwell.....	37
II.2.2	Lois de comportements des milieux.....	38
II.3	Equations de Maxwell simplifiées en régime quasi-stationnaire ...	39
II.4	Induction électromagnétique.....	40
II.5	Notion du potentiel magnétique vecteur.....	41
II.6	Equation de diffusion généralisée.....	41
II.7	Modèle ampérien d'un aimant permanent.....	42
II.7.1	Moment magnétique.....	42
II.7.2	Aimantation.....	44
II.7.3	Induction et polarisation magnétiques.....	44
II.7.4	Courants de magnétisation équivalents.....	45
II.7.5	Application de la loi de Biot et Savart.....	46
II.8	Méthodes de résolution.....	47
II.8.1	Méthodes analytiques.....	47
II.8.2	Méthodes numériques.....	47
II.8.3	Méthodes semi analytiques.....	47
II.9	Conclusion.....	48
III.	Modèle électromécanique et applications.....	49
III.1	Introduction.....	50
III.2	Modèle géométrique du système.....	50
III.2.1	Vue 3D cylindrique.....	50
III.2.2	Vue 2D axisymétrique.....	51
III.3	Modèle mécanique.....	52

III.4	Modèle électromagnétique	53
III.4.1	Méthode des circuits électriques couplés	53
III.4.2	Expression du potentiel magnétique	55
III.4.3	Expression de l'induction magnétique.....	59
III.4.4	Tension induite	60
III.4.4.1	Variation temporelle du potentiel magnétique	60
III.4.4.2	Variation temporelle de la géométrie	61
III.4.5	Processus des calculs numériques.....	62
III.5	Applications et résultats.....	62
III.5.1	Aimant utilisé.....	62
III.5.2	Grandeurs mécaniques.....	63
III.5.3	Etude de l'influence de la disposition de la bobine	65
III.5.4	Etude de l'influence de l'entrefer	67
III.5.5	Etude du nombre de spires de la bobine	68
III.5.6	Etude de l'influence de la taille de l'aimant	69
III.5.6.1	Etude de la hauteur de l'aimant.....	69
III.5.6.2	Etude du rayon du dispositif.....	70
III.6	Conclusion.....	71
	Conclusion Générale	72
	Références bibliographiques	73

Introduction générale

La récupération d'énergie est un domaine d'activité relativement récent. Elle a pour vocation d'alimenter des appareils électroniques portables ou fixes. Cette récupération est d'autant plus envisageable que les nouvelles technologies d'électroniques sont de plus en plus miniatures et économes en énergie. A cela s'ajoutent les progrès réalisés sur les dispositifs de stockage qui sont indispensables pour suppléer les intermittences ainsi que l'inadéquation production-consommation.

Il n'existe pas dans ce domaine une solution unique capable de s'adapter à tous les environnements caractérisés par les ressources énergétiques différentes. L'énergie récupérée peut provenir de diverses sources et de techniques différentes :

- Mécaniques (vibrations ou déformations, mouvements),
- Thermiques (gradient spatial ou temporel de température d'une machine, d'un être vivant, etc. ...),
- Rayonnement électromagnétique (solaire, lumière artificielle ou ondes hertziennes).

Ces ressources peuvent aussi être complémentaires afin d'améliorer le rendement et de répondre aux besoins actuels.

Le dispositif d'étude est un convertisseur mécano-magnéto-électrique. Il converti le mouvement de l'homme, à travers le mouvement d'un aimant permanent à l'intérieur d'une bobine, en tension électrique exploitable. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre mémoire de fin de cycle.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Dans le premier, nous nous intéresserons au contexte de la récupération d'énergie, ainsi les principales applications de celle-ci. Nous passerons par la suite aux sources ambiantes d'énergie ainsi qu'aux méthodes de récupération de ces dernières.

Le second chapitre sera consacré aux équations de Maxwell, leur simplification et leur application ainsi que l'étude magnétique des aimants.

Le troisième chapitre est axé sur la modélisation et la conception du système en mettant en évidence les différentes formulations et les résultats de modélisation.

Enfin le manuscrit se termine par une conclusion générale contenant les perspectives envisageables dans cette thématique de recherche.

I. Contexte et applications de la récupération d'énergie

I.1 Introduction

Notre environnement est rempli d'énergie inutilisée, si certaines sources telles que le solaire et l'éolien attirent de plus en plus l'attention grâce à leur utilisation pour la production de l'énergie électrique, d'autres sont beaucoup plus discrètes.

Dans ce chapitre, nous présenterons les diverses applications des systèmes de récupération de l'énergie ambiante telles que l'alimentation des capteurs autonomes communicants.

Les procédés de récupération de l'énergie sont multiples, par ailleurs, nous présenterons les principales sources d'énergies ambiantes ainsi que les processus qui permettent de les transformer en énergie électrique et cela dans le but d'alimenter des dispositifs de basse consommation. Nous nous intéresserons plus précisément à la récupération et à la transduction de l'énergie vibratoire.

I.2 Les enjeux

L'alimentation des dispositifs de basse consommation fait objet de plusieurs recherches malgré le progrès des piles et des batteries survenu ces dernières années. Leur utilisation se traduit toujours par une durée de vie limitée ce qui implique un changement ou une recharge périodique. Cela peut être contraignant pour l'utilisateur surtout si les dispositifs à alimenter se trouvent dans des milieux isolés ou difficile d'accès [1].

Nous nous proposons donc d'étudier ici une alternative à l'alimentation de ces objets en récupérant l'énergie ambiante.

I.3 Les besoins

Du civil au militaire, en passant par l'industrie et le spatial, les besoins se font ressentir de plus en plus dans presque tous les domaines.

La récupération d'énergie peut être différente selon l'application souhaitée, il est donc nécessaire de bien déterminer le niveau de puissance de travail avant de spécifier quelle source d'énergie peut être utilisée et quel type de convertisseur peut y être associé [1].

I.4 Notion d'autonomie

Dans le cadre de ce mémoire de fin de cycle, on s'intéresse à l'autonomie en énergie car malgré la diversité des microsystemes, tous possèdent les mêmes caractéristiques [2] :

- La taille ;
- La durée de vie ;
- L'adaptation à l'environnement extérieur.

Les microsystemes sont habituellement alimentés par des batteries mais celles-ci ne répondent plus aux exigences de l'environnement intelligent, leur capacité est limitée en poids et en volume. Ceci explique l'intérêt des recherches effectuées afin de rendre autonomes en énergie les microsystemes et cela en récupérant l'énergie ambiante.

I.5 Concept de la récupération d'énergie

La notion de récupération d'énergie ("energy scavenging" ou "energy harvesting" en Anglais) définit le processus qui permet de transformer une énergie ambiante en énergie électrique exploitable [2] [3].

La récupération d'énergie est une approche assez récente qui a pris son essor après l'an 2000, elle est motivée par le désir de suppression des câbles.

Son principe est de récolter via une unité génératrice appropriée, une source d'énergie ambiante.

Selon le niveau de tension employé et l'application visée, la récupération d'énergie se fait à l'échelle macroscopique ou microscopique comme illustré sur le tableau (I.1), néanmoins les deux visent à alimenter un réseau ou un dispositif [2].

Tableau I.1 : Comparaison entre la récupération d'énergie macroscopique et microscopique

Echelle	Source d'énergie	Solutions	Objectifs
Macroscopique	Sources d'énergie renouvelable (solaire, vent, géothermie, etc.)	Solutions de gestion d'énergie	Réduire la dépendance au pétrole
Microscopique	Sources d'énergie de l'environnement (vibrations, chaleur du corps humain, etc.)	Solutions faible consommation	Obtenir des systèmes "perpétuels"

I.6 Principales applications de la récupération d'énergie ambiante

I.6.1 L'alimentation des capteurs sans fil

Il existe plusieurs types de capteurs selon l'application souhaitée et les conditions ambiantes à surveiller telles que :

- La température ;
- L'humidité ;
- Le mouvement ;
- La détection de présence ...etc.

Les problèmes aux quels sont confrontés les réseaux de capteurs sans fil sont la maintenance et l'alimentation, les piles et les batteries ne répondent plus au marché de l'environnement intelligent et cela malgré leur amélioration conséquente. Celles ci ne stockent qu'une quantité d'énergie fixe et pour augmenter l'énergie procurée, il est nécessaire d'augmenter le volume de la batterie.

Une bonne illustration est l'image du projet « *Smart Dust* » sur la figure (I.1) :

La poussière intelligente, qui est un réseau sans fil de minuscules systèmes micro-électromécaniques de robots ou de dispositifs permettant de mesurer les vibrations, lumières ou températures.

Ces systèmes peuvent être mis en communication avec un serveur ou des systèmes d'analyse via un réseau d'information sans fil.

Les parties électroniques de traitement de données et de télécommunications ainsi que la taille des nœuds de capteurs sans fil sont miniaturisées.

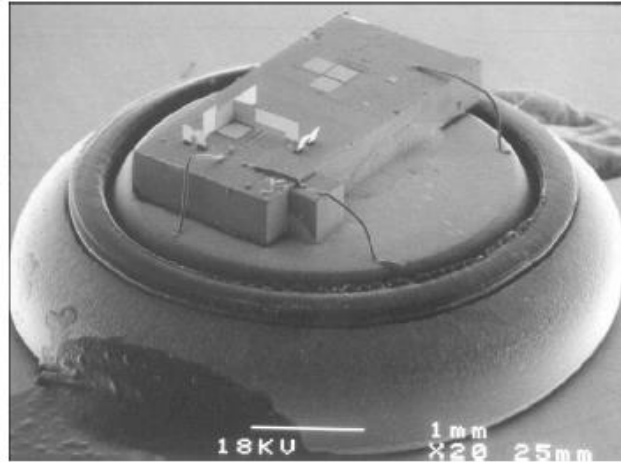


Figure I.1: Smart Dust de l'université de Berkeley, Californie

On constate que le réservoir d'énergie est le composant qui prend une place considérable comparé au reste du dispositif, il est donc évident que c'est l'élément à améliorer et cela en envisageant l'alimentation à partir d'une source ambiante.

Du fait des progrès qui ont été faits par rapport à l'architecture de l'électronique de traitement et de gestion de la puissance pour réduire la consommation électrique, la durée de vie des capteurs augmente et donc la maintenance aussi [4].

I.6.2 Applications dans le médicale

Le concept de récupération d'énergie prend de plus en plus d'ampleur dans le domaine médicale. Des dispositifs de diagnostic peuvent être embarqués directement sur la personne dans le but de mesurer la pression sanguine, de réguler le taux d'insuline, ou de contrôler les battements cardiaques par l'implantation d'un pacemaker figure(I.2).

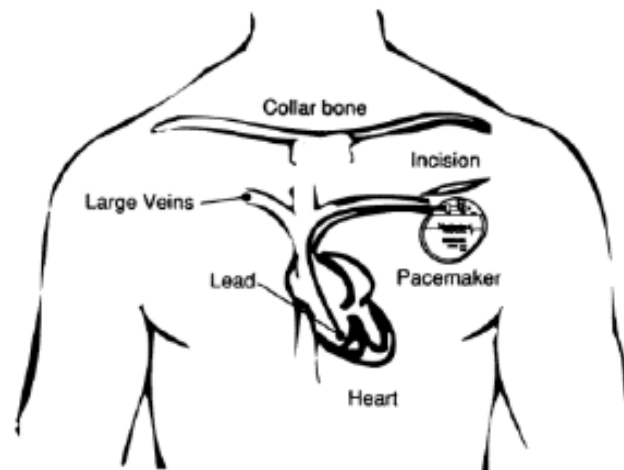


Figure I.2 : Placement d'un pacemaker dans le corps humain

Le problème rencontré dans ce genre de dispositif est l'approvisionnement en énergie électrique, qui nécessite généralement une intervention chirurgicale pour le changement ou la recharge des batteries.

Pour alimenter ces pacemakers, la récupération d'énergie vibratoire est de loin la meilleure alternative [3].

I.6.3 Applications dans le domaine aéronautique

Afin de faciliter la conduite des avions et d'améliorer la sécurité de ses équipements et utilisateurs, plusieurs paramètres doivent être contrôlés tels que :

- La vitesse : dont la mesure est d'une importance capitale ;
- La température : pour prévenir contre les incendies et l'augmentation de température de n'importe quel équipement ;
- L'accélération : la mesure d'une accélération anormale peut être une indication de défaillance.

Les fonctions électroniques de l'information pour l'aide à la gestion de l'avion sont rassemblées sous l'acronyme HUMS '*Health and Usage Monitoring Systems*' surveillent en permanence ces paramètres. Il est nécessaire d'avoir une source d'énergie inépuisable pour assurer la continuité de ce service et éviter toute contrainte liée au câblage, les systèmes de récupération d'énergie répondent à cette problématique [3] [4].

I.6.4 Applications dans le domaine du transport urbain

L'application la plus utilisée dans le domaine du transport est les capteurs de pression dans les pneumatiques appelé TPMS (Tire Pressure Monitoring Systems) qui détectent la vitesse de rotation des roues et déterminent si une roue tourne plus vite que les autres c'est que le pneumatique est dégonflé.

L'utilisation des systèmes de récupération d'énergie ambiante dans les véhicules permet d'alimenter les capteurs sans nécessité de câblage [3] [4].

I.6.5 Applications dans le milieu industriel

L'utilisation des capteurs de vitesse ou de flux magnétique implantés dans les machines tournantes est fréquent dans l'industrie, cela dans le but de prévenir des pannes et donc d'assurer la continuité de service [3] [4].

L'endroit d'implantation de ces capteurs étant hostile et inaccessible, il est plus judicieux d'utiliser des systèmes de récupération de l'énergie ambiante en particulier vibratoire.

I.6.6 Applications dans l'habitat

La récupération de l'énergie prend une place considérable dans le domaine de l'habitat et ceci dans le but d'assurer l'autonomie des différents capteurs utilisés et aussi d'éviter le câblage.

I.7 Sources d'énergie et principes de conversion

Les sources d'énergie que nous pouvons trouver dans l'environnement sont multiples, il est possible de les classer en deux catégories : les sources finies (chimiques) et les sources infinies (ambiantes).

Ces sources d'énergie peuvent être exploitées chacune séparément mais il est souvent privilégié d'utiliser au moins deux de ces sources afin d'assurer la permanence.

Dans ce qui suit nous allons détailler chacune de ces sources.

I.7.1 Les sources finies : stockage électrochimique

C'est l'énergie disponible dans l'environnement. Elle peut être récupérée soit [1] :

- Sous forme électrique par la réalisation d'une pile (par l'ajout d'électrodes par exemple) ;
- Sous une forme intermédiaire (mécanique et/ou thermique) si cette énergie est de type élément combustible.

I.7.2 Les sources d'énergie potentielles

I.7.2.1 Energie rayonnante

Notre environnement regorge d'ondes électromagnétiques de différentes natures. Pour chaque type de rayonnement il existe un système pour le transformer en énergie électrique exploitable.

A. Rayonnement solaire

Le rayonnement naturel issu du soleil demeure la source d'énergie la plus abondante dans la nature.

La récupération de cette énergie est possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques composées d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Ce matériau comporte une jonction P-N figure (I.3) auprès de la quelle se crée une zone de charges d'espace (une zone dépourvue de charges électriques). Un champ électrique interne se crée alors suite à la présence de charges de signes opposés de part et d'autre.

Lorsqu'un photon en provenance du soleil arrive sur la surface de la zone dopée négatif (N), il arrache des électrons aux atomes de silicium.

Ces électrons sont alors balayés par le champ électrique présent dans la zone de charge d'espace et sont capables de fournir un courant à une charge électrique connectée à la jonction. On obtient alors un générateur électrique dont la tension à vide se situe autour de 0.6V [3] [5].

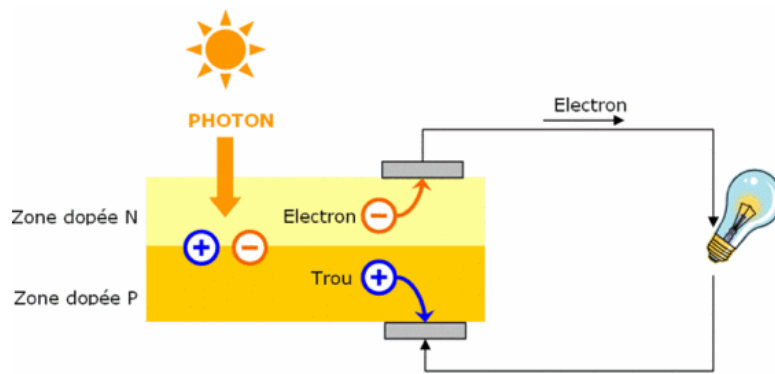


Figure I.3: Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque

L'énergie récupérable grâce au soleil varie en fonction de l'ensoleillement, le tableau (I.2) récapitule la puissance théoriquement obtenue grâce au soleil dans différents lieux communs [5].

Tableau I.2 : Puissance disponible en fonction de l'ensoleillement

Ensoleillement	Puissance récupérable (W/m ²)
Plein soleil	1000
Soleil voilé	500
Ciel nuageux	50 à 200
A l'intérieur – à proximité d'une fenêtre	4 à 20
A l'intérieur – éclairage artificiel	1 à 15
A l'intérieur – Bureau	5
Nuit	0

B. Rayonnement infrarouge

Ce type de rayonnement est moins présent, il est émis par des sources très chaudes (Supérieur à 800k). Le principe de conversion est le même que celui du rayonnement solaire mais à partir de cellules photovoltaïques adaptées aux longueurs d'ondes de ce rayonnement.

Ce principe est appelé conversion thermo-photovoltaïque car l'énergie thermique est d'abord transformée en rayonnement infrarouge puis en électricité [2][5].

C- Ondes radiofréquence-hertziennes-antennes

C'est l'énergie issue des ondes radiofréquences (les appareils de télécommunication, les appareils électroménagers et les lignes haute tension). L'énergie récupérable décroît rapidement avec l'augmentation de la distance source-récepteur et avec la diminution de la taille du récepteur (récupérateur d'énergie) [3].

I.7.2.2 Energie thermique

Le principe est de récupérer l'énergie du flux thermique créée par une différence de température. Deux approches sont utilisées :

- **Gradient spatial**

La récupération de l'énergie thermique est basée sur un gradient spatial de température ; c'est-à-dire la différence qui existe entre deux zones, l'une froide et l'autre chaude. L'effet thermoélectrique Seebeck est utilisé, son principe est de créer une tension aux bornes de deux matériaux joints lorsque ceux-ci sont soumis à une différence de température.

La génération de l'électricité à partir de l'énergie thermique se fait à partir de modules thermoélectriques : des jonctions P et N jointes par un matériau conducteur, celles-ci sont connectées en série électriquement et en parallèle thermiquement, comme illustré sur la figure (I.4) [3] [4] [6].

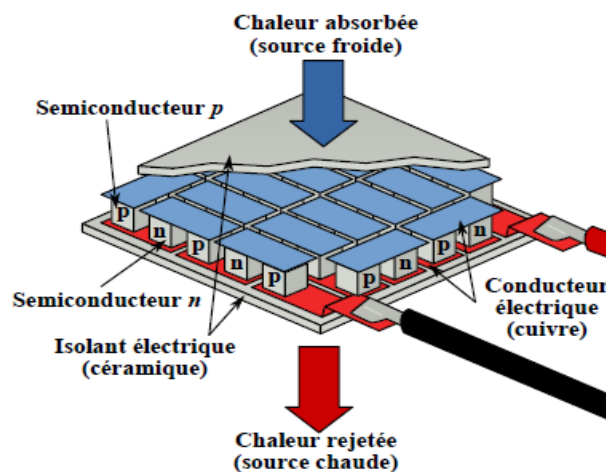


Figure I.4: Vue schématique d'un module thermoélectrique

L'inconvénient de ce type de générateur est la difficulté à avoir un écart de température important sur de petites dimensions, ce qui réduit l'énergie générée. Cela nécessite le développement de nouveaux matériaux avec de meilleures propriétés thermoélectriques pour fonctionner même lorsque la différence est inférieure à la dizaine de degrés [6].

- **Gradient temporel**

Cette approche est moins utilisée que la précédente. Elle consiste à utiliser des variations temporelles de température d'un même matériau, c'est-à-dire de sa variation entre deux instants t_1 et t_2 [6].

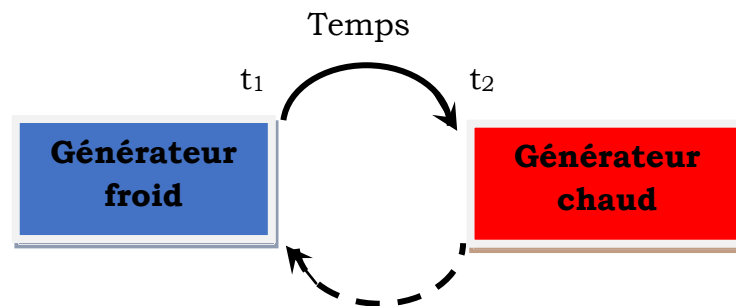


Figure I.5: Principe de la récupération temporelle de température

I.7.2.3 Energie mécanique

La récupération d'énergie mécanique peut revêtir diverses formes : notre environnement est sans cesse soumis à des vibrations, des forces de pressions ou encore des flux d'airs ou de liquides.

Il est possible grâce à des mécanismes dédiés de transformer cette énergie en une énergie électrique utile, dont la structure est représentée sur la figure (I.6) [7].



Figure I.6 : Principe de conversion électromécanique

I.7.3 Formes d'énergie mécanique

I.7.3.1 Énergie de déformation

Lorsqu'un objet est soumis à une force telle qu'une pression ou un poids, il se déforme. Parmi les sources existantes dans notre environnement on trouve :

- La semelle d'une chaussure lorsque l'on marche ;
- La déformation d'objets liée à un échauffement ;
- L'interrupteur soumis à une pression...etc.

Le corps humain est aussi une source intéressante de déformation mécanique dont la récupération permet l'alimentation des implants dans celui-ci ou des applications à usage quotidien. Cette conversion est généralement réalisée par des matériaux dits électro-actifs tels que :

Les polymères électro actifs qui sont des matériaux de type composés organiques caractérisés par leur couplage électromécanique qui leur permet de changer de forme ou de dimension sous une contrainte électrique et vice-versa.

Les matériaux piézoélectriques qui sont des matériaux qui ont la propriété de se déformer sous un champ électrique et de générer un champ électrique sous une déformation mécanique [3].

I.7.3.2 Énergie de vibration

Les vibrations mécaniques sont omniprésentes dans notre environnement. Elles vont des faibles vibrations des murs et du sol à proximité de machines tournantes aux très fortes sollicitations des pièces mécaniques en contact avec un moteur d'avion.

Ces vibrations font l'objet de grandes variations de fréquences et d'amplitudes. Le tableau(I.3) donne quelques exemples de sources sur lesquelles des vibrations peuvent être récupérées [3][5].

Tableau I.3 : Vibrations ambiantes

Sources de vibrations	Accélération (m/s²)	Fréquence (Hz)
Socle d'une machine 3 axes	10	70
Robot de cuisine	6.4	121
Parquet avec des personnes qui marchent dessus	1.3	385
Fenêtre donnant sur l'extérieur à coté d'une rue bruyante	0.7	100
Machine à laver	0.5	109
Réfrigérateur	0.1	240

I.7.4 Techniques de transduction de l'énergie mécanique

La conversion de l'énergie mécanique vibratoire en énergie électrique est assurée par plusieurs types de transducteurs électromécaniques qui varient suivant l'application désirée. Ces transducteurs sont basés sur trois techniques : électromagnétique, électrostatique et piézoélectrique.

I.7.4.1 Transduction électromagnétique

Un transducteur électromagnétique est basé sur la variation d'un aimant par rapport à une ou plusieurs bobines grâce aux vibrations mécaniques. 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 [8] :

$$U = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I.1})$$

Avec $\phi(wb)$ le flux magnétique et N le nombre de tours de la bobine.

Il existe deux moyens simples pour mettre en œuvre ce phénomène : soit on utilise les vibrations mécaniques pour déplacer un aimant à

l'intérieur d'une bobine figure (I.7), ou l'inverse, c'est-à-dire une bobine qui se déplace par rapport à un aimant fixe.

Pour la récupération de l'énergie vibratoire, nous privilégions la configuration qui permet de faire déplacer un aimant à l'intérieur d'une bobine, car l'aimant joue à la fois le rôle d'une source de champ magnétique et de la masse sismique [3].

Les problèmes rencontrés pour ce type de conversion résident dans la difficulté de miniaturiser ces systèmes car la densité volumique d'énergie diminue avec la taille du système [5] [9].

La figure (I.7) présente un transducteur électromagnétique développé en 2015 par Qian Zhang et Al permettant de produire de l'énergie électrique à partir du mouvement du corps humain.

Il est composé d'une bobine flexible et d'un réseau d'aimant 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 [10].

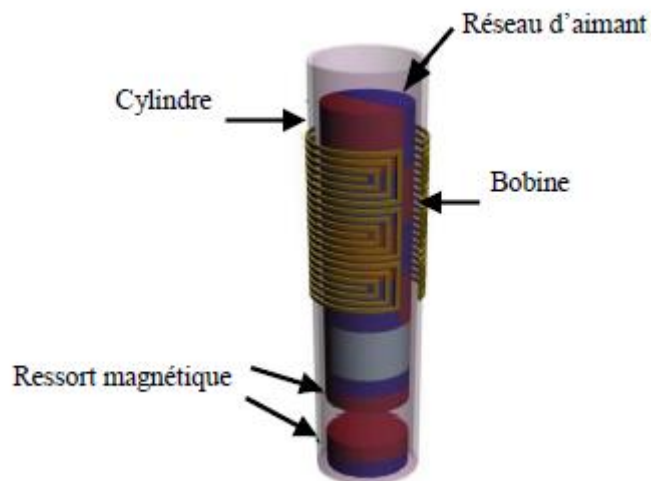


Figure I.7 : Schéma d'un transducteur électromagnétique

I.7.4.2 Transduction électrostatique

Les micros générateurs électrostatiques sont composés d'un condensateur dont les électrodes sont mobiles. Ces générateurs nécessitent d'être rechargés avant de pouvoir produire de l'énergie [11].

Le principe est de placer une énergie vibratoire ambiante dans le but de diminuer la capacité du micro générateur en augmentant la distance d_0 entre les électrodes conformément à la relation suivante :

$$C = \frac{\varepsilon S}{d_0} \quad (I.2)$$

Avec :

$S(m^2)$: Surface des armatures ;

$\varepsilon(F/m)$: Permittivité du diélectrique.

Deux cas peuvent être envisagés [11] :

- Diminuer la capacité à tension constante pour générer des charges électriques ;
- La tension et l'énergie électrostatique augmentent à charge constante.

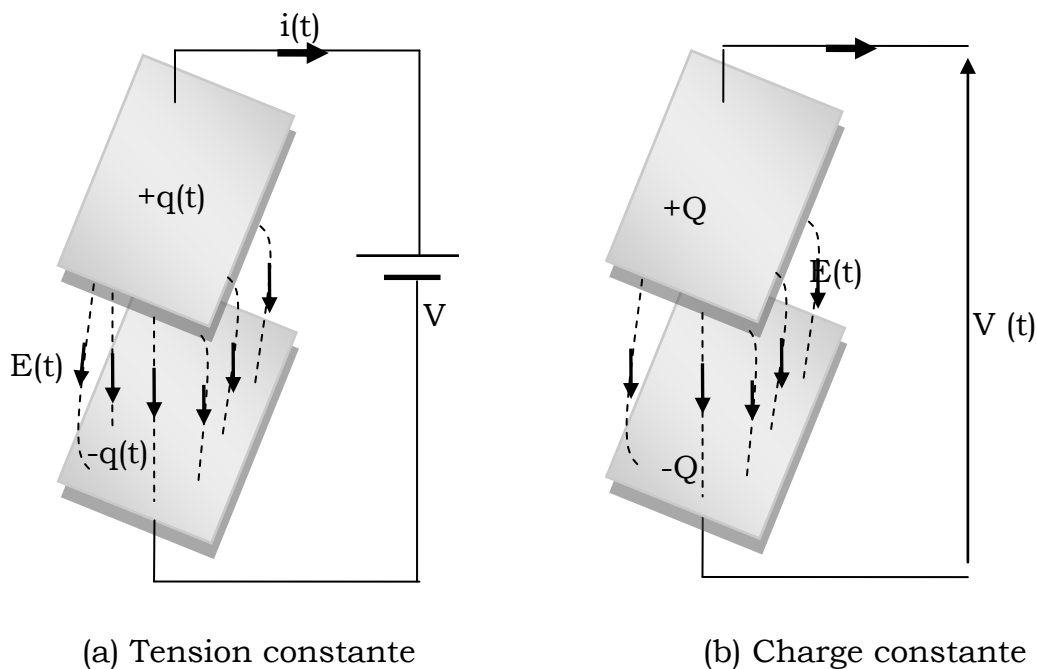


Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique

Un générateur électrostatique est donc basé sur la variation de force électrique entre deux armatures d'un condensateur en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre.

L'équation suivante exprime l'énergie électrique récupérable :

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

Avec :

$V(v)$: La tension aux bornes de la structure.

C_{\min} et $C_{\max}(F)$: Les capacités maximales et minimales de la structure.

Les générateurs électrostatiques sont de très faible puissance, de quelques dizaines à quelques centaines de microwatts. Ces niveaux de puissance sont cependant suffisants pour alimenter des dispositifs évolués.

Il est néanmoins difficile d'obtenir de grands écarts de capacité, de plus une source de tension extérieure est nécessaire afin d'amorcer le fonctionnement du récupérateur.

Quelques applications font exceptions, comme par exemple la chaussure électrostatique représentée sur la figure (I.9).

Cette chaussure a été développée par le SRI (un institut de recherche international indépendant). Elle est capable de produire une puissance de 800mW pour un rythme de marche de deux pas par seconde.

La capacité de ce générateur est réalisée par un élastomère diélectrique compressible. La marche de l'utilisateur actionne un soufflet qui exerce une pression sur l'élastomère entraînant sa compression et donc la variation de capacité du générateur nécessaire à la conversion mécano-électrique.

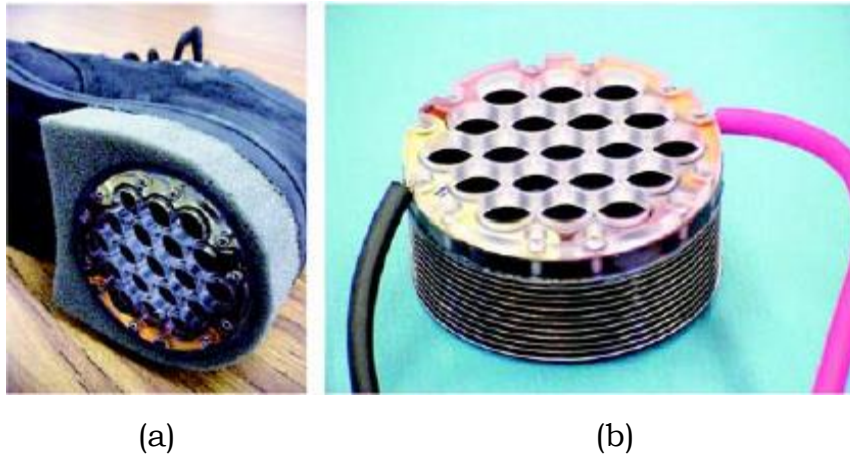
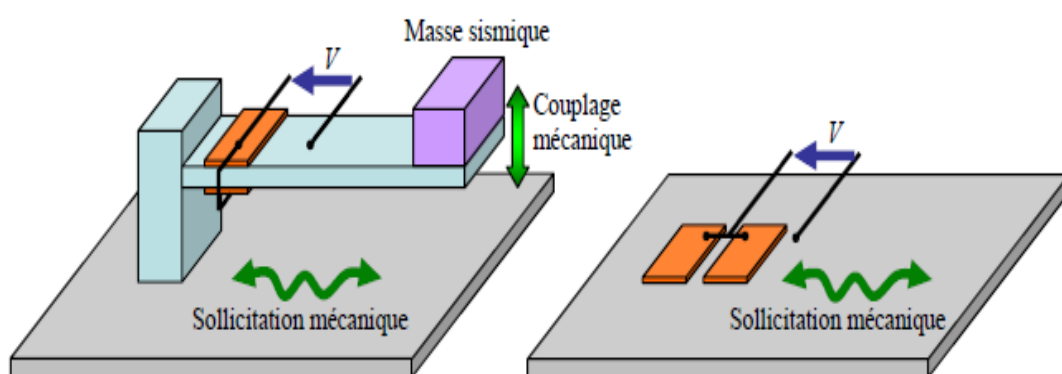


Figure I.9 : Chaussure dotée d'un générateur électrostatique :
 (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur montrant le soufflet (dessous) et le cadre maintenant le diélectrique (dessus)

I.7.4.3 Conversion piézoélectrique

Les micros générateurs piézoélectriques sont basés sur l'effet direct de la piézoélectricité. L'application d'une contrainte mécanique sur un matériau piézoélectrique électrodé entraîne l'apparition d'une tension entre les électrodes.

Il existe deux types de générateurs piézoélectriques illustrés sur la figure (I.10) :



(a) Conversion par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique

(b) Conversion directe

Figure I.10 : Générateurs piézoélectriques

Le premier cas (a) : Ces micros générateurs piézoélectriques sont constitués d'un système mécanique présentant une fréquence de

résonnance qui couple le micro générateur aux vibrations ambiantes. Le système est composé d'une poutre sur laquelle sont collés des inserts piézoélectriques qui assurent la conversion mécano-électrique et une masse sismique qui ajuste la fréquence de résonnance.

Le deuxième cas (b) : Les éléments piézoélectriques sont directement collés sur la structure vibrante [11].

Le Tableau (I.4) résume les ordres de grandeurs des rendements maximums en fonction du type de matériaux piézoélectriques [11].

Tableau I.4: Taux de conversion maximal pour différents types de matériaux piézoélectriques

Type du matériau	Taux de conversion max
polyfluorures de vinylidène (PVDF)	1-5%
Céramiques de PZT	35-50%
Monocristaux	70-90%

Un exemple d'un générateur piézoélectrique est l'un de ceux proposé par Roundy dans sa thèse figure (I.11). La puissance dissipée sur une charge résistive optimale pour une excitation à 120 Hz et sous une accélération de 2.5 m/s^2 , est de $200 \mu\text{W}$ [12].

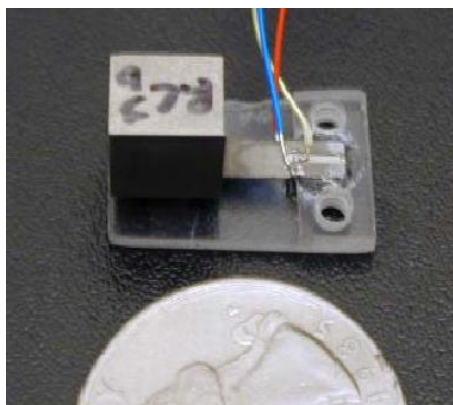


Figure I.11 : Générateur piézoélectrique de Roundy

I.7.5 Caractéristiques des différentes techniques de transduction

Les différents transducteurs cités précédemment présentent des avantages et des inconvénients. Le tableau (I.5) résume les caractéristiques de chaque technique de transduction.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des trois types de conversion

	Inconvénients	Avantages
Transduction électromagnétique	<ul style="list-style-type: none"> - Tension de sortie faible - Taille importante et difficulté de miniaturisation - Matériaux chers 	<ul style="list-style-type: none"> - Courant de sortie élevé - Durée de vie élevée - Absence de source de tension extérieure
Transduction électrostatique	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'une source de tension extérieure - Influence des capacités parasites - Faible capacité 	<ul style="list-style-type: none"> - Tension de sortie élevée - Possibilité de miniaturisation
Transduction Piézoélectrique	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé (matériaux) - Sensibilité à la température - Durée de vie limitée - Faible rendement par les matériaux en couche mince 	<ul style="list-style-type: none"> - Tension de sortie élevée - Absence de source de tension extérieure - Configuration compacte

I.8 Comparaison des niveaux de puissance récupérées

La figure (I.12) récapitule les niveaux de densité de puissance récupérés par différentes sources d'énergie disponibles dans l'environnement [10].

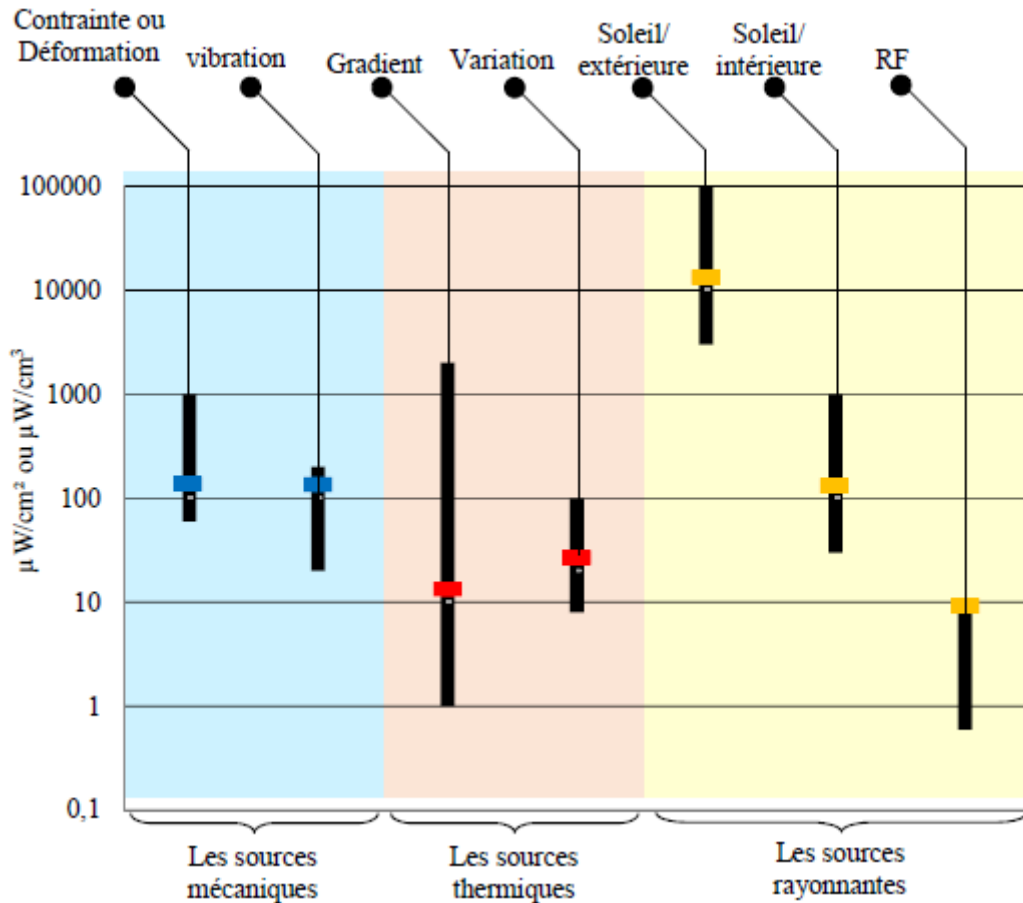


Figure I.12: Densité de puissance des différentes sources d'énergie avant conversion

I.9 Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est une problématique importante dans de nombreuses applications. L'énergie électrique peut être stockée de différentes manières [2] :

- Sous forme électrostatique, en accumulant des charges électriques dans un ou plusieurs condensateurs.
- Sous forme électromagnétique, en établissant un courant électrique dans une bobine autour d'un circuit magnétique, de telle sorte que l'énergie nécessaire pour mettre en mouvement les charges électriques puisse être restituée par induction.
- Sous forme électrochimique, qui présente la caractéristique intéressante de fournir une tension qui dépend peu de sa charge ou du courant débité.

Il existe différents moyens de stockage, selon les besoins [2]:

- Les condensateurs ;
- Les inductances ;
- Les volants d'inertie.

I.10 Caractéristiques des microsystemes

Un microsysteme est un systeme intelligent miniaturisé intégrant des capteurs et/ou des actionneurs associés à une unité de traitement et de contrôle.

Les microsystemes interagissent avec leur environnement par le biais de capteurs et d'actionneurs et communiquent, échangent des données avec une base de contrôle ou avec d'autres microsystemes proches.

De plus, ils peuvent agir directement sur le milieu dans lequel ils se trouvent et/ou transmettre ces données à d'autres systemes qui agiront à leurs tours [2][3].

L'architecture et le principe des microsystemes sont illustrés sur les figures (I.13) et (I.14) [2].

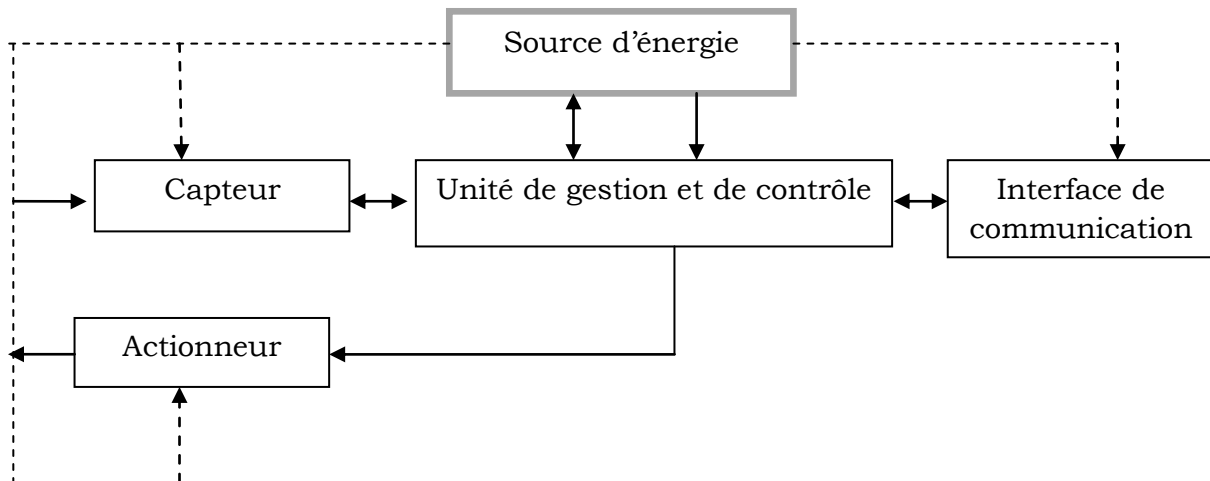


Figure I.13 : Architecture d'un microsysteme

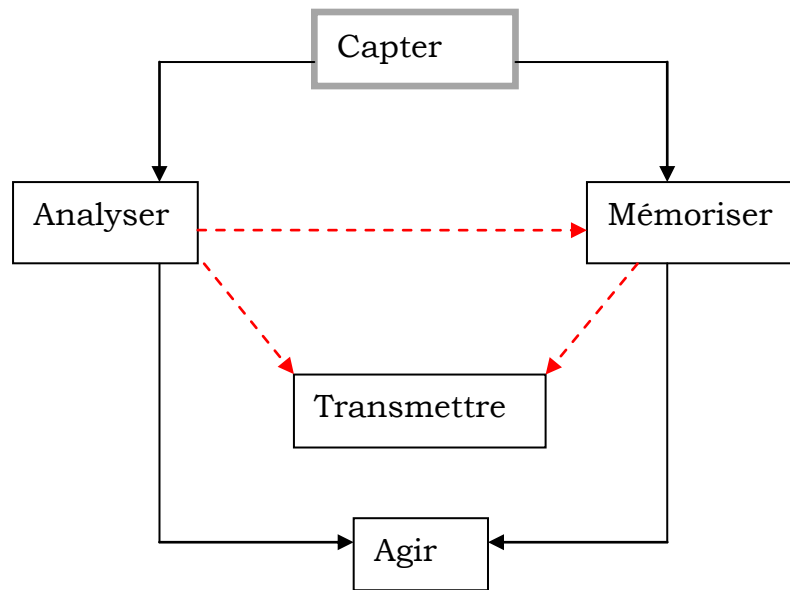


Figure I.14 : Principe de fonctionnement d'un microsystème

Les microsystèmes sont constitués d'une grande diversité de composants pouvant être assemblés de différentes façons. Le choix de ces modes d'assemblage se fait durant la phase de conception.

De plus, les microsystèmes apportent une contrainte supplémentaire de part leur caractère pluridisciplinaire car ils intègrent différentes technologies liées à l'électronique, la mécanique, l'énergétique, l'automatique, etc. [1] [2].

Cette hétérogénéité est une source de complexité. En effet, le couplage des divers domaines implique des difficultés de représentation et de caractérisation.

I.11 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.

II. Etude électromagnétique

II.1 Introduction

L'objectif du chapitre présent est de résumer les équations mathématiques de base qui décrivent les phénomènes électromagnétiques intervenant dans la modélisation du dispositif.

Nous présentons la simplification de ces équations dans le cas des régimes quasi stationnaire, ainsi que les équations de diffusions généralisées. Ce chapitre sera particulièrement axé sur la modélisation mathématique d'un aimant permanent.

Nous exposerons ensuite brièvement les méthodes de résolution utilisées dans ce type de problème.

II.2 Equations de base de l'électromagnétisme

II.2.1 Equations de Maxwell

Tous les phénomènes électromagnétiques sont régis par les quatre équations aux dérivées partielles de maxwell qui doivent être adaptées à la région ou on veut les résoudre, et par les relations du milieu considéré. Elles sont exprimées sous la forme suivante :

- Equation de Maxwell-Ampère :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

- Equation de Maxwell Faraday :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

- Equation de Maxwell Thomson :

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

- Equation de Maxwell-Gauss

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$E(\text{V}/\text{m})$: Champ électrique

$B(\text{T})$: Induction magnétique

$H(\text{A}/\text{m})$: Champ magnétique

$J(\text{A}/\text{m}^2)$: Densité de courant

$\rho(\text{C}/\text{m}^3)$: Densité de charge volumique

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}(\text{C}/\text{m}^3)$: Densité de courant de déplacement

II.2.2 Lois de comportements des milieux

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, on rajoute les lois de comportement des milieux aux quels on les appliquera :

- Dans le vide :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

- Dans un milieu diélectrique

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

- Dans un milieu magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.8})$$

- Dans un milieu conducteur

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

Avec

$\varepsilon(\text{F}/\text{m})$: Permittivité électrique

$\varepsilon_0(\text{F}/\text{m})$: Permittivité électrique du vide $\frac{10^{-9}}{36\pi}$

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré

II.3 Equations de Maxwell simplifiées en régime quasi-stationnaire

Les équations précédentes décrivent globalement les phénomènes électromagnétiques et s'appliquent à des états quelconques.

Dans la pratique, en fonction du domaine d'utilisation on simplifie ces équations dans le but d'avoir des modèles plus simples.

L'équation (II.1) s'écrit, compte tenu des équations (II.6) et (II.8) :

$$r\vec{\partial}t\vec{B} = \mu_0 \left(\sigma\vec{E} + \varepsilon_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.10})$$

On note T la période d'évolution caractéristique de la distribution (D) (sa période d'évolution).

On peut comparer le courant de conduction avec le courant de déplacement :

$$\frac{|\sigma\vec{E}|}{\left| \varepsilon_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \right|} \approx \frac{\sigma E}{\varepsilon_0 \frac{E}{T}} = \frac{\sigma T}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.11})$$

Pour le cuivre de conductivité $\sigma = 6 \times 10^7 \Omega^{-1}.m^{-1}$, ce rapport est de l'ordre de $10^{18}T$ (avec T en s) (soit une fréquence de 10GHZ).

$$\frac{|\sigma\vec{E}|}{\left| \varepsilon_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \right|} \approx 10^{18} \quad (\text{II.12})$$

Par conséquent, pour les régimes d'évolution justifiant l'emploi de la loi d'Ohm, le courant de déplacement est, au sein d'un conducteur ohmique, négligeable devant le courant de conduction.

On définit alors les équations comme suit :

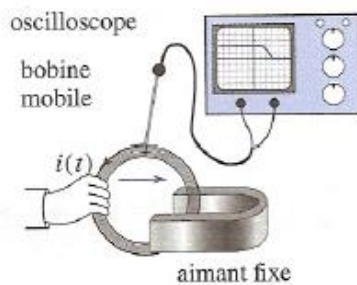
$$\begin{cases} \vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} & \text{(a)} \\ \vec{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} & \text{(b)} \\ \text{div}\vec{B} = 0 & \text{(c)} \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

Dans notre étude l'équation (II.4) ne sera pas exploitée.

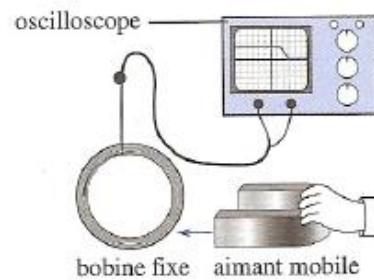
II.4 Induction électromagnétique

Un circuit se déplaçant dans un champ magnétique permanent peut se comporter comme une génératrice électrocinétique : il est le siège d'un phénomène d'induction. On parle alors d'induction de Lorentz.

Lorsqu'un circuit fixe est soumis à un champ magnétique variable, il est encore le siège d'un phénomène d'induction. On parle alors de phénomène d'induction de Neumann.



- a. La bobine mobile (déplacée par l'observateur) se comporte comme un générateur.



- b. La bobine fixe se comporte comme un générateur si l'aimant se déplace.

Figure II.1 : Présentation qualitative du phénomène d'induction électromagnétique

Dans le 1^{er} cas, le déplacement du circuit à vitesse \vec{v}_e (dans le référentiel du laboratoire) dans le champ permanent \vec{B}_0 de l'aimant entraîne l'apparition d'une force magnétique $q\vec{v}_e \wedge \vec{B}_0$ susceptible de faire circuler les charges de conduction du circuit.

Dans le 2ème cas, le circuit fixe dans le référentiel du laboratoire, voit apparaître un champ magnétique variable créé par l'aimant. L'équation de Maxwell-Faraday (II.13.b) montre l'apparition d'un champ électrique induit capable de mettre en mouvement les charges du circuit.

II.5 Notion du potentiel magnétique vecteur

Les équations de Maxwell constituent un système différentiel du premier ordre dont le nombre de variables est important. L'utilisation du potentiel magnétique vecteur permet de réduire le nombre d'inconnus.

D'après l'équation :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.14})$$

Le vecteur \vec{A} n'est pas unique car le rotationnel d'un gradient de toute fonction scalaire est nul ($\text{rot}(\text{grad}\phi) = 0$). Donc tout vecteur $\vec{A} + \text{grad}\phi$ satisfait la relation (II.3). Pour assurer l'unicité de \vec{A} , il suffit de lui imposer la condition de jauge, telle que :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.15})$$

Selon les équations (II.2) et (II.14) on déduit :

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.16})$$

Du fait que le rotationnel d'un gradient de toute fonction scalaire V est nul, que le champ \vec{E} dérive dans le temps du potentiel vecteur magnétique \vec{A} et dans l'espace du potentiel scalaire électrique V , tel que :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} V \quad (\text{II.17})$$

II.6 Equation de diffusion généralisée

En combinant les équations (II.13.a) et (II.14), nous obtenons :

$$\text{rot}(\text{rot} \vec{A}) = \mu_0 \vec{J} \quad (\text{II.18})$$

La densité de courant se déduit de l'équation (II.17) et (II.9) :

$$\vec{J} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial T} + g \vec{r} \operatorname{grad} V \right) \quad (\text{II.19})$$

On obtient alors l'équation de diffusion généralisée du potentiel vecteur magnétique :

$$r \operatorname{rot}(r \operatorname{rot} \vec{A}) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu_0 \sigma g \vec{r} \operatorname{grad} V \quad (\text{II.20})$$

II.7 Modèle ampérien d'un aimant permanent

Le physicien français Andrés Marie Ampère propose l'existence d'un courant à l'intérieur d'un barreau aimanté qui serait à l'origine de la production du champ magnétique, ces courants portent le nom de courants d'Ampère [13].

II.7.1 Moment magnétique

Le magnétisme d'un corps est dû essentiellement au mouvement orbital autour du noyau et au mouvement des électrons autour d'eux même comme l'illustre la figure (II.2).

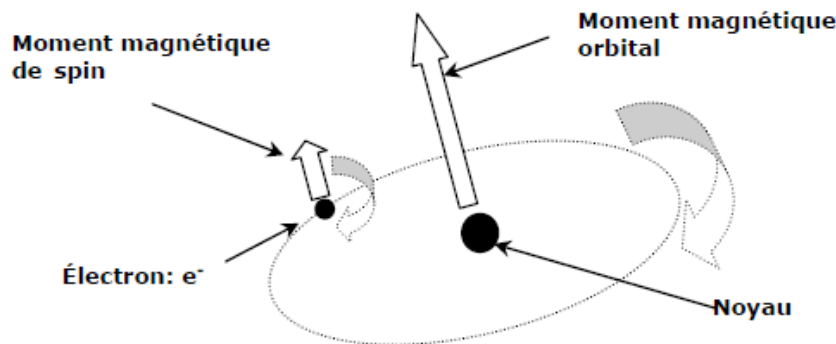


Figure II.2 : Moments magnétiques atomiques orbital et de spin

La rotation de l'électron sur lui-même, Spin, provoque un moment magnétique \vec{m}_s . La rotation de l'électron e^- , charge électrique négative, autour du noyau provoque un moment magnétique \vec{m}_0 .

Dans un atome, ces différents moments magnétiques se composent pour donner le moment magnétique atomique

$$\vec{m} = \sum \vec{m}_0 + \vec{m}_s \quad (\text{II.21})$$

Les lignes de champ magnétique d'un aimant sont similaires à celles créées par une spire de surface S et parcouru par un courant I .

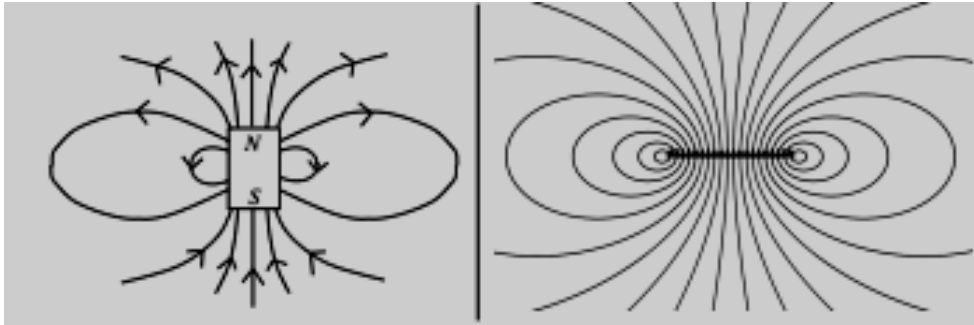


Figure II.3: Carte de champ magnétique

Dans cette approximation on assimile l'aimant et la spire à des dipôles magnétiques dont le moment magnétique est donné par l'équation suivante :

$$\vec{m} = I \cdot \vec{S} \quad (\text{II.22})$$

$\vec{m}(\text{A.m}^2)$: Moment magnétique

Le moment magnétique est une grandeur vectorielle caractérisant l'intensité d'une source magnétique.

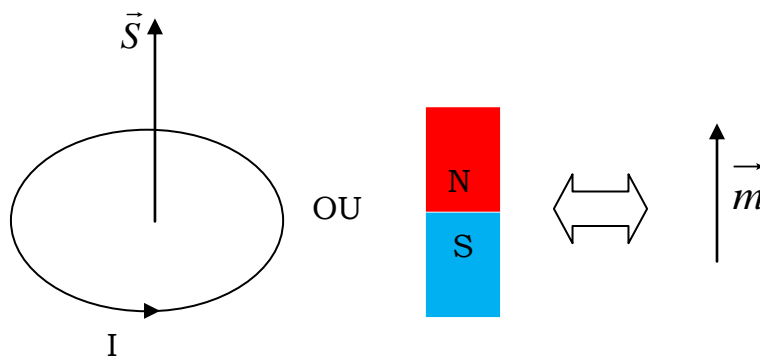


Figure II.4: Moment magnétique d'une boucle de courant d'un aimant

Le moment magnétique d'une bobine de N boucle est la somme des moments magnétiques de chaque boucle.

$$\vec{m}_b = N \vec{I} \cdot \vec{S} \quad (\text{II.23})$$

II.7.2 Aimantation

L'aimantation est une distribution longitudinale de courants ampériens fictifs comme le montre la figure (II.5) [14] :

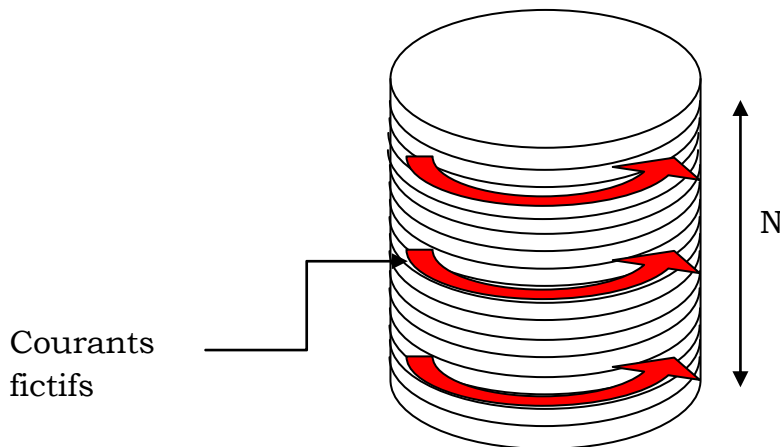


Figure II.5: Modèle ampérien d'un aimant permanent

Un aimant permanent est caractérisé par une grandeur locale appelée vecteur aimantation ou plus simplement l'aimantation. Elle quantifie aussi un milieu magnétique excité par un champ magnétique extérieur.

L'aimantation est le moment magnétique par unité de volume :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\tau} \quad (\text{II.24})$$

\vec{M} (A/m): Aimantation magnétique

II.7.3 Induction et polarisation magnétiques

Dans la matière aimantée, l'induction magnétique est donnée par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{P} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\vec{P} = \mu_0 \vec{M} \quad (\text{II.26})$$

Où :

$\vec{P}(T)$: Polarisation magnétique

En remplaçant la relation (II.26) dans (II.25), on aura :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{II.27})$$

On écrit alors :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad (\text{II.28})$$

II.7.4 Courants de magnétisation équivalents

L'aimant est composé d'une matière aimantée et non conductrice d'électricité. De ce fait, la densité de courant est nulle, l'équation (II.13.a) s'écrit :

$$\text{rot} \vec{H} = 0 \quad (\text{II.29})$$

En introduisant le rotationnel dans l'équation (II.27), on aura :

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \text{rot} \vec{M} \quad (\text{II.30})$$

Par identification de l'équation (II.13.a) à l'équation (II.30), on constate que $\text{rot} \vec{M}$ est analogue à une densité de courant surfacique:

$$\vec{J}_{eq} = \text{rot} \vec{M} \quad (\text{II.31})$$

Dans le cas des courants linéiques, la densité de courant équivalente est donnée par :

$$J_{eq}^l \vec{e}_\theta = M \vec{e}_z \times n \vec{e}_r \quad (\text{II.32})$$

Où :

$J_{eq} \left(\frac{A}{m^2} \right)$: Densité de courant surfacique

$J_{eq}^l \left(\frac{A}{m} \right)$: Densité de courant linéique

II.7.5 Application de la loi de Biot et Savart

L'approche ampérienne s'attache au calcul de l'induction magnétique B . Elle est basée sur l'application de la loi de Biot et Savart illustré par la figure (II.6).

Un conducteur électrique parcouru par un courant électrique I , dont la circulation engendre une excitation en tous points de l'espace. En un point p , situé à une distance ρ d'un élément de courant $d\vec{l}$ du circuit, ce vecteur d'excitation magnétique est défini par l'expression vectorielle suivante :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{n}}{\rho^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{J d\tau \times \vec{n}}{\rho^2} \quad (\text{II.33})$$

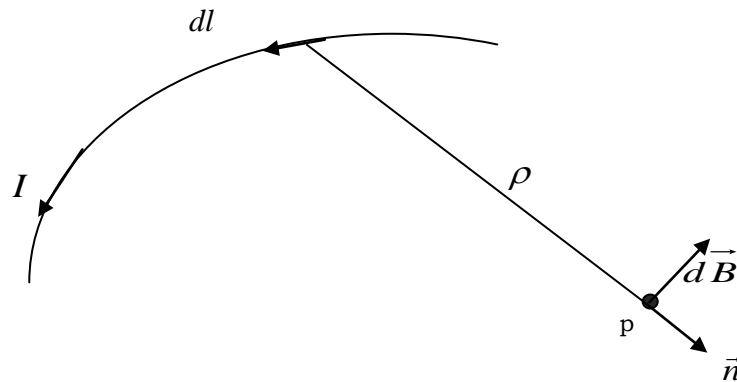


Figure II.6 : Représentation relative à la loi de Biot-savart

On peut alors appliquer la loi de Biot et Savart au potentiel vecteur magnétique afin de décrire l'effet magnétique des aimants :

$$d\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{J_{eq} d\tau \times \vec{e}_\theta}{\rho} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{M} d\tau \times \vec{e}_\theta}{\rho^2} \quad (\text{II.34})$$

II.8 Méthodes de résolution

Les problèmes de l'électromagnétisme abordés au préalable dans ce chapitre sont très compliqués à résoudre, la résolution par voie numérique approximé peut être un remède. Ci après une brève présentation des fréquentes méthodes de résolutions utilisées

II.8.1 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont utilisées pour la modélisation des configurations ayant des structures électromagnétiques et géométriques simples qui sont respectivement linéaires et unidimensionnelles ou bidimensionnelles. On peut trouver des solutions analytiques à partir de la méthode de séparation de variables qui consiste à chercher une solution à l'équation différentielle de diffusion sous la forme d'une fonction à variables séparées. On obtient alors un système d'équations différentielles ordinaires [15] [16].

II.8.2 Méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent de résoudre le modèle électromagnétique dans un domaine d'étude bidimensionnel ou tridimensionnel. On distingue [15] [16]. :

- La méthode intégrale ;
- La méthode des différences finies ;
- La méthode des volumes finis ;
- La méthode des éléments finis.

II.8.3 Méthodes semi analytiques

Ce sont des méthodes qui utilisent simultanément des expressions analytiques et des résolutions numériques, elles ont été élaborés afin d'alléger le temps de simulation et d'avoir des résultats proches de la réalité.

Dans notre cas, nous utiliserons la méthode des circuits couplés dont le principe est le suivant :

La méthode des circuits électriques couplés est basée sur l'utilisation de la loi de Biot et Savart appliquée aux grandeurs électromagnétiques. Elle ne résout pas directement l'équation de diffusion (II.20), son principe est basé sur la résolution de l'équation de Poisson (II.18) qui définit la liaison entre le champ magnétique \vec{H} et sa source \vec{J} et la combinaison de la solution obtenue avec l'équation (II.17), ou ce même champ est à son tour source de cette densité de courant [15].

II.9 Conclusion

En se limitant aux caractéristiques électromagnétiques linéaires et en utilisant l'approximation des états quasi-stationnaires, nous avons réduit les équations de Maxwell à deux équations exprimant le couplage entre le potentiel vecteur magnétique et la densité de courant électrique.

Afin de résoudre ces équations, nous utiliserons une configuration bidimensionnelle et une méthode semi analytique qui fera objet du chapitre suivant.

III. Modèle électromécanique et applications

III.1 Introduction

Ce chapitre est axé sur le modèle de la conception dont le fonctionnement se résume au mouvement d'un aimant permanent à l'intérieure d'une bobine induisant une force électromotrice.

Le modèle peut porter le nom d'un convertisseur mécano-magnéto-électrique.

Nous développons ainsi les formulations aboutissant à la modélisation par la méthode des circuits couplés puis nous implantons cette modélisation dans un environnement MATLAB qui permet d'extraire les résultats.

III.2 Modèle géométrique du système

III.2.1 Vue 3D cylindrique

Le modèle étudié est représenté sur la figure ci-dessous :

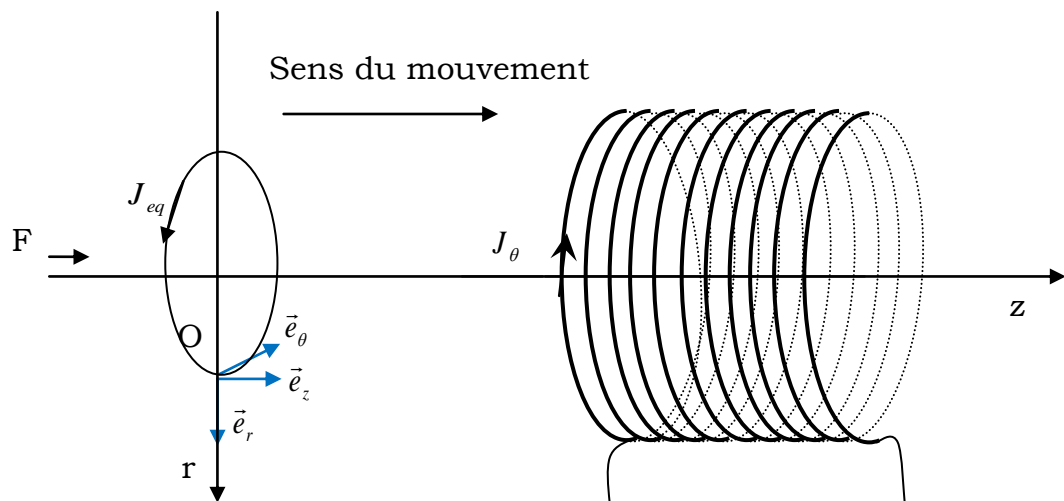


Figure III.1 : Géométrie du système

Un aimant situé à un point O, assimilé à une spire de surface S parcourue par un courant J_{eq} est soumis à une force extérieure qui l'entraîne suivant l'axe (Oz). Les spires de la bobine sont représentées par leurs coordonnées cylindriques (r, θ, z) . Le mouvement de l'aimant induit une tension au niveau de la bobine.

III.2.2 Vue 2D axisymétrique

La figure(III.1) montre une configuration cylindrique, en négligeant l'hélicité des spires inductrices, ce système possède une symétrie de révolution le problème devient alors bidimensionnelle comme l'illustre la figure (III.2).

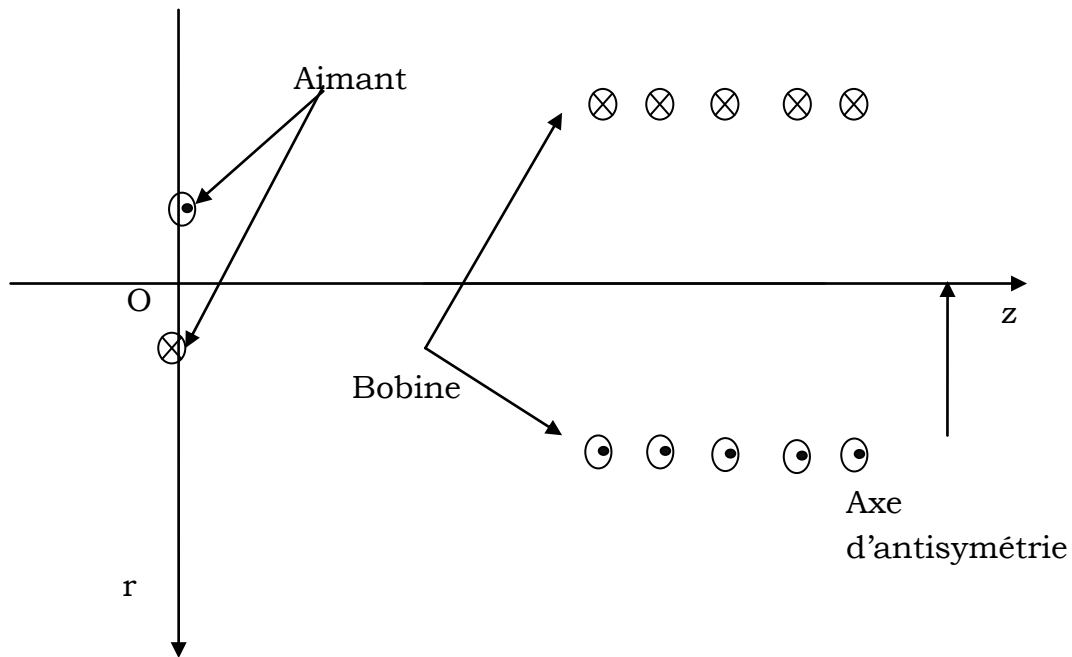


Figure III.2 : 2D axisymétrique

La densité de courant induite est dirigée suivant l'angle θ du système de coordonnées cylindriques, le champ magnétique \vec{B} possède quant à lui deux composantes, l'une suivant la direction (Or) et l'autre suivant (Oz) imposant ainsi pour le potentiel vecteur une seule composante azimutale A_θ qui ne dépend que de r et z ce qui explique l'utilisation du potentiel vecteur magnétique comme variable d'état d'où :

$$\begin{cases} \vec{B} = B_r(r, z)\vec{e}_r + B_z(r, z)\vec{e}_z & \text{(a)} \\ \vec{A} = A_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & \text{(b)} \\ \vec{J} = J_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & \text{(c)} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

A et J sont considérés dans la suite de l'étude comme étant des scalaires qui sont respectivement A_θ et J_θ

III.3 Modèle mécanique

Le mouvement de l'aimant à l'intérieur de la bobine, comme montré sur la figure (III.3), doit reproduire le mouvement de l'homme. La force engendrée peut-être de la forme :

$$F(t) = \begin{cases} a & \text{si } 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & \text{si } t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

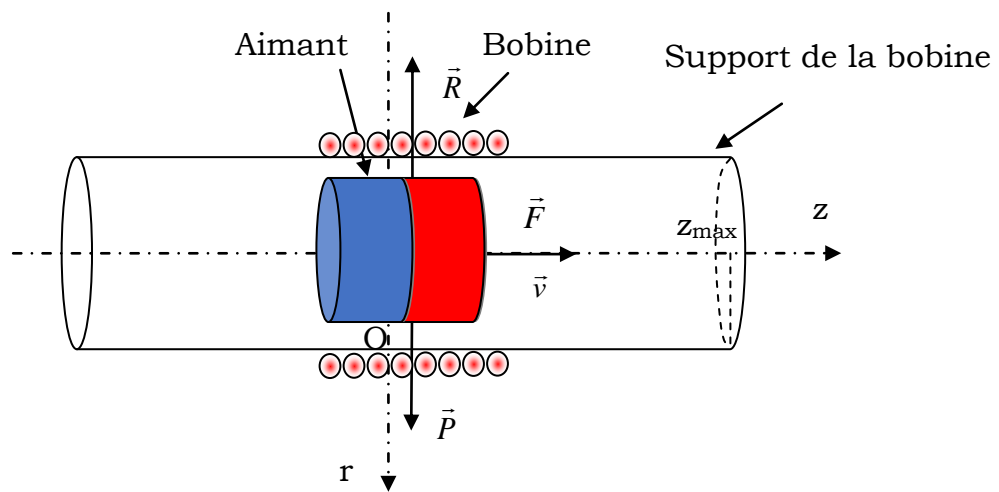


Figure III.3 : Modèle mécanique du dispositif

Le bilan des forces agissant sur le mouvement de l'aimant est introduit par l'équation différentielle en appliquant le principe fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{z} \quad (\text{III.3})$$

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\vec{z} \quad (\text{III.4})$$

$\vec{P}(N)$: Force de la pesanteur

$\vec{R}(N)$: Force de réaction

$m(g)$: Masse de l'aimant

$\vec{z}(m/s^2)$ ou (N/kg) : Accélération de l'aimant

Après la projection des forces sur l'axe (Oz) , l'équation (III.4) devient :

$$\begin{cases} F = m\ddot{z}(t) = m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = m \frac{dv(t)}{dt} & (a) \\ v(t) = \frac{dz(t)}{dt} & (b) \end{cases} \quad (III.5)$$

La discrétisation temporelle de l'équation (III.5.a) avec un pas Δt , aboutie à la forme de la vitesse ci-dessous :

$$V(t) = V(t - \Delta t) + \frac{F}{m} \Delta t \quad (III.6)$$

De même, la discrétisation temporelle de l'équation (III.5.b), aboutie à l'expression de la position de l'aimant en fonction du temps :

$$z(t) = z(t - \Delta t) + v(t)\Delta t \quad (III.7)$$

$v\left(\frac{m}{s}\right)$: Vitesse de l'aimant

III.4 Modèle électromagnétique

Le modèle est construit en utilisant la méthode des circuits électriques couplés. C'est une méthode basée sur l'expression analytique de Biot et Savart du potentiel magnétique vecteur associée à la loi d'induction de Faraday.

III.4.1 Méthode des circuits électriques couplés

La manière la plus adaptée pour décrire les phénomènes électromagnétiques est de réduire les équations de Maxwell en un système de deux équations exprimant le potentiel vecteur magnétique et la densité de courant d'une manière couplée.

Le calcul vectoriel en coordonnées cylindriques de symétrie axiale permet d'atteindre le résultat suivant :

$$\begin{cases} \text{div}(gr\vec{a}dA) = -\mu_0 J & \text{(a)} \\ \vec{J} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + gr\vec{a}dV \right) & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

L'effet électromagnétique d'un point q (aimant) en mouvement, sur un point p (bobine) est représenté sur la figure (III.4).

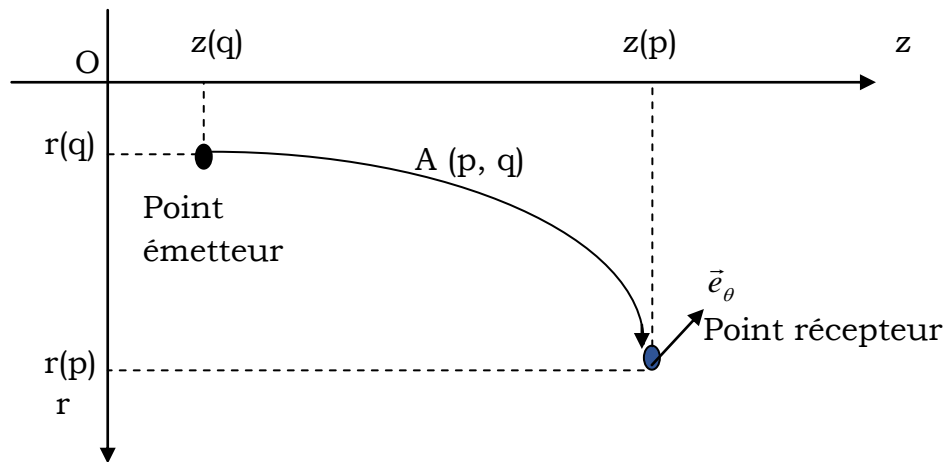


Figure III.4 : Effet mutuel entre deux points quelconques

Cet effet se formalise par les équations de Maxwell simplifiées suivantes :

$$\begin{cases} \text{div}(gr\vec{a}dA(p)) = -\mu_0 J(q) & \text{(a)} \\ \frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p, q)}{dt} + gr\vec{a}dV(p) \cdot \vec{e}_\theta = 0 & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

L'équation (III.9.a) traduit, que la densité de courant $J(q)$ au point q , est la source du potentiel vecteur $A(p, q)$ au point p .

L'équation (III.9.b) définit le phénomène d'induction ; telle que la densité de courant $J(p)$ est induite sous la variation temporelle du potentiel magnétique $A(p, q)$ et spatiale du potentiel $V(p)$. D'où le nom des « grandeurs électromagnétiques couplées » [15] [16].

III.4.2 Expression du potentiel magnétique

Afin de résoudre le système d'équations (III.9), nous cherchons d'abord la solution de l'équation (III.9.a) dans le vide qui sera ensuite injectée dans (III.9.b). Cette dernière formera ainsi le système d'équations à résoudre.

L'équation (III.9.a), appelée équation de Poisson vectoriel, peut être résolue par la transformation de Fourier dont le résultat n'est que l'expression de Biot et Savart du potentiel vecteur magnétique [16] :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \iiint_{\tau} \frac{J(q) d\tau}{|\vec{op} - \vec{oq}|} \quad (\text{III.10})$$

Ce potentiel est en fonction des coordonnées des points P où on calcule le potentiel $A(p)$, et q où est située la densité de courant $J(q)$ source de ce potentiel. Ces deux points peuvent appartenir ou non au même domaine.

La section de la spire $s(q)$ et de contour (c) est parcourue par une intensité de courant $J(q)d\tau$.

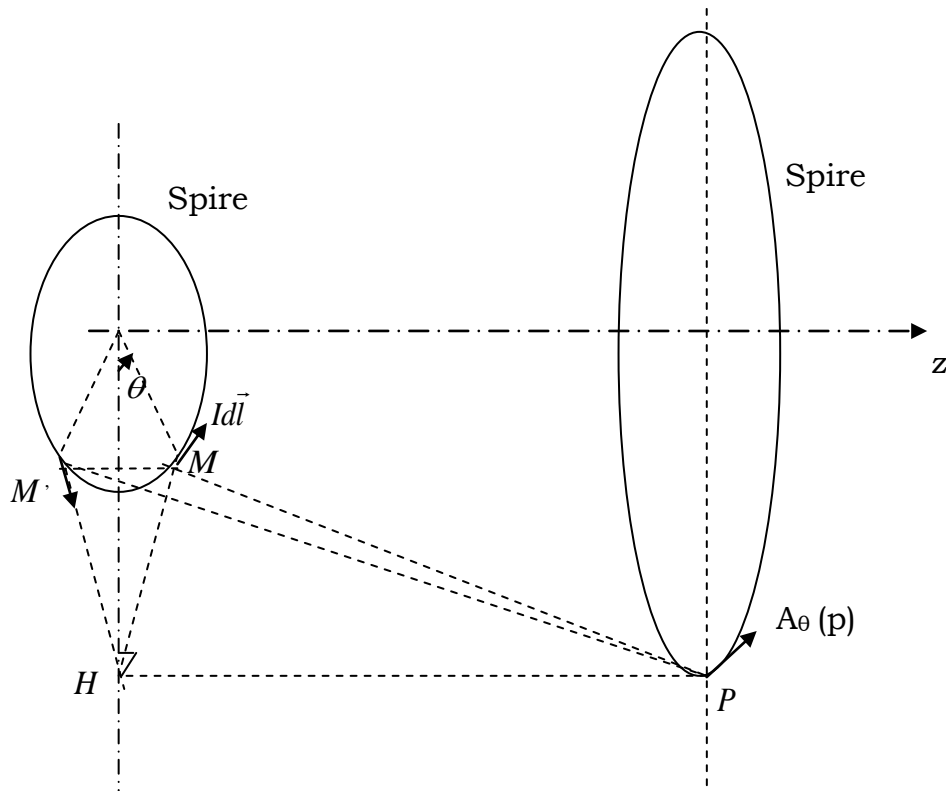


Figure III.5 : Potentiel vecteur magnétique créé par une spire circulaire

On admet par approximation que le courant est constant dans la section de la spire

$$\begin{cases} J(q)d\tau = I(q)dl & (a) \\ I(q) = J(q)s(q) & (b) \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Le courant circule dans la spire (q) sur le contour (c) situé dans le plan xOy à une hauteur $z(q)$, l'équation (III.10) devient :

$$\vec{A}(p, q) = A_\theta(p, q)\vec{e}_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \int_c \frac{\vec{dl}}{|\vec{op} - \vec{oq}|} \quad (\text{III.12})$$

Le point q est représenté par les points M et M' . L'association de $I(q)d\vec{l}$ avec son symétrique $I(q)d\vec{l}'$, revient à considérer un courant $I dy$ porté par l'axe Oy . Ce dernier produit un potentiel vecteur magnétique au point p parallèle à l'axe Oy comme l'illustre la figure (III.6).

L'équation (III.12) devient :

$$A_\theta(p) = A_y(p) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{2I(q)dy}{\|\overline{MP}\|} \quad (\text{III.13})$$

A partir de la figure (III.6), on exprime les paramètres et les variables comme suit :

$$\begin{cases} y = r(q) \sin \theta & (a) \\ dy = r(q) \cos \theta d\theta & (b) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

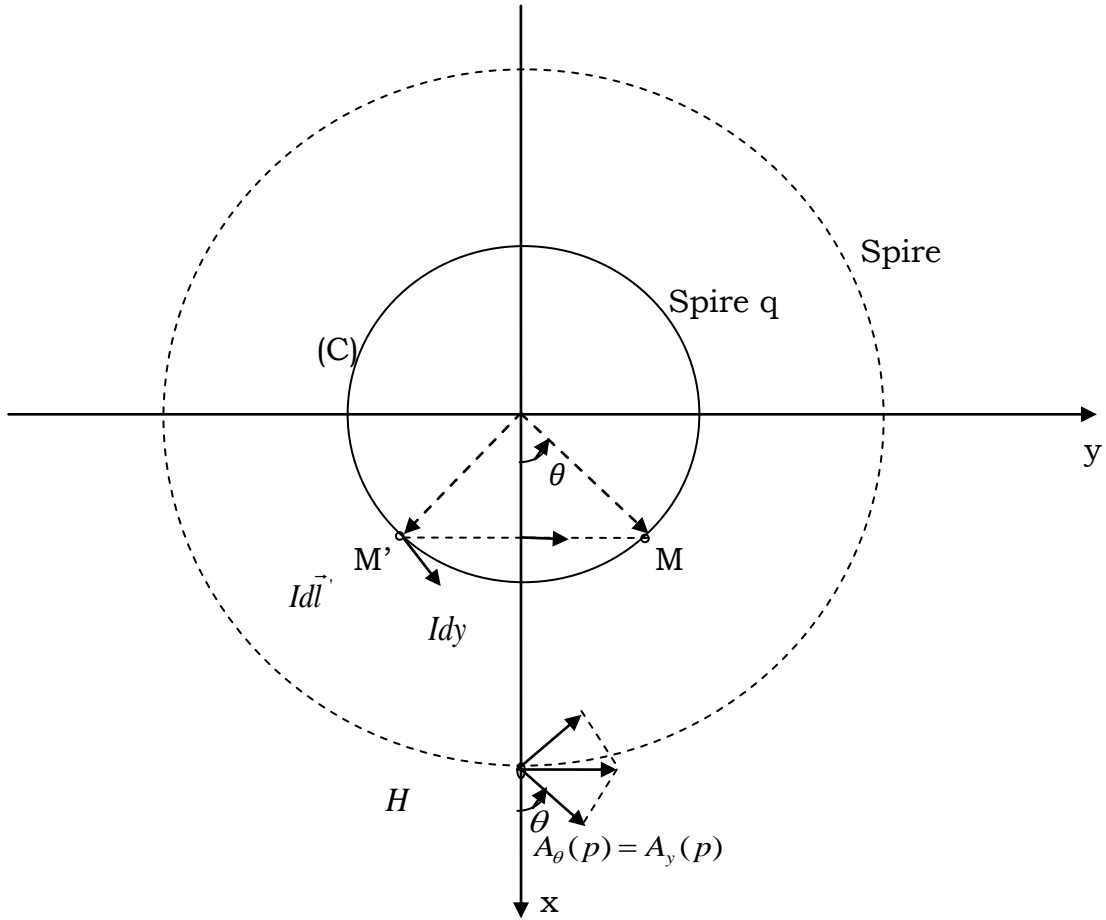


Figure III.6 : Vue du plan de la spire

$$\left\{ \begin{aligned} \|\overrightarrow{MP}\| &= \sqrt{\overline{MH}^2 + [z(p) - z(q)]^2} & (a) \\ \overline{MH}^2 &= (\overline{OH} - \overline{OM})^2 = \overline{OH}^2 + \overline{OM}^2 - 2\|\overline{OM}\|\|\overline{OH}\|\cos\theta & (b) \end{aligned} \right. \quad (\text{III.15})$$

Du fait que les points M et H sont situés respectivement sur les contours des spires q et p , on déduit que :

$$\left\{ \begin{aligned} \|\overline{OM}\| &= r(q) \text{ et } \|\overline{OH}\| = r(p) & (a) \\ \|\overline{MP}\| &= \sqrt{r^2(q) + r^2(p) - 2r(q)r(p)\cos\theta + [z(p) - z(q)]^2} & (b) \end{aligned} \right. \quad (\text{III.16})$$

Après introduction des expressions (III.14.b) et (III.16.a) dans l'expression du potentiel (III.13), on aboutit à :

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r(q) \cos\theta d\theta}{\sqrt{r^2(q) + r^2(p) - 2r(q)r(p)\cos\theta + [z(p) - z(q)]^2}} \quad (\text{III.17})$$

En vue de ramener l'expression (III.17) à une expression composée de fonctions connues, on introduit d'autres paramètres et après le changement de variables suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \pi - 2\varphi \Rightarrow \begin{cases} d\theta = -2d\varphi \\ \cos\theta = 2\sin^2\varphi - 1 \end{cases} \quad (a) \\ k = \sqrt{\frac{4r(p)r(q)}{[r(p)+r(q)]^2 + [z(p)-z(q)]^2}} \quad (b) \end{array} \right. \quad (III.18)$$

On aboutit à l'expression suivante :

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} k \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2\sin^2\varphi - 1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} d\varphi \quad (III.19)$$

En notant que :

$$\frac{k^2 \sin^2\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} - \sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi} \quad (III.20)$$

L'expression (III.19) devient :

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} k \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \left\{ \left(\frac{2}{k^2} - 1 \right) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} - \frac{2}{k^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi} d\varphi \right\} \quad (III.21)$$

En faisant intervenir les fonctions elliptiques de Legendre $E_1(k)$ et $E_2(k)$ respectivement de première et de deuxième espèce données ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} \quad (a) \\ E_2(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi} d\varphi \quad (b) \end{array} \right. \quad (III.22)$$

On obtient finalement une expression du potentiel vecteur magnétique composée de ces fonctions :

$$A_\theta(p, q) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \frac{(2-k^2)E_1(k) - 2E_2(k)}{k} \quad (\text{III.23})$$

En posant :

$$G(k) = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \frac{(2-k^2)E_1(k) - 2E_2(k)}{k} \quad (\text{III.24})$$

L'expression (III.23) devient alors :

$$A_\theta(p, q) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} G[k(p, q)] \quad (\text{III.25})$$

III.4.3 Expression de l'induction magnétique

L'induction magnétique dans le cas d'une configuration axisymétrique s'écrit :

$$\vec{B} = r\vec{\partial}t\vec{A} = -\frac{\partial A}{\partial z}\vec{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial(rA)}{\partial z}\vec{e}_z = B_r\vec{e}_r + B_z\vec{e}_z \quad (\text{III.26})$$

$$\begin{cases} B_r(p, q) = -\frac{\partial A(p, q)}{\partial z} & (a) \\ B_z(p, q) = \frac{1}{r(p)} \frac{\partial\{r(p)A(p, q)\}}{\partial r} = \frac{A(p, q)}{r(p)} + \frac{\partial A(p, q)}{\partial r} & (b) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

En remplaçant l'expression du potentiel vecteur en fonction de $G(p, q)$, nous obtenons :

$$\begin{cases} B_r(p, q) = -\frac{\mu_0}{2\pi} I(q) \frac{\partial G(p, q)}{\partial z} & (a) \\ B_z(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} I(q) \left(\frac{G(p, q)}{r(p)} + \frac{\partial G(p, q)}{\partial r} \right) & (b) \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

On calcule les dérivées de $G[k(p, q)]$ par rapport aux coordonnées et cela en faisant apparaître le paramètre k , tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial G(k)}{\partial r} = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \left(\frac{\partial E(k)}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial r} - \frac{E(k)}{2r^2(p)} \right) \quad (a) \\ \frac{\partial G(k)}{\partial z} = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \frac{\partial E(k)}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial z} \quad (b) \end{array} \right. \quad (\text{III.29})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{k}{2r(p)} - \frac{r(p)+r(q)}{4r(p)r(q)} k^3 \quad (a) \\ \frac{\partial k}{\partial z} = -\frac{z(p)}{4r(p)r(q)} k^3 \quad (b) \end{array} \right. \quad (\text{III.30})$$

$$\frac{dE(k)}{dk} = -\left(1 + \frac{2}{k^2}\right) E_1(k) + \frac{2}{k^2} E_2(k) + \frac{2-k^2}{k} \frac{dE_1(k)}{dk} - \frac{2}{k} \frac{dE_2(k)}{dk} \quad (\text{III.31})$$

En tenant compte des dérivées par rapport à k données par les expressions (III.32) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE_1(k)}{dk} = \frac{E_2(k) - (1-k^2)E_1(k)}{(1-k^2)k} \quad (a) \\ \frac{dE_2(k)}{dk} = \frac{E_2(k) - E_1(k)}{k} \quad (b) \end{array} \right. \quad (\text{III.32})$$

On arrive à :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_r(p, q) = \frac{\mu_0}{8\pi} I(q) \frac{z(p) - z(q)}{r(p)} \frac{k}{\sqrt{r(p)r(q)}} \left[\frac{2-k^2}{1-k^2} E_2(k) - 2E_1(k) \right] \quad (a) \\ B_z(p, q) = \frac{\mu_0}{8\pi} I(q) \frac{k}{\sqrt{r(p)r(q)}} \left[\frac{2 - (1+r(p)/r(q))k^2}{1-k^2} E_2(k) - 2E_1(k) \right] \quad (b) \end{array} \right. \quad (\text{III.33})$$

III.4.4 Tension induite

III.4.4.1 Variation temporelle du potentiel magnétique

Pour établir l'expression de la tension induite, nous exploitons l'équation (III.9.b) dans le cas d'une spire à circuit ouvert (courant nul).

$$\text{grad}V(p) \cdot \vec{e}_\theta = -\frac{dA(p, q)}{dt} \quad (\text{III.34})$$

En coordonnées cylindriques le gradient de la tension est donnée par :

$$gr\vec{a}dV(p) = \frac{\partial V(p)}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial V(p)}{r(p)\partial\theta} \vec{e}_\theta + \frac{\partial V(p)}{\partial z} \vec{e}_z \quad (\text{III.35})$$

Dans le cas axisymétrique l'équation (III.35) devient :

$$gr\vec{a}dV(p) \cdot \vec{e}_\theta = \frac{\partial V(p)}{r(p)\partial\theta} \quad (\text{III.36})$$

Dans le cas de phénomène linéaire, on écrit :

$$gr\vec{a}dV(p) \cdot \vec{e}_\theta = \frac{1}{r(p)} \frac{\int_0^0 dV(p)}{\int_0^{2\pi} d\theta} = \frac{-u(p)}{2\pi r(p)} \quad (\text{III.37})$$

En combinant les équations (III.34) et (III.37), on obtient l'expression de la tension induite :

$$u(p) = 2\pi r(p) \frac{dA(p, q)}{dt} \quad (\text{III.38})$$

III.4.4.2 Variation temporelle de la géométrie

En démarrant de l'équation (III.38), et en tenant compte de l'équation (III.25) et du fait que l'aimant est représenté par un courant constant :

$$\frac{\partial A(p, q)}{\partial t} = \frac{\partial A(p, q)[z(t)]}{\partial t} = \frac{dA(p, q)}{dz} \frac{dz}{dt} \quad (\text{III.39})$$

En tenant compte de l'équation (III.27.a), on obtient :

$$u(t) = -2\pi v(t) B_r(p, q) \quad (\text{III.40})$$

L'équation (III.40) est valable pour une spire. Dans le cas d'une bobine composée de N spires ayant chacune un rayon r_i et soumise à une induction B_{r_i} , la tension totale est donnée par :

$$U_T(t) = 2\pi v(t) \sum_{i=1}^N r_i B_{r_i}[z(t)] \quad (\text{III.41})$$

III.4.5 Processus des calculs numériques

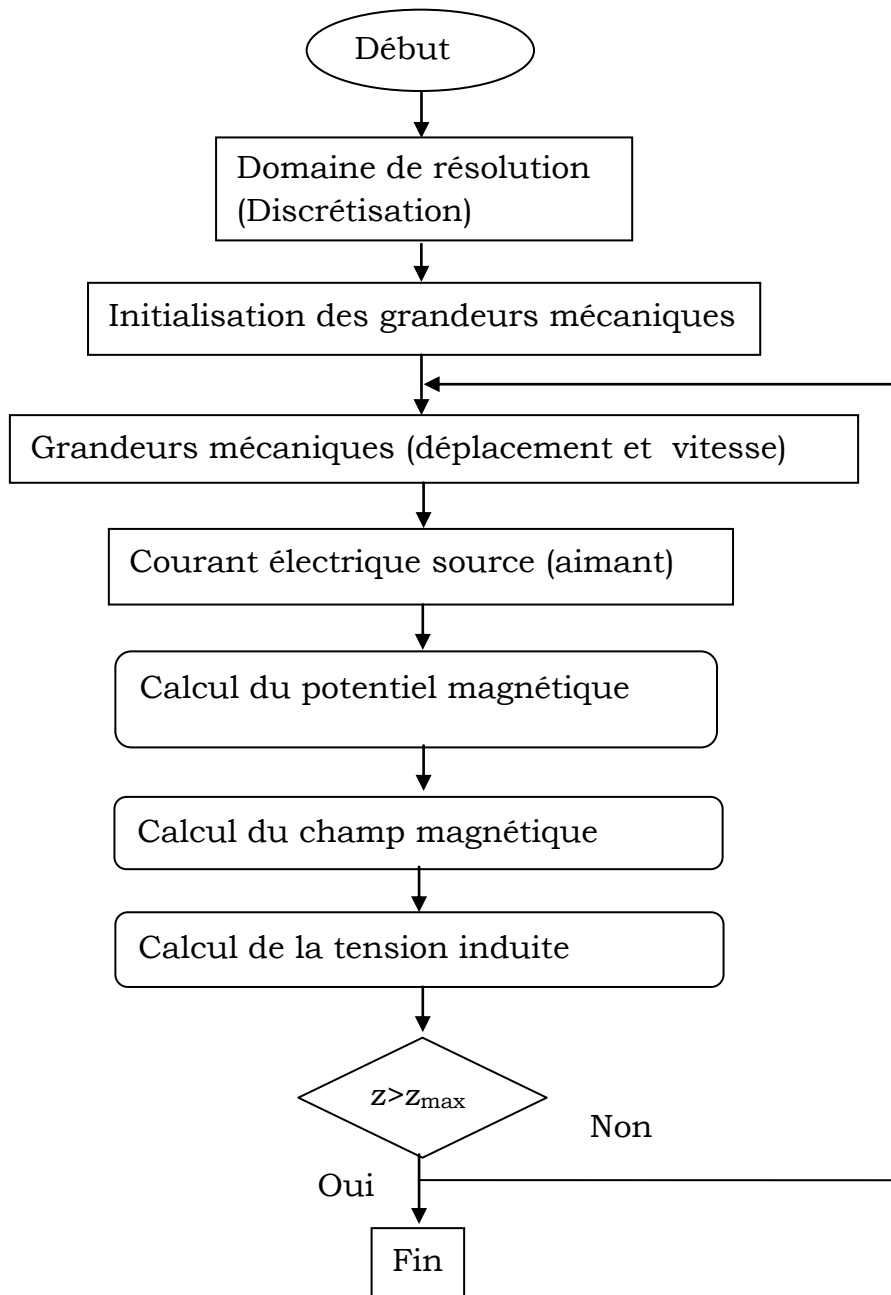


Figure III.7 : Organigramme du processus des calculs numériques.

III.5 Applications et résultats

III.5.1 Aimant utilisé

Nous avons choisi l'aimant de type « NdFeB ». C'est Un aimant au néodyme permanent composé d'un alliage de néodyme, de fer et de bore

(Nd₂Fe₁₄B) permettant de former un système cristallin tétragonal. Ce sont les aimants permanents les plus puissants disponibles sur le marché. L'aimant « NdFeB » peut atteindre, pour les nuances les plus performantes, une aimantation de 1.6 Tesla. Sa masse volumique est de 7.5g/cm³.

Dans ce qui suit, nous considérons un aimant d'une rémanence de 1.25T issue d'une nuance modérée. De ces données, nous déduisons la masse et les courants équivalents correspondant aux caractéristiques géométriques choisies de l'aimant.

Tableau **III.1** : Données géométriques et électromagnétiques de l'aimant

Type de l'aimant NdFeB	
Hauteur (cm)	1
Diamètre (cm)	1
Masse (g)	5.6
Rémanence (T)	1.25
Densité de courant équivalente (A/m)	10 ⁶
Courant équivalent (A)	10 ⁴

III.5.2 Grandeurs mécaniques

La forme de la vitesse et celle du déplacement utilisés dans les calculs qui suivent sont données sur les figures (III.8) et (III.9)

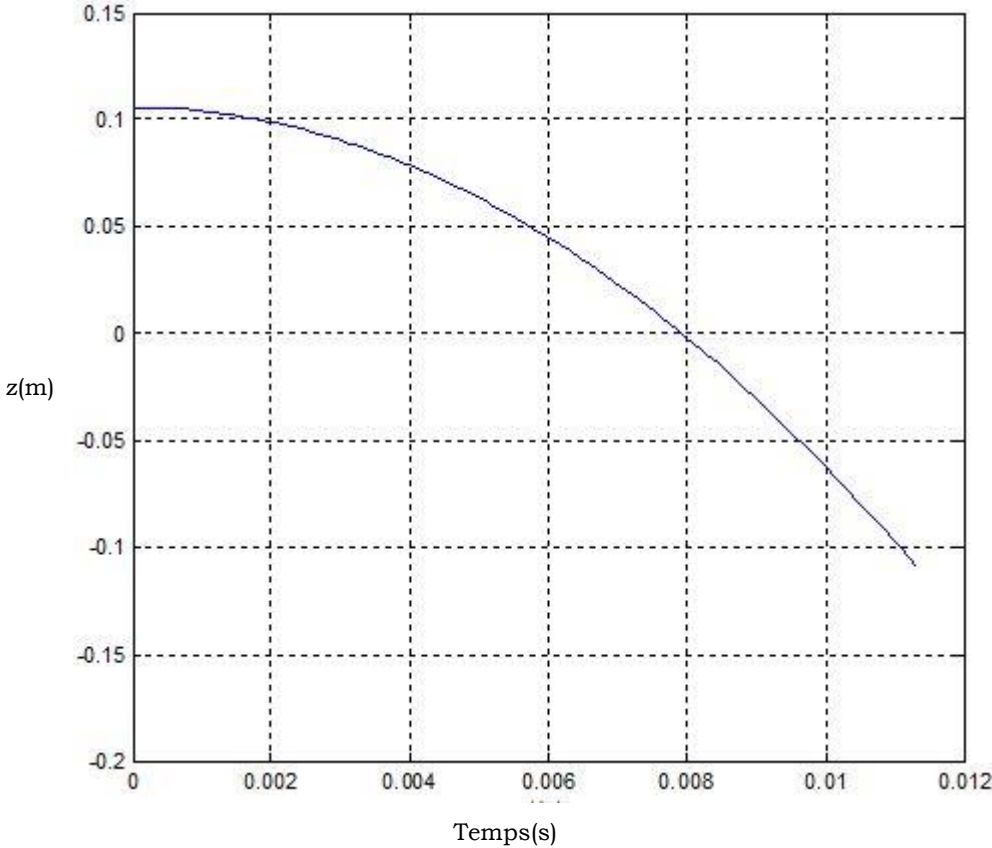


Figure III.8 : Déplacement de l'aimant en fonction du temps

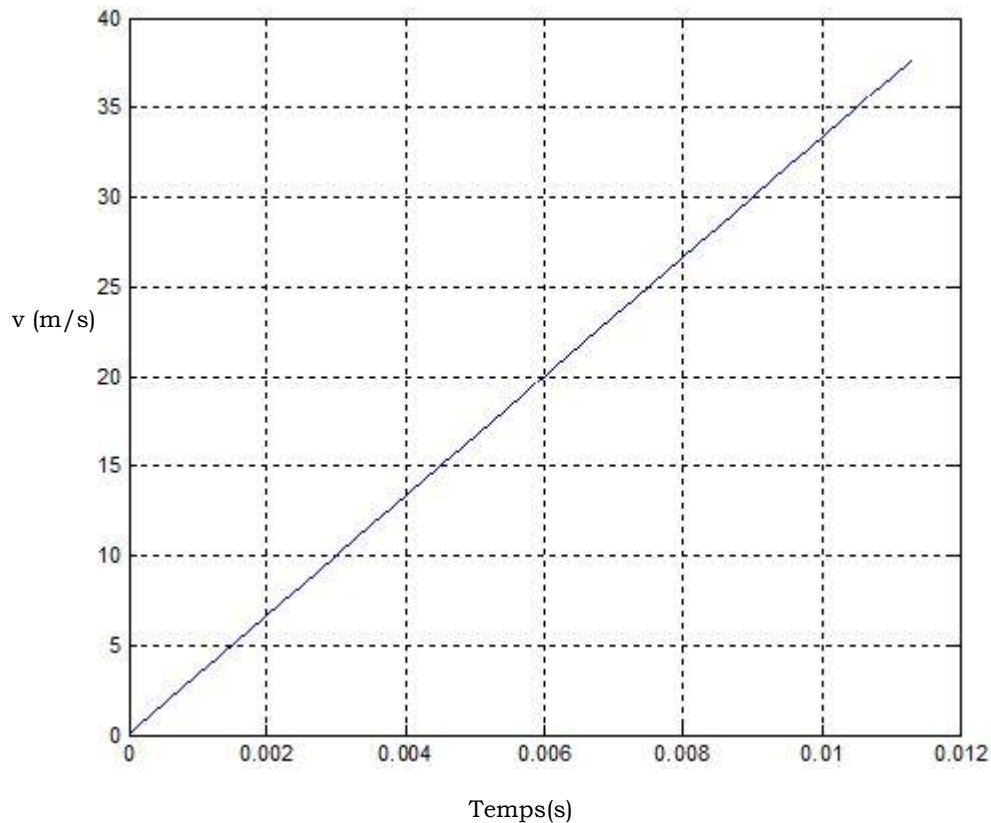


Figure III.9 : Vitesse de l'aimant en fonction du temps

III.5.3 Etude de l'influence de la disposition de la bobine

La bobine est composée de 100 spires et espacé de l'aimant de 2mm. On réalise trois essais relatifs aux valeurs de a et de b (le rayon et la hauteur de la bobine) comme le montre la figure (III.10).

On constate d'après les figures (III.11) et (III.12) que la disposition des spires de la bobine a une très grande importance sur la tension induite.

Pour $a=50\text{mm}$ et $b=2\text{mm}$ de la figure (III.11), la tension induite n'atteint même pas 0.4V alors que contrairement pour $a=2\text{mm}$ et $b=50\text{mm}$, la tension dépasse 0.4V. Dans les deux cas, on enregistre des tensions de plus en plus importantes pour une forme de la bobine qui tend vers le carré.

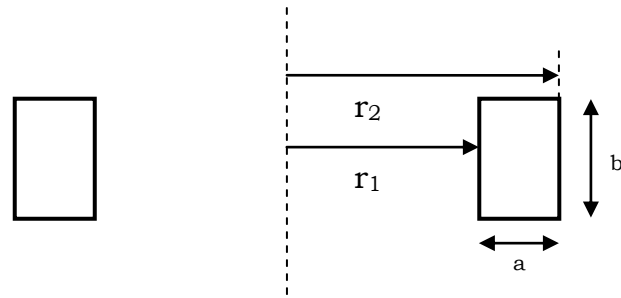


Figure III.10 : Description géométrique de la bobine

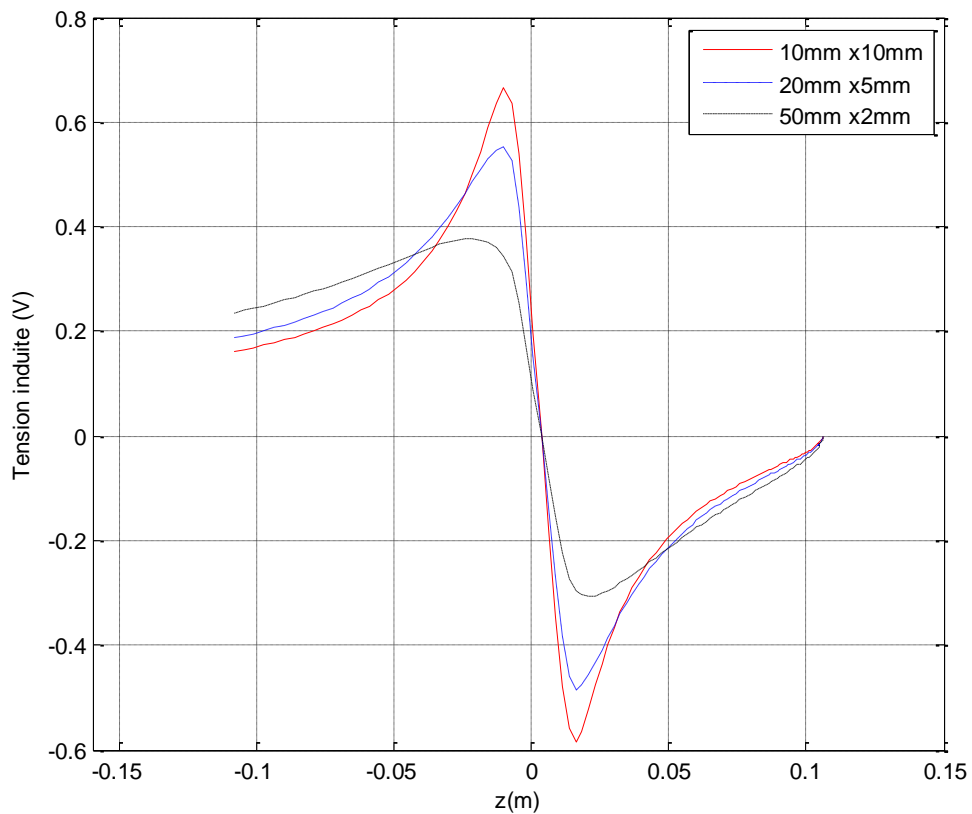


Figure III.11 : Tension induite en fonction du déplacement pour des différentes valeurs de a et b (Influence de la largeur)

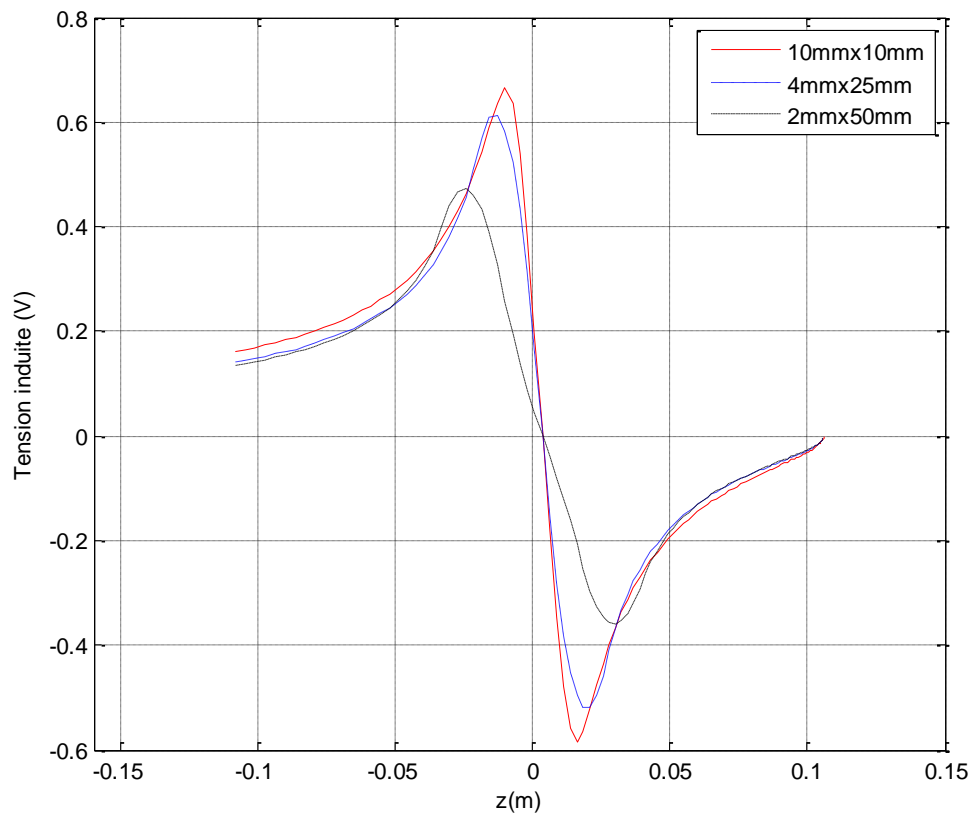


Figure III.12 : Tension induite en fonction du déplacement pour des différentes valeurs de a et b (Influence de la hauteur)

III.5.4 Etude de l'influence de l'entrefer

Nous considérons une forme carrée de la bobine constituée de 100 spires et on fait varier la distance entre l'aimant et la bobine. Les résultats pour quatre différentes positions relatives sont montrés sur la figure (III.13).

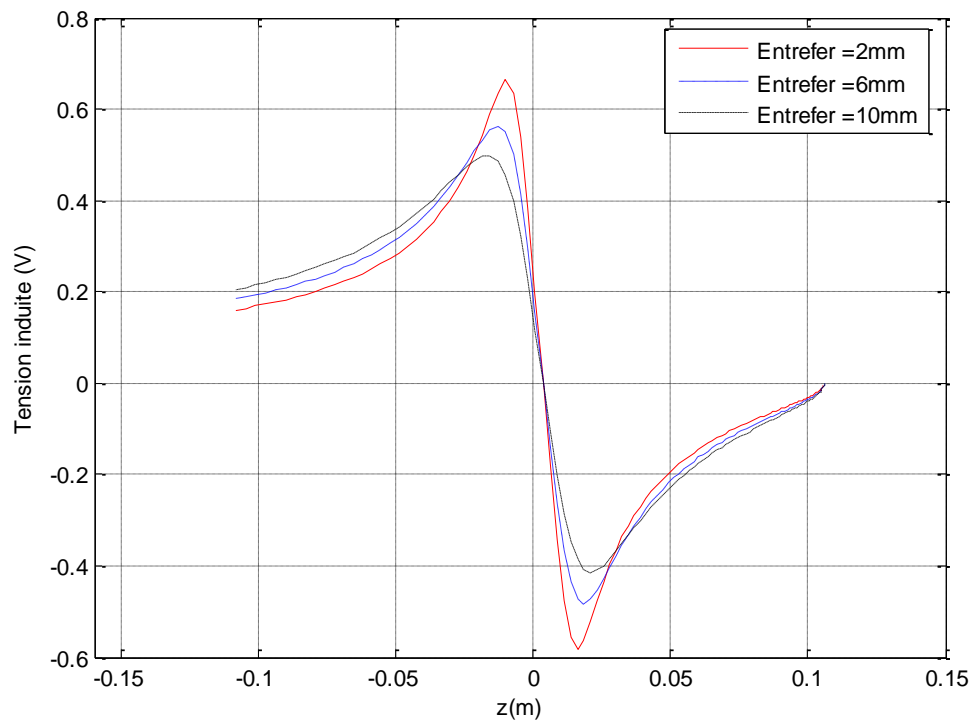


Figure III.13 : Tension induite en fonction du déplacement pour différentes valeur de l'entrefer

On constate que de plus en plus que l'aimant est proche de la bobine la tension induite augmente.

III.5.5 Etude du nombre de spires de la bobine

Pour la longueur de l'aimant de 20mm et l'entrefer de 2mm, on fait varier le nombre de spires. On obtient les résultats montrés sur les figures (III.14).

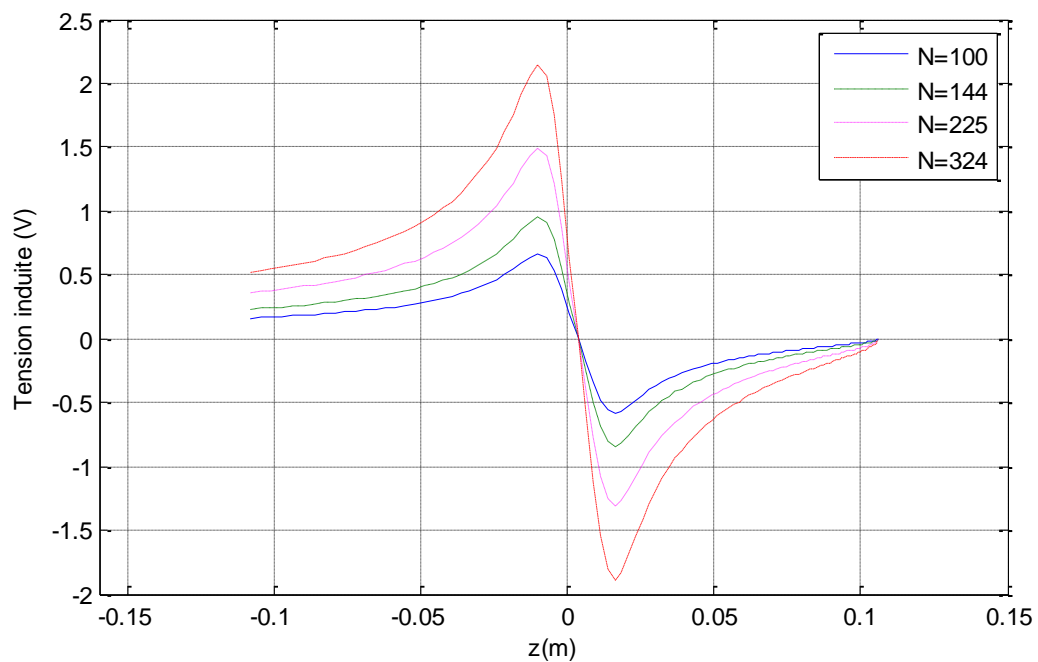


Figure III.14 : Tension induite en fonction du déplacement pour différentes valeurs du nombre de spires

III.5.6 Etude de l'influence de la taille de l'aimant

III.5.6.1 Etude de la hauteur de l'aimant

La densité de flux magnétique produite par un aimant permanent dépend principalement de la longueur qui suit la direction de l'aimantation. En faisant varier la longueur, on abouti aux résultats montrés sur la figure (III.15).

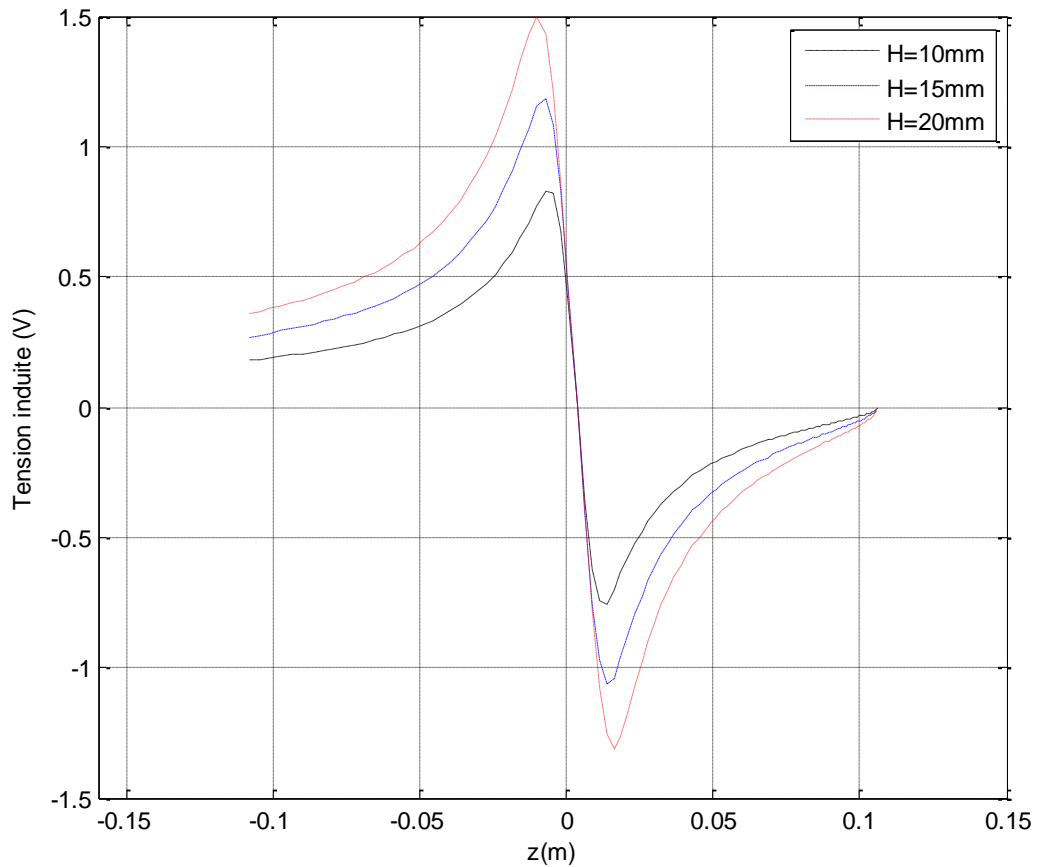


Figure III.15 : Tension induite en fonction du déplacement pour différentes hauteurs de l'aimant

La longueur de l'aimant a une grande influence sur la tension induite.

III.5.6.2 Etude du rayon du dispositif

La tension induite dépend d'une part, du rayon de l'aimant (densité de flux magnétique) et d'une autre part du rayon de la bobine (contour du champ électromoteur). Pour mettre en évidence cette influence, on fait varier le rayon de l'aimant avec celui de la bobine. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure (III.16).

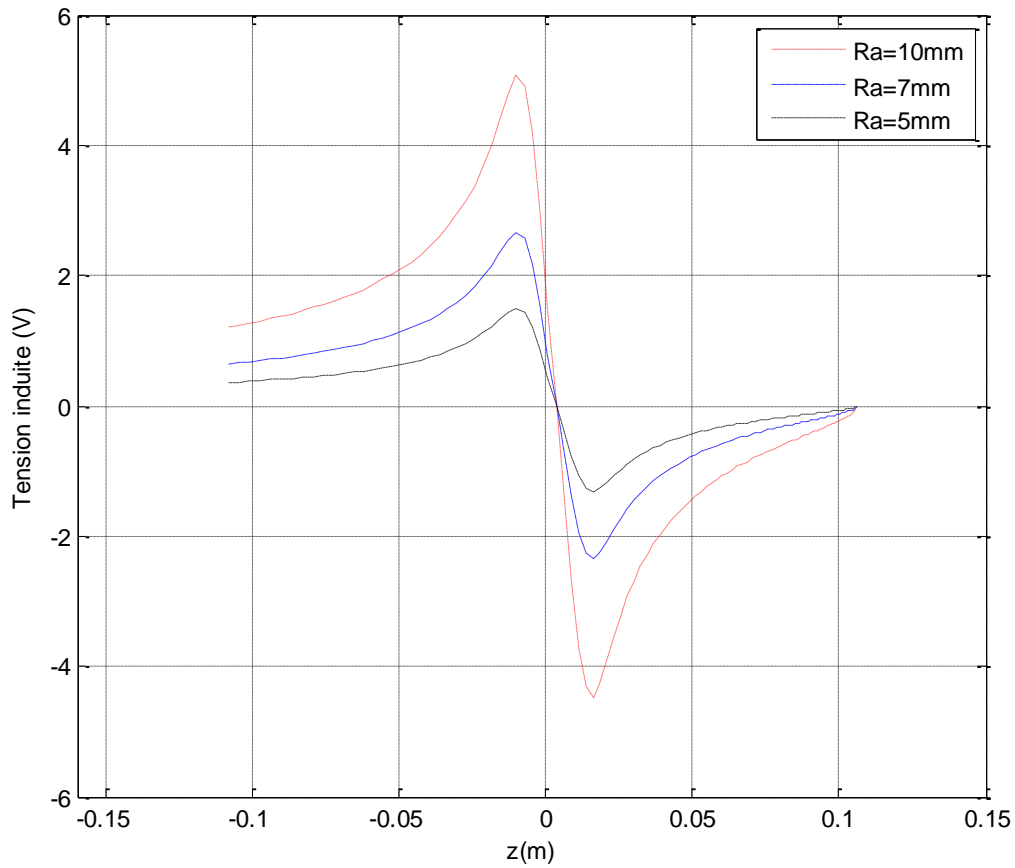


Figure III.16 : Tension induite en fonction du déplacement pour différents rayons du système

L'influence du rayon du dispositif est plus importante que celle de la longueur de l'aimant.

III.6 Conclusion

Ce chapitre concerne 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.

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.

Conclusion Générale

Le travail présent dans ce mémoire concerne l'étude théorique d'un récupérateur d'énergie issue du mouvement de l'homme. Il s'agit d'une conversion mécano-magnéto-électrique.

Nous avons commencé par dresser un état de l'art sur la récupération de l'énergie. D'autres thématiques complémentaires ont été exposées telle que la notion d'autonomie des microsystemes et le stockage.

Puis nous avons exposé les outils électromécaniques indispensables à l'étude de ce convertisseur.

Afin de répondre à cette technique de conversion, une partie importante de ce travail est réservé à la modélisation des aimants permanents qui sont source du champ magnétique. D'une autre part, une modélisation électromécanique globale a été réalisée. Le modèle élaboré est implanté sous l'environnement MATLAB.

Les résultats issus du modèle montrent qu'il est possible de récupérer de l'énergie électrique en exploitant le mouvement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine. Ce mouvement peut être en pratique généré par le déplacement de l'homme.

La tension induite dépend de l'aimantation et de plusieurs paramètres géométriques. Nous avons constaté que cette tension augmente avec l'accroissement du nombre de spires de la bobine, de son rayon et plus particulièrement de la longueur de l'aimant.

En perspectives, nous proposons :

- Pour un rendement optimal, d'associer au modèle développé un modèle d'optimisation.
- D'élargir le modèle à un système de plusieurs bobines espacées.
- D'associer à la sortie de la bobine un système de redressement de la tension et une batterie de stockage d'électricité.

Références bibliographiques

- [1]. Ghislain DESPESSE, « Étude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des microsystèmes communicants », thèse de doctorat en Mécanique et Energétique, Laboratoire d'Electronique, de Technologie et d'Instrumentation (LETI), Grenoble, Juin 2005.
- [2]. Valérie DUPE, « Conception multidisciplinaire de microsystèmes autonomes », Thèse de doctorat en Electronique, Université de Bordeaux1, Novembre 2011.
- [3]. Ahmed-Seddik BOUHEDJAR, « Systèmes de récupération d'énergie vibratoire large bande. Energie électrique, Université de Grenoble, 2012.
- [4]. Maxime DEFOSSEUX, « Conception et caractérisation des microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes », Thèse de doctorat en Micro& Nano Electronique, Université de Grenoble, Octobre 2012.
- [5]. Sébastien BOISSEAU, « Récupération d'énergie vibratoire à électrets », Thèse de doctorat en Electronique, Université de Grenoble, 2011.
- [6]. Louis CARLIOZ, «Générateur piézoélectrique à déclenchement thermomagnétique. », Thèse de doctorant en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009.
- [7]. Bernard MULTON, Marianne LOSSEC, Hamid BEN AHMED, « Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes », École thématique ECOFAC, 2010.
- [8]. Hugo DUROU, « Vers l'autonomie énergétique des réseaux de capteurs embarqués : conception et intégration d'un générateur piézoélectrique et d'un micro dispositif de stockage capacitif en technologie silicium », Thèse de doctorat en Microélectronique, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Décembre 2010.

- [9]. Abdel-hakim MAHIR, « La récupération de l'énergie vibratoire », Rapport de projet de fin d'étude, Université Lille1.
- [10]. Zied SADDI, « Conception d'un dispositif de récupération d'énergie mixte vibratoire-électromagnétique pour l'alimentation des dispositifs à faible consommation », Thèse de doctorat en Électronique, optronique et systèmes, Université Paris-Est École doctorale Mistic, décembre 2016.
- [11]. Adrien BADEL, « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire », Université de Savoie, 2005.
- [12]. Raphaël GUILLEMET, « Etude et réalisation d'un récupérateur d'énergie vibratoire par transduction électrostatique en technologie MEMS silicium », Université Paris-Est, 2012.
- [13]. Khayredine MADAGH, Fares SAADI, « modélisation et calcul d'un aimant permanent », projet de fin d'étude, Université d'Abderrahmane Mira de Bejaia, 2014-2015.
- [14]. Ishaq AMRANI, « Conception d'un micro-actionneur à aimants permanents pour une application micro-pompe », thèse de doctorat en commandes des systèmes énergétiques, Laboratoire de Génie Electrique de Biskra LGEB, 2017.
- [15]. Bachir MAOUCHE, « Etude et développement semi analytique de l'équation de diffusion électromagnétique avec terme de déplacement dans le cas de dispositifs axisymétriques excités en courant et en tension », thèse de magister en génie électrique option machines électriques, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 1996.
- [16]. Bachir MAOUCHE, «Elaboration de modèles par les Grandeurs Electromagnétiques Couplées. Application au contrôle non destructif par Courant de Foucault », thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, 2007.