

# Mémoire de Fin de Cycle

Présenté par :

**Badea IDIR**

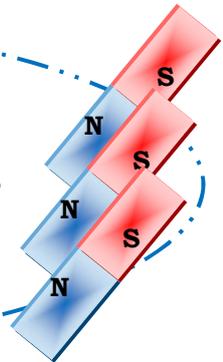
Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**

Option : **Énergie Renouvelable**

Thème :

**Modélisation et conception d'un  
dispositif inductif portable en vue de la  
récupération de l'énergie électrique**



Encadré par :

**Pr. Bachir MAOUCHE**

## Remerciements

En guise de reconnaissance, mes remerciements se lance,

**M** ma reconnaissance est exprimée à mon promoteur Mr B.MAUCHE pour m'avoir affilié à la vraie connaissance du domaine de l'électromagnétisme y compris les autres domaines dérivateurs, ainsi pour m'avoir initié à la recherche, aussi pour ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, et son esprit polyvalent qu'il a montré durant cette période.

**E** ensuite mes sincère gratitude vont à tout les enseignants intervenants, qui ont participé à ma formation pendant ces 5 années ici a l'université A mira de Bejaia ainsi que tous les enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques.

Aux membres de jury qui vont contribuer à la lecture et à l'enrichissement de ce modeste travail.

Je tiens à mentionner le plaisir de remercier Mr akli MOUHAND mon enseignant de base 'primaire' pour les merveilles qualités qui a su creusé en moi, l'éducation vient avant tout savoir 'une perle que je porterai toujours Mr MOUHAND.

**R** rien ne peut compléter cette page que les bonnes expressions dédiées aux bons intellectuels.

**C** concernant les amis c'est pour eux que les bonnes émotions, les merveilleux remerciements sont réservés, Pour leur sincère amitié, leur paroles, esprit d'équipe, critiques, et leur conscience, à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

**I** incérant dans un registre personnel, la profonde gratitude a toute ma famille pour leur aide inestimable, leur encouragement infini ainsi leur confiance totale.

Pour la relecture du mémoire, les remarques et les conseils précieux dont une personne m'a partagé et m'a enrichi je tiens à exprimer ma reconnaissance et mon énorme respect envers cette personne : Karim.

Je saisi cette occasion pour vous exprimer ma profonde gratitude tout en vous témoignant mon respect.

Et voila je réuni mes lettres écrites en gras, italique et souligné pour finir à dire **MERCI.**

## **Dédicaces**

Avec le peu présent mais le grand signifiant, chers mère et père vous avez tous sacrifié pour vos enfants ni efforts ni santé ni comforts, un magnifique modèle de labeur et de persévérance vous êtes .puisse ce travail être votre récolte.

Une deuxième fois chère mère tu mérites encore d'être citer 'source du champ' !oui, un champ d'affection, de tendresse, de patience et de charité ton aimantation réside permanente en fonction de tout paramètre, je t'adore.

**A** toi, chère mère.

**A** toi, père.

**A** toi, cher très cher frero.

**A** vous, mes anges, douces sœurette.

**A** toi, mon futur conjoint.

**A** vous, aimables et agréables amies.

**A** vous, honorables et respectueux enseignants.

## Liste des figures

<b>Figure I-1</b> : Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque	8
<b>Figure I-2</b> : Domaines du spectre électromagnétique	9
<b>Figure I-3</b> : Schéma de principe d'un générateur thermoélectrique	10
<b>Figure I-4</b> : Energie biologique	11
<b>Figure I-5</b> : Principe de fonctionnement d'un récupérateur d'énergie	12
<b>Figure I-6</b> : Principe de la méthode inductive	13
<b>Figure I-7</b> : Principe de la méthode capacitive	15
<b>Figure I-8</b> : Effet piézoélectrique direct	16
<b>Figure I-9</b> : Synthèse de potentialité énergétique ambiante	18
<b>Figure I-10</b> : Différents systèmes de stockage	20
<b>Figure I-11</b> : Interaction entre microsystemes, récupération d'énergie et environnement	21
<b>Figure I-12</b> : Architecture d'un microsysteme	22
<hr/>	
<b>Figure II-1</b> : Classification des matériaux magnétiques	25
<b>Figure II-2</b> : Représentation des matériaux amagnétiques	26
<b>Figure II-3</b> : Représentation des matériaux magnétiques	27
<b>Figure II-4</b> : Matériaux ferromagnétiques	27
<b>Figure II-5</b> : Cycle d'hystérésis idéale des matériaux doux et durs	28
<b>Figure II-6</b> : La pierre d'aimant	29
<b>Figure II-7</b> : Utilisation ancienne de l'aimant	30
<b>Figure II-8</b> : Propriétés technique de l'aimant	31
<b>Figure II-9</b> : Courbe de désaimantation des quatre classes d'aimant	33
<b>Figure II-10</b> : Le Coût en fonction de l'énergie volumique fournie des principales familles d'aimants permanents	34
<b>Figure II-11</b> : Aimant terre rare	35
<b>Figure II-12</b> : Différentes conversions d'énergies par l'intermédiaire des aimants	36
<b>Figure II-13</b> : Différentes applications d'aimants permanents	36
<b>Figure II-14</b> : Moments magnétiques orbitale et de spin	37

<b>Figure II 15</b> : Spire de courant de moment magnétique $\vec{m}$	38
<b>Figure II-16</b> : Modèle ampérien d'un aimant permanent	38
<b>Figure II-17</b> : Modèle coulombien d'un aimant permanent	39
<b>Figure II-18</b> : Représentation relative à la loi de Biot et Savard	39
<hr/>	
<b>Figure III-1</b> : Schéma descriptif du modèle	45
<b>Figure III-2</b> : Phases du mouvement de l'aimant	46
<b>Figure III-3</b> : Variation de l'angle $\theta$ avec le mouvement de l'aimant	51
<b>Figure III-4</b> : Schéma descriptif du modèle en 2D	53
<b>Figure III-5</b> : Potentiel vecteur A en fonction de l'angle pour des différentes dimensions de l'aimant	54
<b>Figure III-6</b> : Potentiel vecteur A en fonction de l'angle pour les différents champs rémanents	54
<b>Figure III-7</b> : Potentiel vecteur A en fonction de l'angle pour les différents rayons de la spire	55
<b>Figure III-8</b> : Composantes du champ magnétique généré par l'aimant	55
<b>Figure III-9</b> : Composante radiale en fonction de l'angle pour différents rayons de la spire	56
<b>Figure III-10</b> : Composante radiale pour les différentes dimensions de l'aimant	56
<b>Figure III-11</b> : Flux pour les différentes dimensions de l'aimant	57
<b>Figure III-12</b> : Flux pour des rayons de spire différents	57
<b>Figure III-13</b> : Champ électromoteur induit en fonction de l'angle pour différentes dimensions	57
<b>Figure III-14</b> : Champ électromoteur induit en fonction de l'angle pour différents rayon	58
<b>Figure III-15</b> : Force électromotrice induite en fonction du déplacement z	58

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> : rendement théorique et pratique pour différents gradient de température	10
<b>Tableau I-2</b> : Taux de conversion de matériaux piézoélectrique	15
<b>Tableau I-3</b> : Avantages et inconvénients des trois types de conversion	17
<b>Tableau I-4</b> : Avantages et inconvénients des trois types de conversion	20
<hr/>	
<b>Tableau II-1</b> : Susceptibilité magnétique des matériaux amagnétiques	27
<b>Tableau II-2</b> : Principales caractéristiques magnétiques des familles d'aimants	32
<hr/>	
<b>Tableau III-1</b> : Données géométriques et électromagnétiques	53

## TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>4</b>
<b>I- Revue documentaire sur la récupération d'énergie .....</b>	<b>6</b>
I.1- Introduction.....	7
I.2- Concept de la récupération d'énergie.....	7
I.3- Source potentielle d'énergie récupérable.....	8
I.3.1- Énergie rayonnante .....	8
I.3.1.1- Rayonnement solaire.....	8
I.3.1.2- Autre type de rayonnement .....	9
I.3.2- Énergie thermique .....	10
I.3.3- Énergie biologique .....	11
I.3.4- Énergie mécanique .....	12
I.3.4.1- Méthode inductive.....	13
I.3.4.2- Méthode capacitive.....	14
I.3.4.3- Méthode piézoélectrique .....	15
I.3.4.4- Comparaison des trois types de conversion .....	16
I.3.4.5- Synthèse sur la récupération mécanique .....	17
I.4- Potentialité énergétique.....	18
I.5- Enjeux de la récupération d'énergie ambiante .....	18
I.6- Autonomie en énergie .....	19
I.7- Stockage d'énergie .....	19
I.7.1- Différentes techniques de stockage .....	20
I.7.2- Comparaison des moyens de stockage .....	20
I.8- Récupération d'énergie et microsystemes .....	21
I.9- Conclusion .....	22
<b>II- Théorie des aimants.....</b>	<b>24</b>
II.1- Introduction.....	25
II.2- Matériaux magnétiques.....	25
II.2.1- Classification des matériaux magnétiques.....	25
II.2.1.1- Matériaux Diamagnétiques.....	26

II.2.1.2- Matériaux paramagnétiques .....	26
II.2.1.3- Matériaux ferro-ferrimagnétiques .....	26
II.2.1.4- Ferromagnétique dur .....	27
II.3- Processus d'aimantation et cycle d'hystérésis .....	28
II.4- Aimant permanent .....	29
II.4.1- Historique ancien .....	29
II.4.2- Historique récent .....	30
II.4.3- Propriétés des aimants .....	30
II.4.3.1- Grandeurs magnétiques .....	30
II.4.3.2- Effet de la température .....	31
II.4.4- Différentes technologies d'aimant .....	32
II.4.4.1- Les ALnico .....	32
II.4.4.2- Les ferrites .....	32
II.4.5- Terres rares .....	33
II.5- Cause de désaimantation et vieillissement .....	35
II.6- Place des aimants dans la technologie électrique .....	36
II.7- Modélisation d'un aimant permanent .....	37
II.7.1- Principe d'équivalence .....	37
II.7.2- Modèle Ampérien .....	37
II.7.3- Modèle coulombien .....	38
II.7.4- Équations de maxwell exploitées .....	39
II.7.5- Relations constitutives des milieux .....	40
II.7.6- Mise en équation du modèle ampérien .....	40
II.7.7- Formulation en potentiel vecteur A .....	42
II.8- Conclusion .....	43
<b>III- Modélisation et résultats .....</b>	<b>44</b>
III.1- Introduction .....	45
III.2- Modèle de la conception .....	45
III.2.1- Géométrie du système .....	45
III.2.2- Potentiel vecteur magnétique .....	46
III.2.3- Champ d'induction magnétique .....	47
III.2.4- Flux magnétique .....	48

---

III.2.5-Champ électromoteur.....	48
III.2.6-Force électromotrice induite .....	49
III.2.7-Élément de courant di.....	49
III.2.8-Force de Laplace .....	50
III.3- Résultats .....	53
III.3.1-Modèle géométrique 2D .....	53
III.3.2-Données géométrique et électromagnétiques.....	53
III.3.3-Potentiel vecteur A .....	54
III.3.4-Champ magnétique B.....	55
III.3.5-Flux magnétique .....	56
III.3.6-Champ électromoteur.....	57
III.3.7-Force électromotrice .....	58
III.4- Conclusion .....	59
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>60</b>
<b>RÉFERNES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>62</b>
<b>RÉSUMÉ/ABSTRACT .....</b>	<b>67</b>

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le contexte énergétique d'aujourd'hui est devenu sujet de question, de recherche et d'amélioration. Ce contexte est alimenté par une variété de concepts qui se chevauchent entre eux pour finir à une notion d'efficacité énergétique. Cette dernière est souvent interprétée pour désigner l'ensemble des technologies et des pratiques permettant de diminuer la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de performance équivalent.

Concepts :

- Auto-alimentation et permanence en énergie,
- Miniaturisation et performance,
- Baisse de consommation,
- Développement durable,
- Questions environnementales.

L'environnement ambiant regorge de sources énergétiques diverses les plus courantes sont :

- ✓ Rayonnement électromagnétique (solaire, lumière artificiel, ondes hertziennes),
- ✓ Thermique (gradient de température),
- ✓ Mécanique (déplacement, vibration ou déformation).

La récupération de l'énergie est un domaine relativement récent qui a pour vocation d'utiliser l'énergie présente dans l'environnement, qui peut être parfois sous forme de pertes, à fin d'alimenter des appareils électroniques portables ou fixes, dans un souci de les rendre énergétiquement autonomes.

A cela s'ajoutent les progrès réalisés sur les dispositifs de stockage qui sont essentiels pour intervenir dans les intermittences et les inadéquations production-consommation.

Dans ce domaine une solution de récupération unique capable de s'adapter à tous les environnements ne peut pas avoir lieu. Cependant, il existe autant de solutions que d'environnements différents.

Par ailleurs, chaque type de récupérateur est adapté à un besoin bien précis, à savoir une gamme de puissance donnée et donc un nombre d'applications données, et ne peut fonctionner que sous des conditions bien définies (fréquences de vibration, longueur d'onde du rayonnement, valeur de gradient de température...) [1].

Dans ce travail, on porte une petite lumière sur un type de récupérateur bien particulier et une forme d'énergie bien précise issue du déplacement de l'homme. C'est une énergie mécano-électrique dont la conversion est par voie électromagnétique.

C'est autour de ces notions que s'articule la structure de notre mémoire précédé d'une introduction axée vers un contexte énergétique d'aujourd'hui, suivi de trois chapitres, et d'une conclusion générale récapitulant le travail effectué, terminée ainsi par une liste de références bibliographiques utilisée.

Dans le chapitre I, nous menons l'étude sur les énergies existantes dans l'environnement ambiant et les procédés de leur conversion en énergie électrique.

Nous transitons après vers une revue documentaire sur les aimants permanents suivi d'une modélisation de ces derniers dans le chapitre II.

Le chapitre III porte sur le modèle de conception en mettant en évidence les différentes formulations et les résultats de modélisation (simulation

# **I- Revue documentaire sur la récupération d'énergie**

## **I.1- Introduction**

La récupération de l'énergie ambiante est présente dans l'environnement immédiat du système à alimenter. Il existe différentes formes d'énergie récupérable à savoir le rayonnement solaire, le gradient de température et les vibrations mécaniques.

Ce chapitre se présente pour introduire le contexte dont s'inscrit le thème : récupération de l'énergie ambiante.

Les possibilités de récupération et de transduction d'énergie sont assez vastes, il est donc nécessaire de passer en revue les principales énergies qui rentrent en jeu, après s'être intéressé à cette diversité énergétique, on s'étend sur la récupération de l'énergie mécanique (vibratoire) et les moyens de conversion associés, on termine par un bilan conclusif de cette première partie.

## **I.2- Concept de la récupération d'énergie**

La thématique de la récupération d'énergie est une thématique assez récente dans l'histoire des environnements intelligents, on peut considérer qu'elle a pris réellement son essor après l'an 2000 [2].

Ces dernières années de plus en plus de projets ont vu le jour, de nouveaux axes de recherche ont été examinés et de nouvelles avancées sont régulièrement mises en avant.

La notion de récupération d'énergie vient donc pour transformer en énergie électrique exploitable cette énergie ambiante inutilisée dans ses formes multiples.

Il existe différentes échelles de récupération d'énergie, allant du microwatt au mégawatt [3][4] ; ceci est en fonction de plusieurs paramètres citant :

- L'abondance de L'énergie récupérable,
- Les technologies et les techniques de réalisation du récupérateur,
- Le domaine d'application,

- Les dimensions du récupérateur (contrainte d'encombrement),
- Le besoin en énergie.

### I.3- Source potentielle d'énergie récupérable

Il y a plusieurs alternatives pour la récupération d'énergie ambiante, Certaines d'eux comme le solaire attire de plus en plus l'attention grâce aux niveaux de puissance suffisamment produit, mais d'autres sources s'avèrent beaucoup plus confidentielles et serviables aux micros systèmes autonomes, ces sources d'énergie peuvent être exploitées chacune séparément [4].

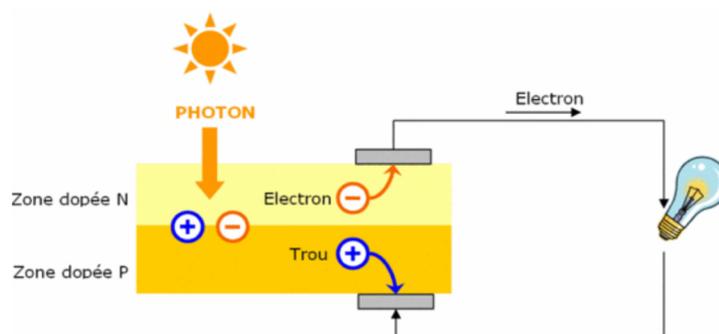
Cependant, pour une meilleure efficacité, il est souvent privilégié d'utiliser au moins deux de ces sources pour assurer la permanence. Un état des lieux sur cette potentialité énergétique sera dressé.

#### I.3.1- Énergie rayonnante

##### I.3.1.1- Rayonnement solaire

C'est le rayonnement le plus couramment récupérable d'électricité, cette récupération tire profit de l'existence d'une tension générée aux bornes d'une cellule photovoltaïque exposée à un flux lumineux.

Le principe est fait par le biais d'un matériau semi-conducteur, silicium multi/mono cristallin, qui comporte une jonction P-N excité par la source lumineuse (photons), comme illustré sur la figure (I-1).



**Figure I-1** : Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque

L'apport énergétique de cette conversion est en fonction de divers paramètres voir (l'éclairement, la technologie de cellule PV...).

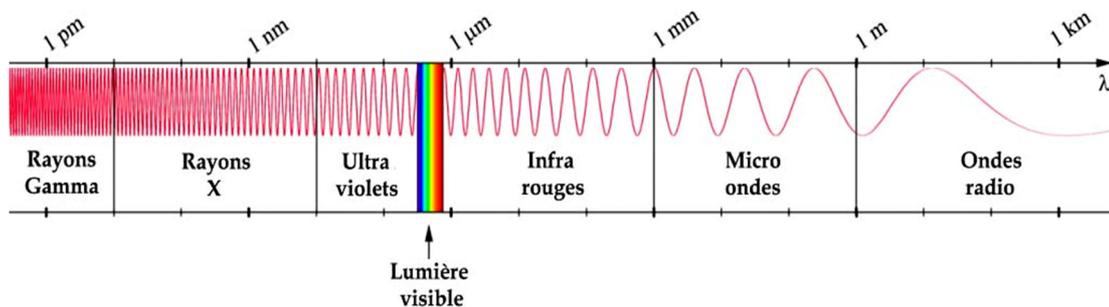
Il est en effet à noter que le rendement des cellules photovoltaïques dépasse rarement 20% et le cout reste relativement élevé.

À noter encore que Les panneaux photovoltaïques sont en zones ensoleillées la solution efficace de récupération d'énergie pour des applications en petites puissances (microsystèmes, capteurs) mais également en fortes puissances (production d'énergie) [5][6][7][8].

### I.3.1.2- Autre type de rayonnement

Un autre type de rayonnement utilisable est celui véhiculé par les ondes électromagnétiques (hertziennes) issues du nombre important de sources d'émission dans l'environnement : des GSM, des émetteurs radios, de la télévision.

Le problème c'est qu'il faut se placer à proximité de la source émettrice (quelques mètres maximum), mais cette récupération paraît insuffisante comme source d'alimentation [3][4][8].



**Figure I-2** : Domaines du spectre électromagnétique

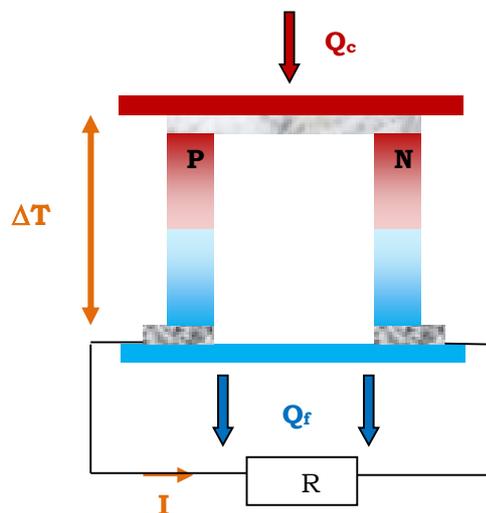
Un ultime type de rayonnement est le rayonnement nucléaire existant dans la nature. Ce rayonnement n'est pas suffisant dans une optique de récupération d'énergie, Pour pouvoir l'utiliser il est nécessaire de se servir de sources radioactives artificielles hautement énergétiques, ce qui limite les applications du fait du danger pour les êtres vivants et des raisons évidentes de pollution.

### I.3.2- Énergie thermique

Deux phénomènes peuvent être utilisés pour la récupération d'énergie thermique.

Le premier constituant la récupération géothermique, qui consiste à exploiter le gradient spatial de température entre deux zones.

Le second, consiste à récupérer de l'énergie thermique à partir de variations temporelles de température exploitant l'effet Seebeck : il produit un courant électrique proportionnel au gradient de température entre deux jonctions P et N connectées électriquement en série et thermiquement en parallèle : c'est le principe d'un générateur thermoélectrique comme le montre la figure (I-3) [3][4][7][9] :



**Figure I-3** : Schéma de principe d'un générateur thermoélectrique

En fonction de la plage de température le rendement de la conversion thermoélectrique varie, ainsi le rendement théorique qui est rarement atteint voir le tableau ci-dessous [7] :

**Tableau I-1** : Rendement théorique et pratique pour différents gradient de température

Gradient de température	Rendement théorique	Rendement pratique
20°C-40°C	6.4%	1%
20°C-200°C	38%	10%

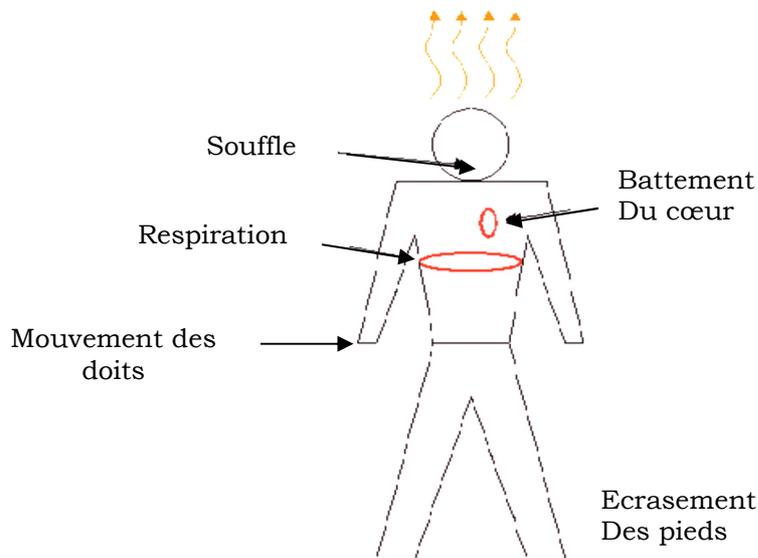
Le problème de ce type de générateur est la difficulté d'avoir un écart de température important sur de petites dimensions. Des recherches sont effectuées en vue de trouver de nouveaux matériaux permettant d'utiliser des plages de températures plus petites tout en générant une grande puissance.

### I.3.3- Énergie biologique

Le corps humain stocke, dissipe et peut produire une énergie considérable avec divers activités, voir la figure (I-4), en égard à la consommation des appareils électroniques portables, cette énergie est renouvelable, non polluante et de durée de vie élevée.

Même si une faible part de cette énergie est exploitable, il semble qu'elle peut permettre d'approvisionner bon nombre d'applications en fonction :

- Des ressources,
- Des solutions technologiques envisageables,
- Des besoins [10][11].



**Figure I-4 : Énergie biologique**

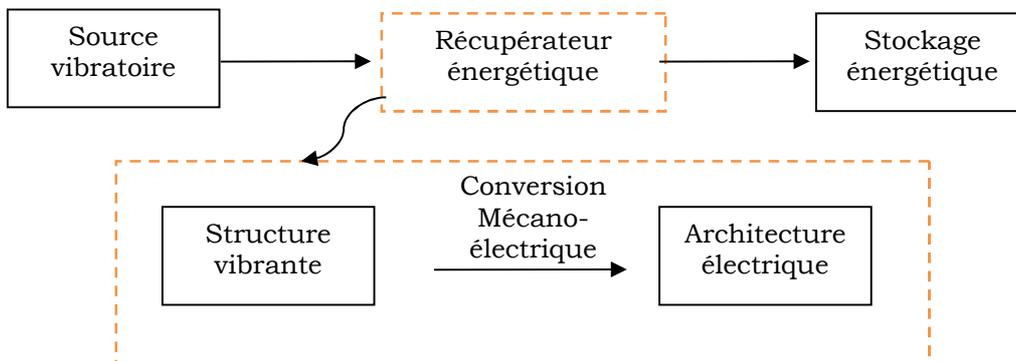
Cette idée d'utiliser l'énergie mécanique de l'homme pour alimenter les systèmes électriques portables n'est pas nouvelle mais elle connaît un regain

d'intérêt depuis l'explosion du marché de ces systèmes, soit depuis la fin des années 1990.

### I.3.4- Énergie mécanique

De nombreux phénomènes mécaniques peuvent être récupérer et transformer en énergie électrique. Sous diverses formes l'énergie mécanique peut couvrir: les déplacements, les vibrations, les contraintes, les déformations et les chocs [8][12].

Les vibrations sont commune dans le milieu ambiant, on retrouve des sources vibratoires de basse amplitude qui ont un potentiel utilisable : automobile, appareils ménagers, fenêtre, faibles vibration des murs et du sol a proximité des machines tournantes ainsi que des vibrations de haute amplitude dues aux très fortes sollicitations des pièces mécaniques [6],l'architecture d'un récupérateur énergétique est présentée dans la figure(I-5).



**Figure I-5 :** Principe de fonctionnement d'un récupérateur d'énergie

Également les vibrations sont une source présente en intérieur et à l'ombre, ce qui n'est pas le cas de l'énergie solaire, et ce qui est un énorme avantage [2][3]. Les applications visées concernent principalement les systèmes électroniques sans fil à basse consommation [13].

Trois méthodes sont typiquement utilisées pour convertir le mouvement mécanique en signal électrique :

- La méthode inductive (électromagnétique),

- La méthode capacitive (électrostatique),
- La méthode piézoélectrique.

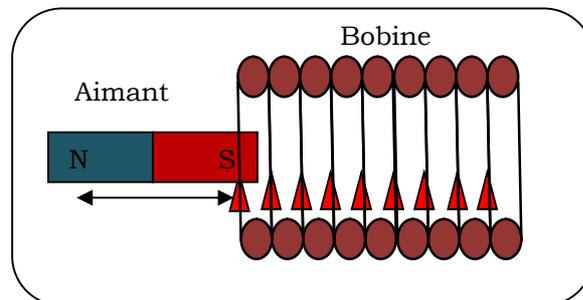
#### I.3.4.1- Méthode inductive

Le principe de cette méthode résulte des notions de l'électromagnétisme anciennes (loi de Faraday). Les systèmes de récupération d'énergie vibratoire par voie inductive sont basés sur les deux indissociables à l'ordinaire 'aimant-bobine'.

Le mouvement relatif d'un ou plusieurs aimants permanents à l'intérieur d'une bobine provoque l'apparition d'une force électromotrice et donc d'un courant dans le cas d'un circuit fermé.

Le courant induit dans la bobine est proportionnel à la variation du flux magnétique à travers cette bobine, ainsi proportionnel: à la vitesse de l'aimant, au champ magnétique moyen et à la surface des spires.

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



**Figure I-6** : principe de la méthode inductive

Un tel système aimant-bobine comme la figure (I-6) le montre est capable de convertir jusqu'à 30% de l'énergie fournie [8], cependant difficile à miniaturiser car la densité volumique d'énergie diminue avec la taille du système.

Ensuite parce qu'il est difficile d'avoir un système stable avec de fort champ magnétique, la maîtrise de cette grandeur clé 'champ magnétique'

ainsi les fréquences de mouvement en jeu peut rendre le système plus performant et intégrable.

#### **I.3.4.2- Méthode capacitive**

Le principe de la méthode capacitive se base sur le fait que l'énergie  $E$  d'une capacité peut être modifiée (amplifiée) mécaniquement, ceci par une transformation du mouvement relatif entre deux conducteurs séparés par un diélectrique (armatures) en une variation de capacité.

En effet, si on considère  $d_0$  la distance entre les armatures d'un condensateur et  $S$  étant leurs surface ainsi la permittivité  $\epsilon$  du diélectrique, voir la figure (I-7), la valeur de la capacité est calculée selon l'équation(I.2) [2][3][5] :

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

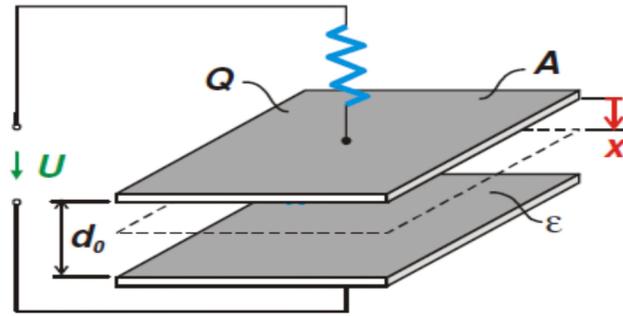
Conformément à l'équation (I.3) :

$$E = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad (I.3)$$

A charge constante, la tension peut croître : en augmentant la variation  $x$  entre les armatures ou en réduisant leur surface  $S$  et donc en réduisant la capacité.

A tension constante, la charge peut être augmentée : en réduisant  $x$  ou en augmentant  $S$ , dans les deux cas, l'énergie stockée dans la capacité augmente. Toutefois, il convient de préciser que ce type de convertisseur n'est pas un générateur au sens propre du terme mais plutôt un multiplicateur d'énergie [5].

Les contraintes de précision sont très difficiles à respecter, de plus, plusieurs limites intrinsèques au principe de transduction, comme la tension de fonctionnement élevée ainsi que la nécessité de pré charger la capacité variable, limitent l'intérêt de ce type de conversion.



**Figure I-7** : principe de la méthode capacitive

Ces structures sont particulièrement bien adaptées pour récupérer des vibrations basses fréquences et/ou réparties sur une large bande de fréquences car elles permettent d'atteindre, en petites dimensions, des couplages électromécaniques plus élevés que les solutions électromagnétiques ou piézoélectriques.

Elles sont également plus aptes à l'intégration, tirant parti de la réduction des échelles.

#### I.3.4.3- Méthode piézoélectrique

La méthode piézoélectrique traduit l'effet piézoélectrique direct illustré sur la figure (I-8), qui a été découvert en 1880 par les frères Curie dans certains matériaux cristallins qui se polarisent sous l'application d'une contrainte mécanique, et réciproquement se déforment sous l'effet d'un champ électrique appliqué (effet inverse) [5][14].

En fonction du type du matériau piézoélectrique les rendements maximums se résument dans le tableau suivant [6] :

**Tableau I-2** : Taux de conversion de matériaux piézoélectrique

Type du matériau	Taux de conversion max
Poly fluorures de vinylidène	1-5%
Céramiques PZT	35-50%
Monocristaux	70-90%

Deux équations couplées régissent les matériaux piézoélectriques selon l'expression (I.4) :

$$\begin{cases} S = s^E T + dE & (a) \\ D = \varepsilon^T E + dT & (b) \end{cases} \quad (I.4)$$

$S$  : Déformation relative

$D$  : Déplacement électrique

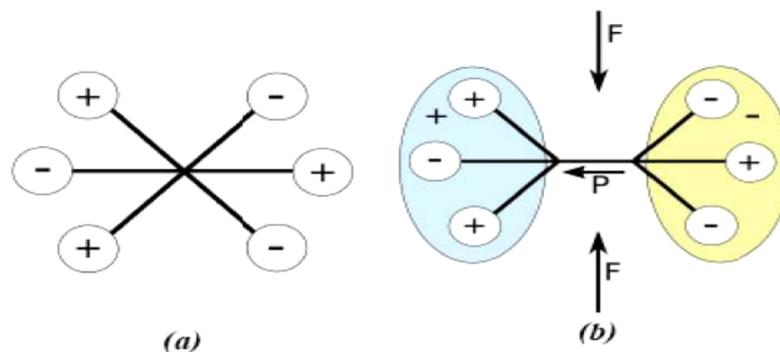
$T$  : Contrainte mécanique

$E$  : Champ électrique

$s^E$  : Susceptibilité élastique (à champs électrique constant)

$\varepsilon^T$  : Permittivité diélectrique (à contrainte mécanique constante)

$d$  : Matrice des constantes piézoélectriques



**Figure I-8** : Effet piézoélectrique direct

Le coefficient le plus important est le coefficient  $d$  qui indique le nombre de charges électriques que fournit le matériau en fonction de la force appliquée [5].

#### **I.3.4.4- Comparaison des trois types de conversion**

Les types de conversion mécano électrique déjà précités sont comparés dans ce qui suit dans le but de mettre chaque type dans son quadrillage car

choisir un récupérateur est bien évidemment très relatif, le tableau (I-3) résume les avantages et les inconvénients des trois conversions.

**Tableau I-3 : Avantages et inconvénients des trois types de conversion**

	<b>Méthode de transduction</b>	<b>+Atouts</b>	<b>-Inconvénients</b>
<b>Récupération mécano électrique</b>	<b>Inductive</b>	+Pas de source de tension nécessaire +pas de matériaux intelligents +densité énergétique élevée	- parties mobiles - tension de sortie basse - intégration difficile
	<b>Capacitive</b>	+Facilité d'intégration +forte tension générée +Pas de matériaux intelligents	- Électronique de gestion complexe - contrainte mécanique et capacitive - Source de tension nécessaire
	<b>Piézoélectrique</b>	+Grande puissance et tension de sortie +compatible et intégrable +compacité et solitude [15]	- matériaux chers et difficiles à utiliser - vieillissement

#### **I.3.4.5- Synthèse sur la récupération mécanique**

Après avoir comparé les méthodes de récupération de L'énergie mécanique on conclue que L'omniprésence de cette énergie, les mécanismes qui lui sont associés, la qualifie d'avantageuse, encore ce type de source ne nécessite des liaisons mécaniques simples avec l'objet en vibration, contrairement à la différence de température et les rayonnements ou le couplage du générateur avec la source est souvent très difficile.

Les différents paramètres dont dépend cette récupération sont :

- La fréquence et l'amplitude des vibrations,
- Le déplacement relatif ou la déformation,
- Le circuit électronique associé.

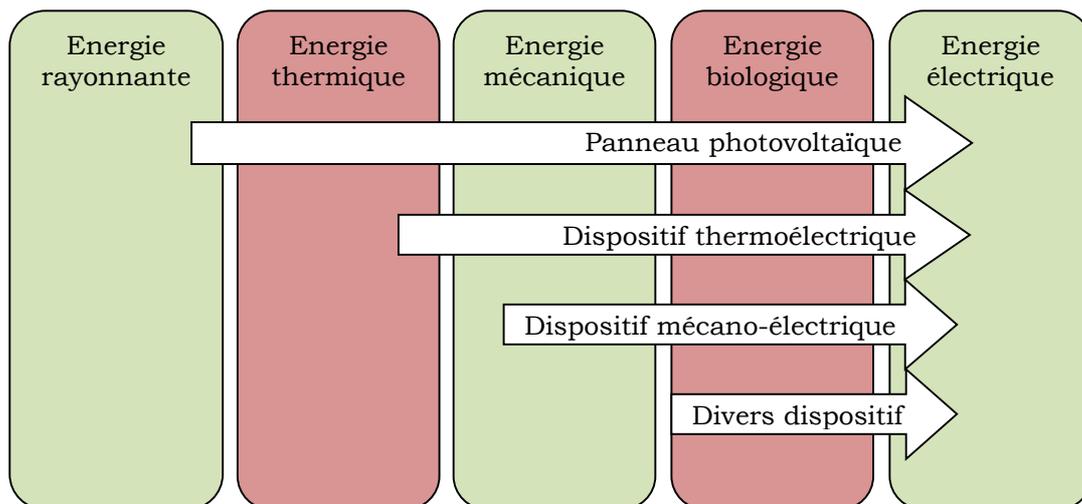
En conséquence les paramètres énumérés ci-dessus entraînent la nécessité de maîtrise dans ce cas de récupération.

#### I.4- Potentialité énergétique

D'après le tour fait autour des potentialités énergétiques récupérables disponibles une synthèse généraliste et récapitulative est très difficile d'être tirée du fait de la diversité des situations.

De même, il est impossible de classer les sources d'énergie, car leur disponibilité diffère suivant l'environnement dans lequel se trouve.

Toutefois pour chacune des sources, des voies à privilégier en fonction de leur innovation, efficacité, miniaturisation, faisabilité et les enjeux qui les affrontent peuvent être décrites, la figure (I-9) synthétise [16] :



**Figure I-9** : Synthèse de potentialité énergétique ambiante

#### I.5- Enjeux de la récupération d'énergie ambiante

La récupération de l'énergie ambiante semble être très avantageuse présentant ainsi plusieurs attraits, cependant les enjeux à relever et les défis qui peuvent freiner cette alternative sont à dénombrer :

- La nécessité de technologies pointues, très avancées et complexes,
- Le coût d'investigation dans cet axe,

- Le niveau de puissance récupérable est modeste devant la croissance en consommation d'énergie,
- La crainte des utilisateurs des réseaux de transiter vers les notions de smart grid et smart dust,

### **I.6- Autonomie en énergie**

La notion d'autonomie s'attache aux aspects relatifs à l'énergie, la communication, la permanence et l'indépendance.

Dans l'ordinaire cette notion est assurée par une autre qui est le stockage par batteries. En effet, la capacité de ces dernières est limitée en poids et en volume et elles ne permettent pas toujours de satisfaire les contraintes d'autonomie dont la durée de vie doit être de plusieurs années, ceci malgré l'accroissement des performances des moyens de stockage.

Cette limitation montre l'intérêt de l'autonomie en énergie, C'est pour cela que la récupération d'énergie apparaît être une alternative pour substituer les solutions actuelles.

En effet, en comparaison avec l'énergie stockée dans les batteries, l'environnement représente une source d'énergie relativement illimitée.

### **I.7- Stockage d'énergie**

Le stockage de l'énergie est une problématique importante dans de nombreuses applications (télécommunication, appareils médicaux, véhicules électriques...), ce en vue de l'assurance de l'autonomie de ces dernières.

Les techniques de stockage de l'électricité diffèrent selon les besoins en fonction de :

- La nature de l'application : stationnaire ou embarquée,
- La durée du stockage : court ou long terme,
- Le type de production.

### I.7.1- Différentes techniques de stockage

Le stockage requiert des systèmes d'accumulation mécaniques, magnétiques, électrochimiques résumé ainsi dans la figure si dessous :

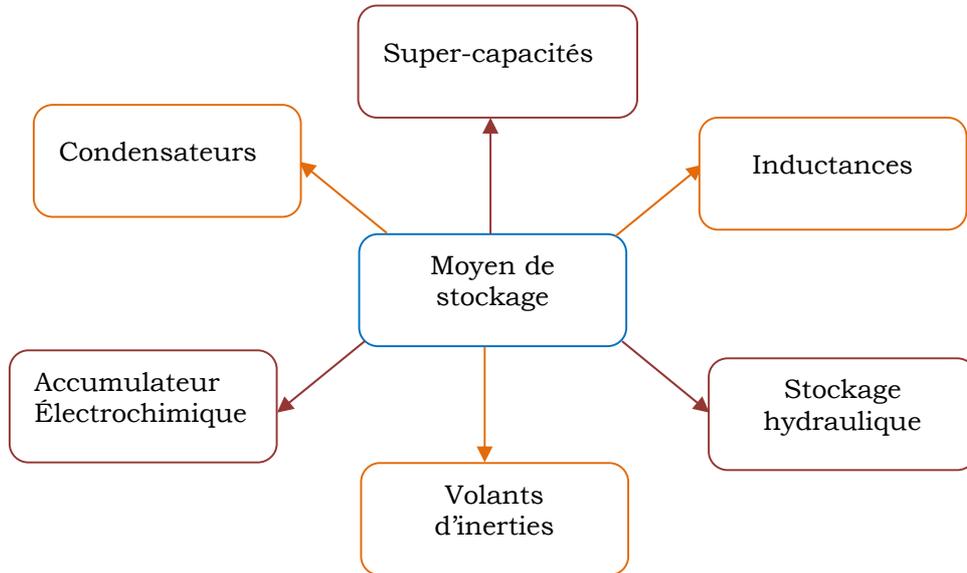


Figure I-10: Différents systèmes de stockage

### I.7.2- Comparaison des moyens de stockage

Le tableau suivant récapitule la comparaison des différents moyens de stockage [17] :

**Tableau I-4** : Avantages et inconvénients des trois types de conversion

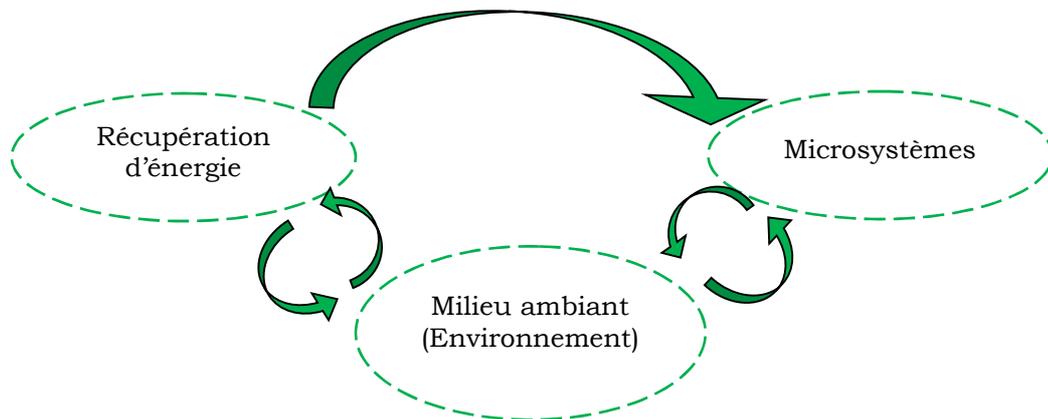
Performance	Accumulateur électrochimique	Inertiel	Inductif	Condensateur	Super-capacité
Densité d'énergie [Wh/kg]	[30 - 120]	25	4	[10 - 100]	[1 - 10]
Densité de puissance [w/kg crête]	[80 - 10 <sup>3</sup> ]	2*10 <sup>3</sup>	28*10 <sup>6</sup>	>10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>
Cyclabilité	50-1500 %	Très élevée	Très élevée	Très élevée	Elevée
Temps de charge/décharge	15min-5h	1min	<1ms	μs-ms	1s-30s
Durée de stockage	qq jours-qqmois	Qqmin	>1h	Qqs	Qqmin
Cout [€/kwh]	[150-1500]	>150	/	qq5	qq10
Rendement%	[60-65],[70-80]	90-95	/	>95	85-98

A partir de ce tableau il apparait que les technologies de stockage offrent des fonctions différentes, certaines permettent de rendre des systèmes autonomes, d'autres peuvent fournir des puissances importantes sur une durée plus ou moins longue.

Pour des durées supérieures à la seconde les super-condensateurs sont efficaces.

### I.8- Récupération d'énergie et microsystemes

Les sources ambiantes fournissent une quantité d'énergie à l'échelle microscopique, cette énergie est comparable à la consommation des 'microsystemes', voir la figure (I-11), dont l'autonomie énergétique est un caractère fort à satisfaire.

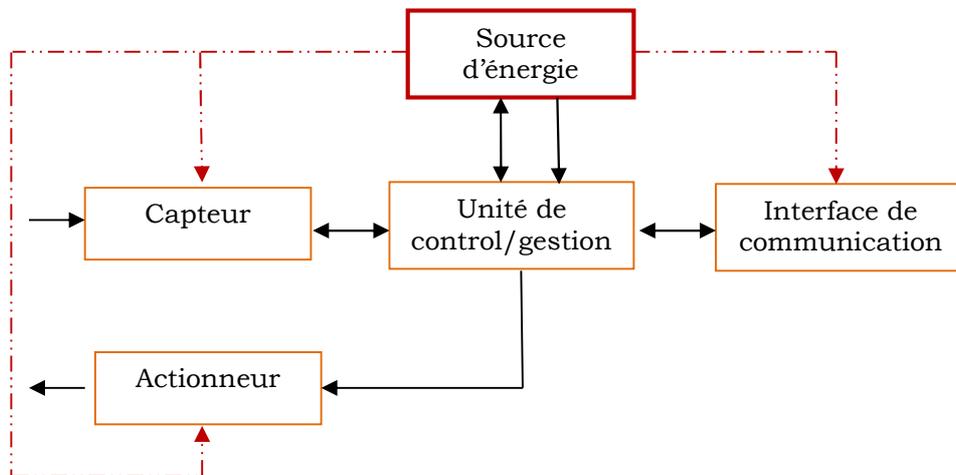


**Figure I-11** : Interaction entre microsystemes, récupération d'énergie et environnement

Les microsystemes sont des systèmes complexes qui présentent un fort caractère pluridisciplinaire car ils intègrent différentes technologies liées à l'électronique, la mécanique, l'énergétique, l'automatique, etc. Cette hétérogénéité est donc source de complexité [17].

De plus, Les microsystemes sont le siège d'interactions relatives à l'association des sous systèmes, et à la cohabitation de divers phénomènes physiques. Ils 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 microsystèmes proches. Le schéma de la figure (I-12) représente ainsi ces interactions.



**Figure I-12 :** Architecture d'un microsystème: communication source d'énergie- autre constituants .

Les caractéristiques des microsystèmes sont:

- Performance et fonctionnalités nouvelles,
- Diminution de la taille et du poids,
- Consommation en énergie diminuée et performances améliorées,
- Conception requérant de nombreux acteurs, outils et méthodes [18].

## I.9- Conclusion

Dans cette initiative du manuscrit nous avons donné un aperçu global du contexte de la récupération d'énergie de l'environnement qui est un concept assez large particulièrement prometteur, il occupe toute une place dans :

- Les enjeux énergétiques,
- Les générateurs d'innovation permanente,
- Les solutions permettant le recyclage d'énergie.

Nous avons présenté au préalable les différentes formes d'énergies potentiellement exploitables liées au contexte, puis on s'y étendu sur la

récupération mécanique d'énergie plus particulièrement les vibrations (déplacement) dont trois types de convertisseurs mécano électrique lui sont associés.

Nous avons par la suite combiné la récupération d'énergie avec les systèmes miniaturisés, en vue de la basse puissance 'produite par récupération et consommée par ces systèmes miniaturisés '.

Cette partie a pu donc nous percevoir sur le fait que la récupération d'énergie par voie ambiante constitue une solution durable à l'optimisation de l'énergie électrique, est un remède au problème de stockage.

## **II- Théorie des aimants**

## II.1- Introduction

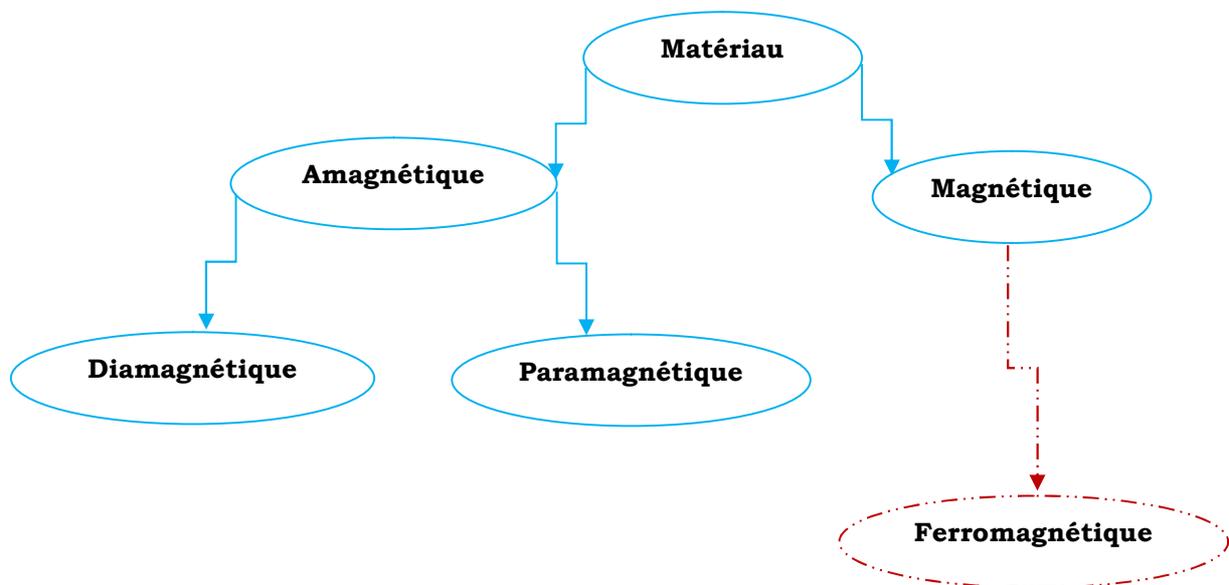
Compte tenu de l'intégration des phénomènes électromagnétiques dans le contexte globalement introduit au chapitre récupération de l'énergie, un parcours de vocabulaire lié à cette approche sera enchaîné dans ce chapitre de manière brève, quelques notions de matériaux magnétiques, d'hystérésis et d'aimantation seront abordées.

Ce vocabulaire se focalise largement sur les aimants permanents leurs caractéristiques, les divers technologies existantes, plus particulièrement les aimants terres rares. Ainsi, le modèle mathématique équivalent régissant ces dipôles magnétiques.

## II.2- Matériaux magnétiques

### II.2.1- Classification des matériaux magnétiques

Selon le comportement magnétique du matériau en présence du champ extérieur et les notions de la physique quantique qui traite l'échelle microscopique des phénomènes, découlent trois principaux types de matériaux classifiés comme suit [19] :



**Figure II-1** : Classification des matériaux magnétiques

### II.2.1.1- Matériaux Diamagnétiques

Ce sont des matériaux, figure (II-2.a), peu sensibles au champ magnétique extérieur, ils induisent un moment magnétique faible et opposé à la direction de ce champ, ce qui explique pourquoi les corps diamagnétiques se trouvent repoussés par les aimants.

### II.2.1.2- Matériaux paramagnétiques

Ce sont des matériaux qui ne possèdent pas d'aimantation en l'absence de champ magnétique extérieur car les moments magnétiques de leurs atomes s'orientent au hasard, figure (II-2.b). Placés dans un champ magnétique, les paramagnétiques acquièrent une faible aimantation dans le même sens que le champ. Ils sont donc attirés par les aimants [20][21].



a. Diamagnétique

b. Paramagnétique

**Figure II-2** : Représentation de matériaux amagnétiques

### II.2.1.3- Matériaux ferro-ferrimagnétiques

Les ferromagnétiques sont constitués d'une seule structure cristalline [21](mono domaine) et sont caractérisés par des moments magnétiques forts et permanents qui tendent à s'aligner parallèlement les uns aux autres, figure(II-3.b), tandis que les ferrimagnétiques sont constitué de deux structures cristallines ayant de moments de modules différents avec des orientations antiparallèles, figure(II-3.a). Ils présentent une aimantation globale non nulle même en l'absence d'un champ extérieure.



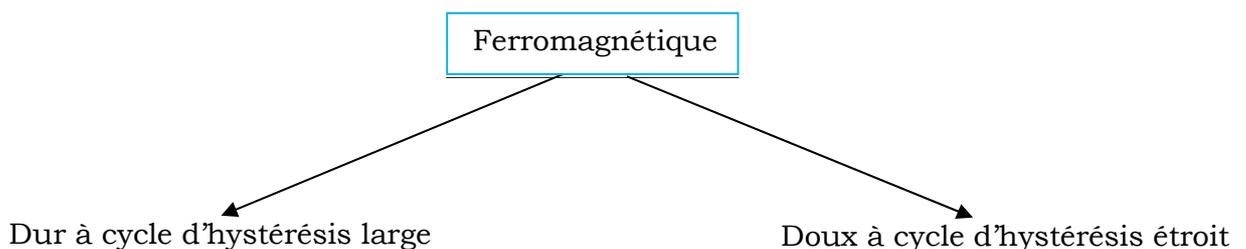
**Figure II-3** : Représentation des matériaux magnétiques

Une comparaison de ces types en terme de leurs susceptibilités ( $\chi$ ) [21] [22] se résume dans le tableau ci après :

**Tableau II-1** : Susceptibilité magnétique des matériaux amagnétiques

Type de matériaux	Susceptibilité magnétique	Exemple
Diamagnétiques	$\chi < 0 \sim (-10^{-5})$	Cu, Zn, Si
Paramagnétiques	$\chi > 0 \sim (10^{-5} \text{ à } 10^{-3})$	Pt, Na, Al
Ferromagnétiques	$\chi > 0 \sim (50 \text{ à } 1000)$	Fe, Co, Ni
Ferrimagnétiques	$\chi > 0 \sim (3000)$	FeO, ZnO, MnO

Pratiquement, seuls les matériaux ferro-ferrimagnétiques sont à l'origine des moments assez importants ainsi de susceptibilité et d'aimantation élevée pour présenter un intérêt technologique.



**Figure II-4** : Matériaux ferromagnétiques

#### II.2.1.4- Ferromagnétique dur

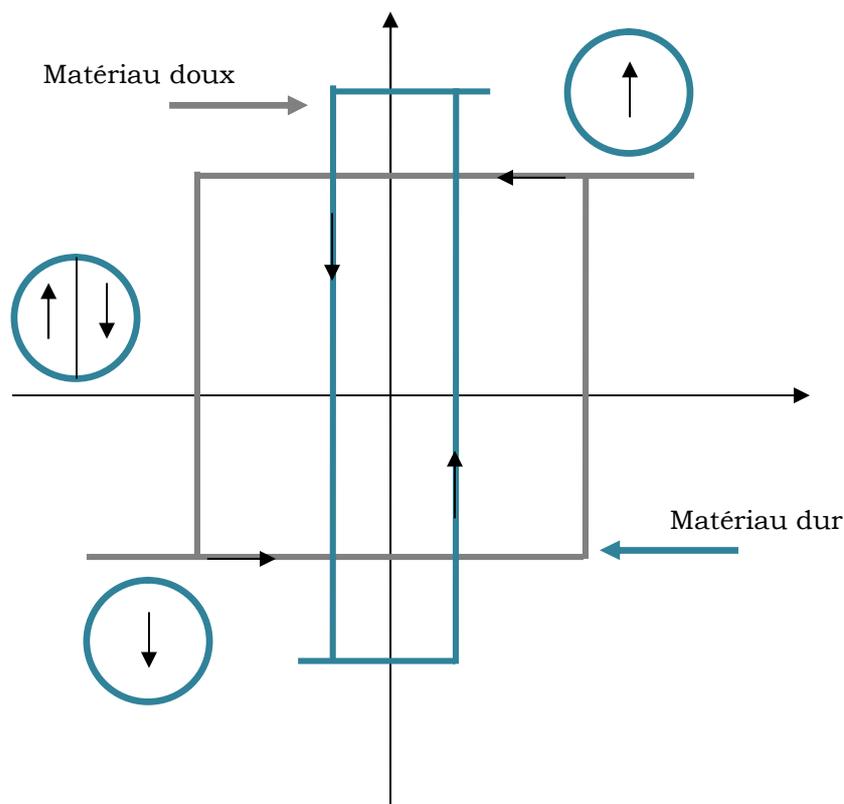
La catégorie dure du ferromagnétique est caractérisée par une coercivité beaucoup plus grande, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers

d'ampères par mètre. Cette catégorie est utilisée comme source de flux ou pour la fabrication d'aimants permanents [20][21][24].

### II.3- Processus d'aimantation et cycle d'hystérésis

L'état global d'aimantation du matériau est donné par l'orientation relative de la direction de l'aimantation des domaines. Le mouvement des parois de ces domaines magnétiques est le principal mécanisme de variation de l'aimantation, et est troublé par la présence des défauts dit cristallins de nature (surfactive, linéique et ponctuelle) [23].

L'aimantation du matériau présente un caractère hystérétique qui est dû au déplacement irréversible des parois des domaines [24], L'application d'un champ magnétique donne naissance au cycle d'aimantation classique connu hystérésis(H) comme présenté dans la figure en dessous [7][24].



**Figure II-5 :** Cycle d'hystérésis idéale de matériaux doux et durs

Ce cycle est toujours parcouru dans le même sens et varie selon les conditions expérimentales (champ d'excitation, température...), mais aussi tous les états antérieurs. Ce qui revient à dire que le cycle d'hystérésis n'est pas une caractéristique propre du matériau magnétique [25].

## II.4- Aimant permanent

### II.4.1- Historique ancien

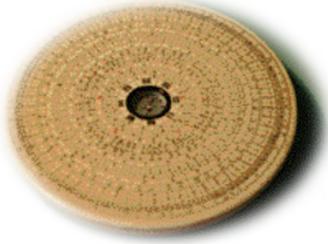
Le mot Aimant doit son origine au latin « Adamas » qui signifie fer, diamant. En Chine, puis un peu plus tard en Grèce, les hommes découvrent une pierre noire, la pierre d'aimant appelée « magnétite : oxyde de fer », figure (II-6). Cette pierre a l'insolite pouvoir d'attirer le fer, et encore a la capacité de lui transmettre son pouvoir [26].



**Figure II-6** : La pierre d'aimant

La première utilisation des aimants fut vraisemblablement en Chine en l'an 4000 avant Jésus-Christ en sa qualité de compas pour indiquer au voyageur la route, figure (II-7.a), ou pour des cérémonies religieuses figure (II-7.b) [27].

La magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) n'est pas le seul composé d'aimant, les mêmes propriétés ont été trouvées dans de nombreux autres composés minéraux.



a : Compas indicatrice au voyageur de la route



b : Compas des cérémonies religieuses.

**Figure II-7** : Utilisation ancienne de l'aimant

#### **II.4.2- Historique récent**

Un peu plus récent vers le XIIe siècle apparaissent en Europe les premiers aimants artificiels en fer, et peu de progrès ont été faits dans ce domaine jusqu'au années 1930.

Les matériaux utilisés étaient alors des aciers durs chrome, au tungstène ou au cobalt, caractérisés par la traditionnelle forme en U. Les progrès technologiques réalisés au cours des quatre-vingts dernières années ont complètement révolutionné les possibilités des aimants permanents.

De nouveaux types ont été découverts et industrialisés, les applications ont pu se multiplier dans de nombreux domaines, de l'automobile à l'électroacoustique, de l'horlogerie à l'industrie minière, de l'électroménager au jouet [28].

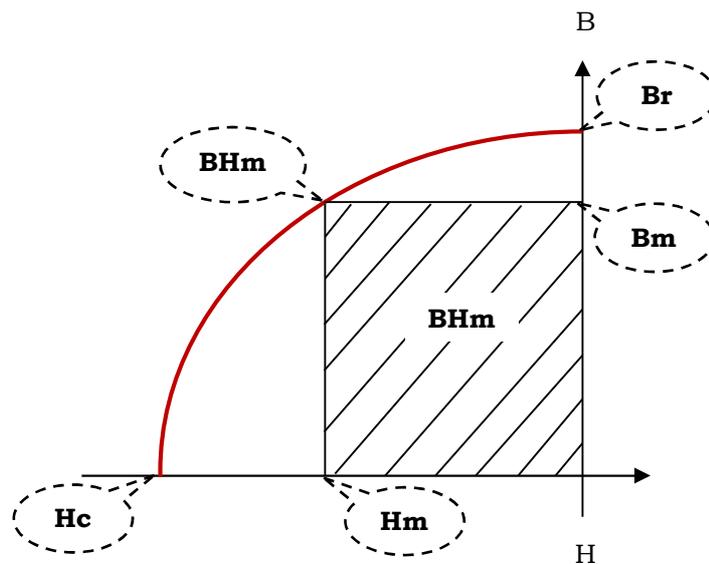
#### **II.4.3- Propriétés des aimants**

##### **II.4.3.1- Grandeurs magnétiques**

- **Br** (champ rémanent ou induction résiduelle) : C'est une indication de la polarisation intrinsèque de l'aimant, c'est le champ magnétique persistant dans le matériau en l'absence de l'excitation magnétique (H).

- **H<sub>c</sub>** (champ coercitif de l'induction) : C'est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable.
- **BH<sub>m</sub>** (densité d'énergie volumique) : C'est l'énergie maximale qui peut être emmagasinée dans un aimant, et qui correspond au produit énergétique maximum entre l'induction B et l'excitation H. L'unité utilisée est le méga Gauss Oersted MGOe ou KJ/m<sup>3</sup>.
- **F(H<sub>m</sub>, B<sub>m</sub>)** (point Evershed) [28] : Correspond au point de fonctionnement optimal[27]. Le rapprochement de ce point permet de minimiser le volume de l'aimant.

Ces propriétés sont illustrées sur la figure B(H) ci après :



**Figure II-8** : Propriétés techniques de l'aimant

#### II.4.3.2- Effet de la température

La sensibilité accrue de l'aimant est décrite par deux facteurs significatifs :

- **T<sub>c</sub>** : Il s'agit de la température de Curie, au-dessus de laquelle le matériau perd ses propriétés magnétiques permanentes de façon

irréversible. Contrairement à la température maximale  $T_m$  qui permet la réversibilité facile de l'aimantation.

- $\alpha(Br)$  : il s'agit du coefficient de température de (Br) qui désigne la variation du champ par degré de température, donné par :

$$\alpha(Br) = \frac{1}{Br} \times \frac{\Delta Br \times 100}{\Delta T^\circ} \quad [ \%K^{-1} ]$$

Un coefficient  $\alpha(Br)$  qui vaut  $0.2 \%K^{-1}$  signifie qu'un écart de température de  $100^\circ C$  va engendrer une variation de 20 % de Br [28].

**Tableau II-2** : Principales caractéristiques magnétiques des familles d'aimants

Type	Br(T)	Hc(Oe)	BHm(MGOe)	$\alpha(Br)(\%K^{-1})$	Tm(°C)	Tc(°C)
<b>NdFeB</b>	1.28	1.23	40	-0.12	80	310
<b>SmCo</b>	1.05	0.92	26	-0.04	300	750
<b>Alnico</b>	1.25	0.064	5.5	-0.02	540	800
<b>Ferrite</b>	0.39	0.32	3.5	-0.2	280	460

Le tableau en dessus donne les principales caractéristiques magnétiques des familles d'aimants.

#### II.4.4- Différentes technologies d'aimant

##### II.4.4.1- Les Alnico

C'est les matériaux les plus anciens, ils sont formés d'un alliage à base de fer, d'Aluminium de **nickel** et de **cobalt**. Ils se caractérisent par une haute induction rémanente, avec une valeur faible du champ coercitif, voir le tableau (II-2). Ces aimants se dégradent facilement avec le temps, de plus, ils sont assez chers à fabriquer du fait de l'utilisation du Cobalt [28][29][30].

##### II.4.4.2- Les ferrites

Ils sont obtenus par frittage et sont composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ces aimants possèdent des performances Modestes : bon

marché, très stables, relativement cassant, très résistant à la corrosion, faible prix de revient et rigidité magnétique élevée.

Malgré leur aimantation rémanente faible ainsi que leur produit énergétique comme indiqué dans le tableau (II.2), ils se sont imposés dans de très nombreuses applications [26][28][31].

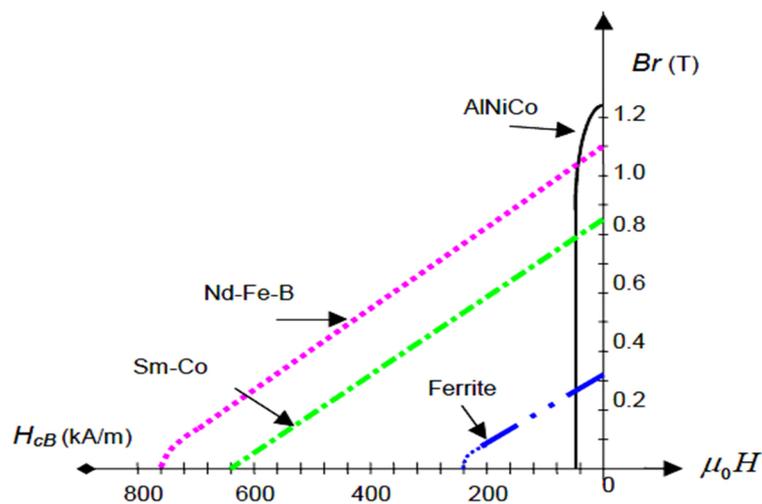
#### II.4.5- Terres rares

Aujourd'hui, ces matériaux se révèlent indispensables au développement de moyens de transports, moins polluants et à l'émergence des énergies vertes [32].

Leur nom est plutôt paradoxal puisque ces éléments ne sont en fait ni des terres, ni rare ! mais :

- Terres : à cause de leur abondance dans l'écorce terrestre.
- Rares : à cause de leur concentration trop faible pour l'exploitation [33].

Ces aimants se caractérisent par une induction rémanente et un champ coercitif élevé, ainsi qu'une caractéristique  $B(H)$  quasiment linéaire dans le second quadrant tel que la figure (II.9) le représente.



**Figure II-9** : Courbe de désaimantation des quatre classes d'aimant

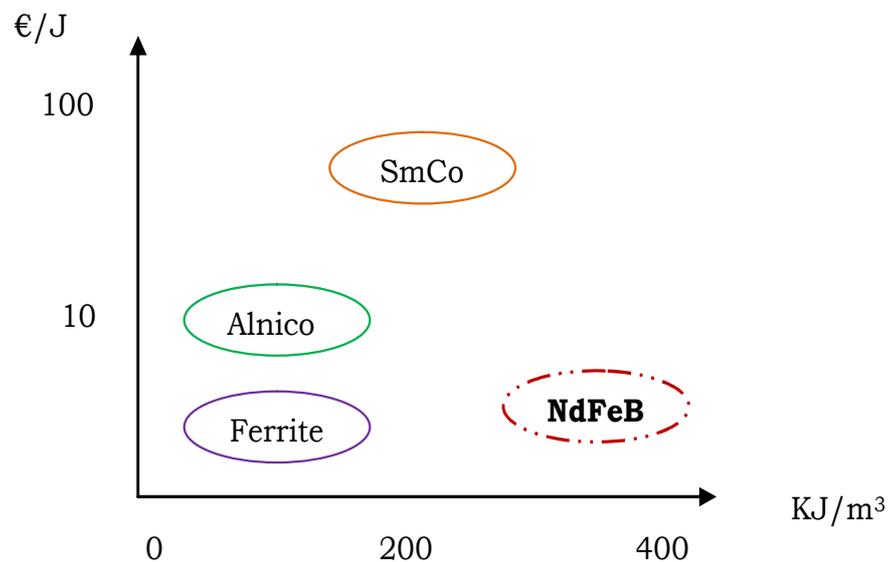
Ils sont beaucoup plus performants en termes de densité volumique d'énergie et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C) ils sont :

- Très stables,
- Très Puissants,
- Coûteux en raison de la présence du cobalt dans leur composition,
- Sensibles à la corrosion et difficiles à usiner.

#### A- Néodyme-Fer-Bore (NdFeB)

Ces aimants existent sous forme frittés avec une température allant de 150° à 200°. Ils possèdent de sérieux atouts : tout d'abord leur aimantation très élevée dépasse 1,28 T, leur produit (BHm) franchit les 40MGOe (tableau II.6).

Les NdFeB, fournissent l'énergie au meilleur coût par rapport au SmCo, figure (b), car ils ne contiennent pas (ou peu) de cobalt, mais très sensibles à l'oxydation (simple contact avec l'air), il convient donc de les protéger en surface, pour améliorer la qualité de la tenue en température et de la résistance à l'oxydation [34][35].



**Figure II-10** : Le Coût en fonction de l'énergie volumique fournie des principales familles d'aimants permanents

## B- Samarium-Cobalt (SmCo)

Cette famille d'aimant offre de bonnes performances, mais c'est la famille la plus chère au marché. L'utilisation du Cobalt permet d'augmenter la température de Curie à  $750^{\circ}\text{C}$ ,  $S_{0n}(\text{BHm})$  dépasse  $40\text{MGOe}$  comme indiqué au tableau (II-2). Les Samarium-Cobalt ont une excellente fiabilité en milieu corrosif. Malgré le développement des NdFeB dont le coût est plus réduit, les aimants samarium-cobalt sont toujours utilisés. Ils occupent des créneaux que les aimants NdFeB, figure(a), n'arrivent pas à atteindre des domaines comme l'aéronautique ou le domaine militaire [28].



a : NdFeB



b : SmCo

**Figure II-11** : Aimant terre

### II.5- Cause de désaimantation et vieillissement

La désaimantation est un phénomène de contre nature durant l'exploitation. Ceci est dû à la modification de la structure interne constituant le matériau et au présent paramètres :

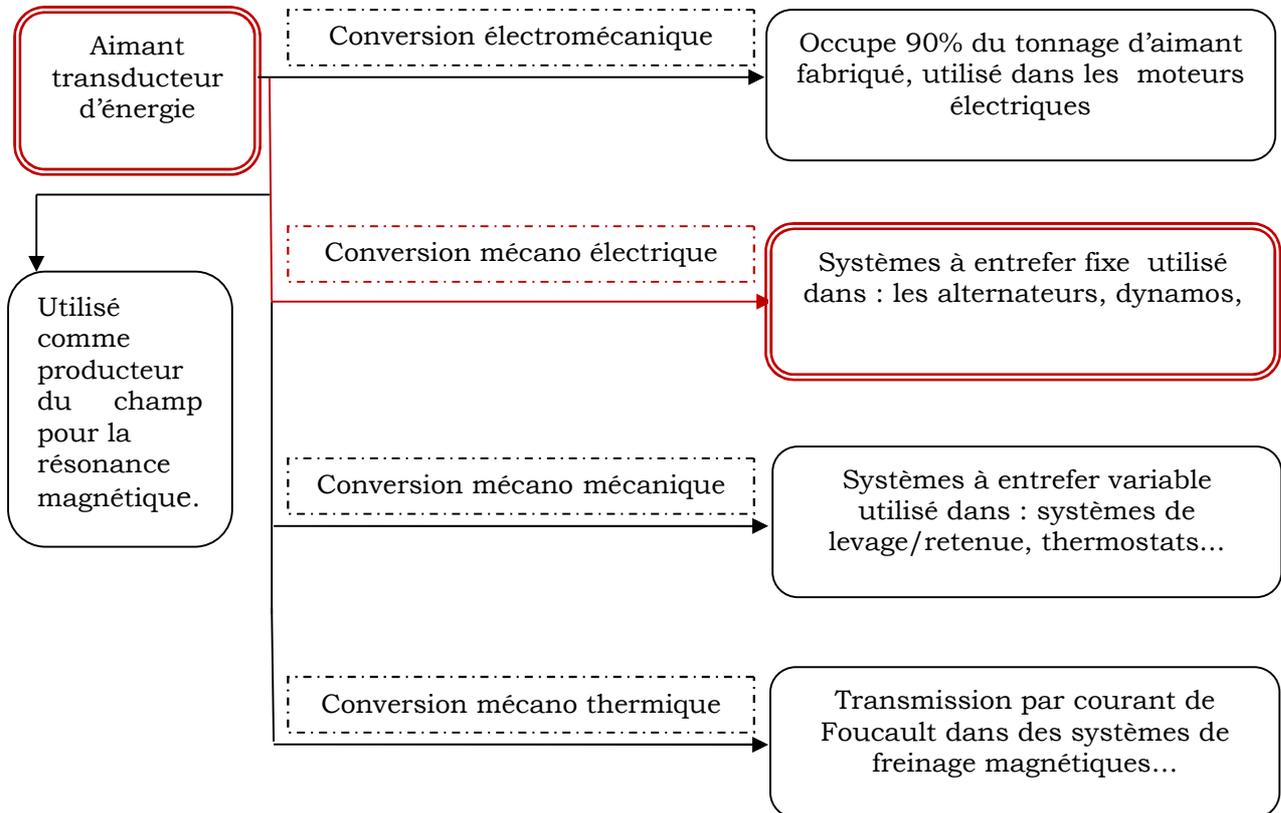
- paramètre température : la température excessive engendre des pertes partielles d'aimantation et influe sur l'échelle microscopique.
- Paramètre mécanique : les surcharges mécaniques, les chocs, et les vibrations.

Au cours de l'utilisation, l'aimant se vieillit surtout dans les machines électriques dont la nécessité d'augmenter la vitesse induit à la démagnétisation de la machine et donc de l'aimant [30].

## II.6- Place des aimants dans la technologie électrique

Ils sont utilisés comme convertisseurs d'énergie d'une forme à une autre sans perdre leur propre énergie [36].

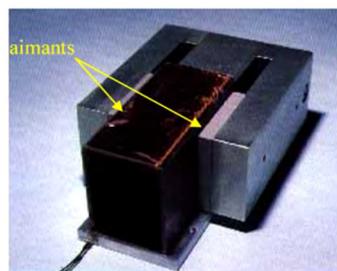
Les applications sont présentées sur le diagramme suivant ainsi sur la figure (II-13) :



**Figure II-12** : Différentes conversions d'énergies par l'intermédiaire des aimants



a : Disque dur d'un ordinateur



b : Actionneur à bobine mobile



c : moteur industriel

**Figure II-13** : Différentes applications des aimants permanents

## II.7- Modélisation d'un aimant permanent

### II.7.1- Principe d'équivalence

Un aimant engendre un champ magnétique, de même que celui engendré par un courant circulant dans des spires. Si une source de champ magnétique constituée d'un conducteur parcouru par des courants, engendre la même répartition spatiale de champ qu'un aimant, alors ces deux entités sont équivalentes, car aucun moyen de mesure ne peut les différencier [37].

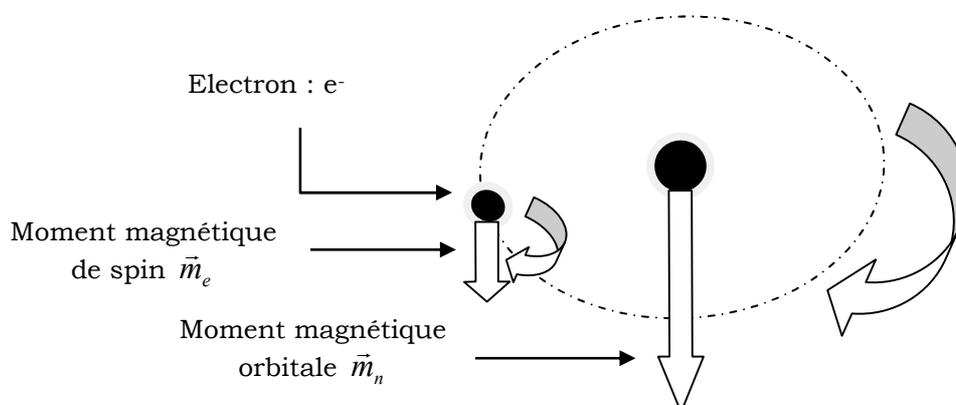
### II.7.2- Modèle Ampérien

Consiste à considérer que le magnétisme des corps trouve son explication dans les courants élémentaires créés par les électrons gravitant autour du noyau.

Le modèle est basé sur l'analogie entre une boucle de courant, qui crée un champ magnétique et un très grand nombre d'électrons décrivant chacun des cercles autour de leur noyau comme l'illustre la figure ci-dessous.

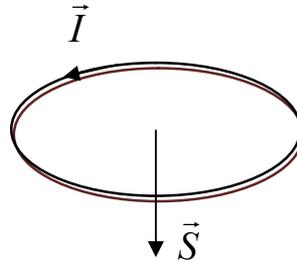
Le moment magnétique  $\vec{m}$  a deux origines :

- Mouvement orbital autour du noyau  $\vec{m}_n$ .
- Mouvement de rotation de l'électron sur lui-même  $\vec{m}_e$ .



**Figure II-14** : Moments magnétiques orbitale et de spin

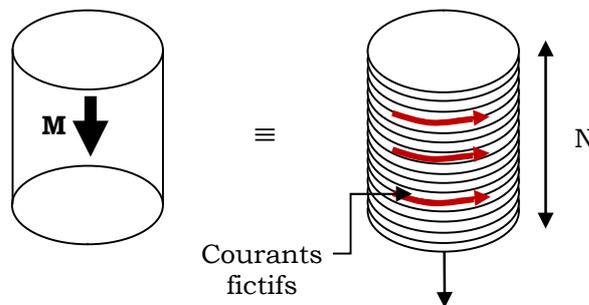
Ce moment magnétique est équivalent à celui d'une spire fermée de surface  $S$  parcourue par un courant  $I$  comme le montre la figure (II-15) et dont la formule est donnée par l'équation (II.1).



**Figure II-15** : spire de courant de moment magnétique  $\vec{m}$

$$\vec{m} = \vec{I} \cdot \vec{S} \quad (\text{II.1})$$

De façon simplifiée le modèle ampérien a pour conséquence l'équivalence à une bobine mince fictive de  $N$  spires, ainsi que l'aimantation  $M$  est identique à une distribution de courants fictifs (courants ampériens) comme illustré dans figure (II-15) [38] :

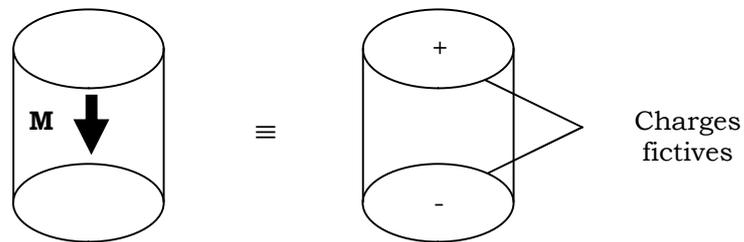


**Figure II-16** : Modèle ampérien d'un aimant permanent

### II.7.3- Modèle coulombien

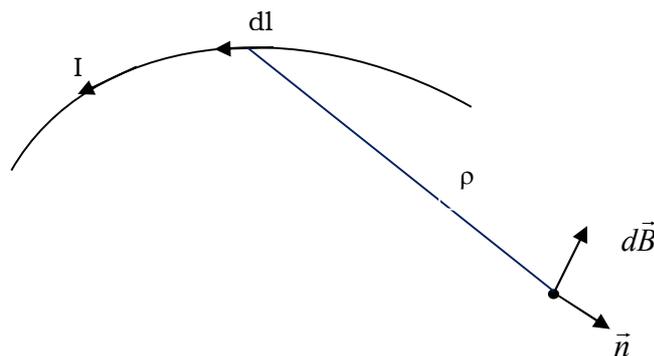
Le modèle coulombien selon la figure (II-17) a pour conséquence l'équivalence entre l'aimantation et la densité de charge magnétique. L'aimantation axiale du disque est remplacée par des charges fictives

localisées dans ses faces supérieures et inférieures, ce modèle est emprunté à l'électrostatique.



**Figure II-17 :** Modèle ampérien d'un aimant permanent

Ces deux modèles sont généralement basés sur l'application de la loi de Biot Savart, donnée par la figure (II-18) et l'équation (II.2).



**Figure II-18 :** Représentation relative à la loi de Biot

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

#### II.7.4- Équations de maxwell exploitées

Les phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell. Dans le cas étudié, nous nous limitons aux milieux non diélectriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} r\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (a) \\ r\vec{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (b) \\ \text{div}\vec{B} = 0 \quad (c) \end{array} \right. \quad (II.3)$$

### II.7.5- Relations constitutives des milieux

Des relations supplémentaires doivent venir compléter les équations de Maxwell en fonction des propriétés spécifiques des milieux auxquels on les applique:

- Dans le vide :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \mu_0\vec{H} \quad (a) \\ \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} \quad (b) \end{array} \right. \quad (II.4)$$

- Dans un milieu magnétique :

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

- Dans un milieu diélectrique :

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

- Dans un milieu conducteur :

$$\vec{E} = \sigma\vec{J} \quad (II.7)$$

### II.7.6- Mise en équation du modèle ampérien

Êtant donné :

$\vec{m}$  : Moment magnétique (A/m<sup>2</sup>)

$\vec{M}$  : Aimantation magnétique (A/m)

$\vec{P}$  : Polarisation magnétique (T)

$\vec{J}$  : Densité surfacique du courant (A/m<sup>2</sup>)

$\tau_a$  : Volume de l'aimant (m<sup>3</sup>)

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide ( $4\pi 10^{-7}$  H.m<sup>-1</sup>).

Le comportement de l'aimant est principalement caractérisés par le quart du plan pour lequel  $H < 0$  et  $B > 0$ , (deuxième quadrant) du cycle B(H).

Comparativement à la relation (II.4.a)

$$\vec{P} = \mu_0 \vec{M} \quad (II.8)$$

Où  $\vec{P}$  est la polarisation magnétique et  $\vec{M}$  est l'aimantation magnétique qui représente la densité volumique des moments magnétiques telle que :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\tau_a} \quad (II.9)$$

Dans la matière aimantée, l'induction magnétique s'écrit comme suit :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{P} \quad (II.10)$$

En remplaçant la relation (II.8) dans (II.10), on arrive :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (II.11)$$

En négligeant le courant de déplacement dans l'équation de Maxwell-Ampère (II.3.a), on écrit :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (II.12)$$

Comme l'aimant est une matière aimantée et isolante donc la densité de courant est nulle ( $\vec{J} = 0$ ). Dans ce cas, l'équation de Maxwell-Ampère devient:

$$\text{rot} \vec{H} = 0 \quad (II.13)$$

De l'équation (II.11), on écrit :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad (II.14)$$

En remplaçant l'excitation magnétique donnée ci-dessus, dans l'équation (II.13), on obtient :

$$r\vec{\partial}t\vec{B} = \mu_0 r\vec{\partial}t\vec{M} \quad (II.15)$$

En pratique, l'approche ampérienne est privilégiée dans les situations où il n'y a pas de matière aimantée et le champ est dû exclusivement à un courant volumique équivalent :

$$\vec{J}_{\acute{e}q}^{\tau_a} = r\vec{\partial}t\vec{M} \quad (II.16)$$

Dans le cas des courants surfaciques, comme dans notre cas, la densité de courant équivalente est donnée par :

$$\vec{J}_{\acute{e}q}^S = \vec{J}_{\acute{e}q} = \vec{M} \times \vec{e}_\rho \quad (II.17)$$

### II.7.7- Formulation en potentiel vecteur A

De l'équation (II.3.c), on déduit que l'induction magnétique dérive d'un potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = r\vec{\partial}t\vec{A} \quad (II.18)$$

Pour assurer l'unicité de ce potentiel, on le contraint à respecter la jauge de coulomb :

$$\text{div}\vec{A} = 0 \quad (II.19)$$

Ainsi, on peut déduire la loi de Biot et Savart appliquée au potentiel vecteur magnétique pour décrire l'effet magnétique des aimants, tel que :

$$d\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{J}_{\acute{e}q} d\tau \times \vec{e}_\rho}{\rho} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{M} d\tau \times \vec{e}_\rho}{\rho^2} \quad (II.20)$$

En remplaçant l'aimantation par son expression donnée en équation (II.9), on aboutit :

$$d\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{m} \times \vec{e}_\rho}{\rho^2} \quad (II.21)$$

## **II.8- Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons mis en évidence plusieurs notions de matériaux magnétiques relativement à leurs classification et propriétés ainsi qu'un étendu sur les aimants permanents.

Ces derniers constituent un domaine large d'étude car leur utilisation est de plus en plus dominante dans beaucoup de pratiques industrielles ; ceci grâce à l'apparition d'aimants dits terres rares, qui présentent des caractéristiques remarquables, telles que la rigidité d'aimantation, l'énorme énergie et les champs coercitifs élevés.

## **III- Modélisation et résultats**

### III.1- Introduction

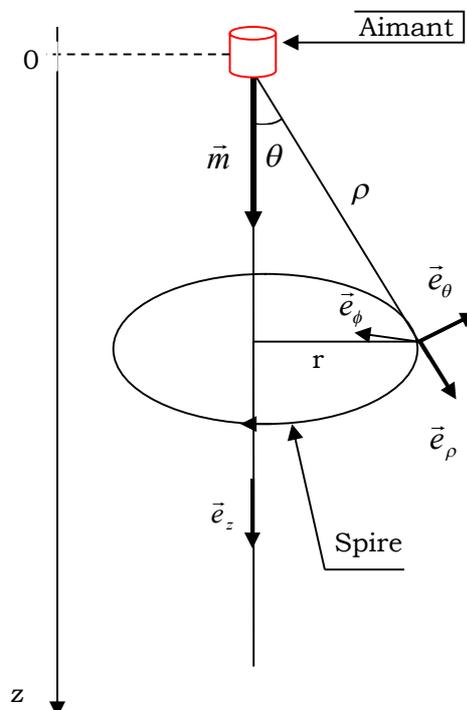
Le chapitre précédent constitue le point de départ du modèle à élaborer. Les grandeurs régissant ce modèle sont soumises aux phénomènes de la mécanique, du magnétisme ainsi que de l'électricité ; le modèle donc peut porter le nom d'un convertisseur mécano-magnéto-électrique. Son fonctionnement se résume au mouvement d'un aimant permanent à l'intérieure d'une bobine induisant une force électromotrice.

Dans ce chapitre, nous développons dans un premier temps les formulations aboutissant à la modélisation et dans un second temps, nous implantons cette modélisation dans un environnement MATLAB qui permet d'extraire les résultats et leur exploitation.

### III.2- Modèle de la conception

#### III.2.1- Géométrie du système

Le modèle géométrique de la conception est représenté sur la figure ci après :



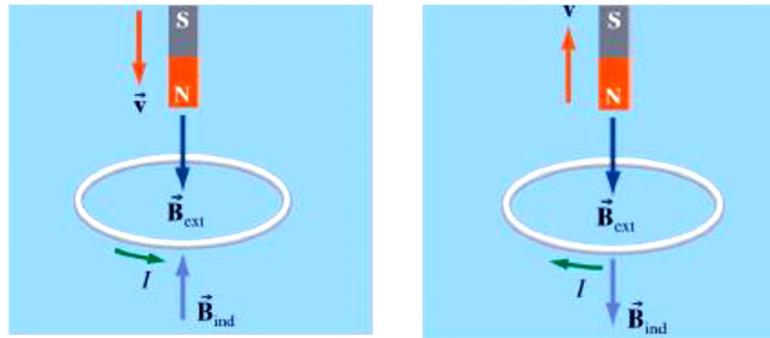
**Figure III-1** : Schéma descriptif du modèle

Un petit aimant, situé au point 0, est lâché sans vitesse initiale. L'aimant est représenté par un moment magnétique  $\vec{m}$ , qui au cours du mouvement reste toujours vertical et dirigé vers le bas.

Son abscisse au cours de la chute est notée  $z(t)$ , l'axe Oz étant orienté suivant la verticale descendante de la pesanteur  $\vec{g}$ .

La spire est repérée par ses coordonnées sphériques  $(\vec{e}_\rho, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi)$ . L'orientation positive du circuit est choisie suivante  $\vec{e}_\phi$ .

Les deux phases de mouvement de l'aimant sont illustrées dans la figure en dessous :



a : Aimant en chute

b : Aimant en montée

**Figure III-2** : Phases du mouvement de l'aimant

### III.2.2- Potentiel vecteur magnétique

Selon l'équation (II.21) et le schéma représentatif de la figure (III.1), le calcul du potentiel vecteur  $\vec{A}$  en un point de la spire en faisant varier la source du champ magnétique (mouvement de l'aimant) le potentiel se calcul ainsi :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \times \vec{e}_\rho}{\rho^2} \quad (III.1)$$

En exprimant l'opérateur du produit vectoriel, on peut écrire :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 m \sin \theta}{4\pi \rho^2} \vec{e}_\phi \quad (III.2)$$

Selon le schéma de la figure (III-1) :

$$\rho = \frac{r}{\sin \theta} \quad (III.3)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 m \sin^3 \theta}{4\pi r^2} \vec{e}_\varphi \quad (III.4)$$

En considérant l'aimantation axiale de l'aimant uniforme, on obtient :

$$d\vec{m} = \vec{M} d\tau_a \Rightarrow m = M\tau_a \quad (III.5)$$

A la place de l'aimantation  $\vec{M}$  les spécialistes des matériaux préfèrent utiliser généralement la polarisation  $\vec{P}$  ou encore la rémanence donnée par :

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}_r}{\mu_0} \quad (III.6)$$

$$\tau_a = \pi h \left( \frac{D}{2} \right)^2 \quad (III.7)$$

D : Diamètre de l'aimant en [mm]

h : Hauteur de l'aimant [mm]

### III.2.3- Champ d'induction magnétique

L'aimant, qui est source du champ, crée un champ magnétique dans l'espace donné par l'équation (III.9) :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{\rho})\vec{\rho} - \vec{m}\rho^2}{\rho^5} \quad (III.9)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\rho^2 m \cos \theta \vec{e}_\rho - (m \cos \theta \vec{e}_\rho - m \sin \theta \vec{e}_\theta)\rho^2}{\rho^5} \quad (III.10)$$

En développant la formule précédente on obtient :

$$\vec{B} = \begin{cases} B_\rho = \frac{2\mu_0 m \cos\theta}{\rho^3} \Rightarrow B_\rho = \frac{2\mu_0 M \tau \cos\theta}{\rho^3} \Rightarrow B_\rho = \frac{2\mu_0 M \tau \cos\theta \sin^3 \theta}{r^3} \\ B_\theta = \frac{\mu_0 m \sin\theta}{\rho^3} \Rightarrow B_\theta = \frac{\mu_0 M \tau \sin\theta}{\rho^3} \Rightarrow B_\theta = \frac{\mu_0 M \tau \sin^4 \theta}{r^3} \end{cases} \quad (III.11)$$

### III.2.4- Flux magnétique

Le mouvement de l'aimant engendre une variation de flux  $\phi$  dans la spire et donc crée une force électromotrice induite entraînant la naissance d'un courant induit dans cette spire si cette dernière est fermée.

La loi de conservation de flux donne :

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \Rightarrow \phi = \iint r \vec{\omega} t \vec{A} \cdot d\vec{S} \quad (III.12)$$

$$\phi = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (III.13)$$

En remplaçant ainsi le potentiel calculé dans l'équation (III.13) et l'élément  $d\vec{l}$  de la spire on obtient :

$$\phi = \oint A \vec{e}_\varphi \cdot r d\varphi \vec{e}_\varphi \Rightarrow \phi = 2\pi r A \quad (III.14)$$

Le flux est donc formulé comme suit :

$$\phi = 2\pi r A \Rightarrow \phi = \frac{\mu_0 m \sin^3 \theta}{2 r} \quad (III.15)$$

### III.2.5- Champ électromoteur

Pour établir l'expression du champ électromoteur, nous exploitons l'équation de Maxwell-Faraday (II.3.b) et l'équation (II.21) pour une spire fermée :

$$\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt} \quad (III.16)$$

En faisant intervenir l'angle de déplacement :

$$\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} = -\frac{3\mu_0 m}{4\pi r^2} v \sin^2 \theta \cos \theta \frac{d\theta}{dz} \quad (III.17)$$

En tenant compte de la relation :

$$\frac{d\theta}{dz} = -\frac{\sin^2 \theta}{r} \quad (\text{III.18})$$

On trouve :

$$\vec{E} = \frac{3\mu_0 m}{4\pi r^3} v \sin^4 \theta \cos \theta \vec{e}_\varphi \quad (\text{III.19})$$

### III.2.6- Force électromotrice induite

La variation du flux donne naissance à une force électromotrice induite donné par la loi de Lenz-Faraday :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi r A}{dt} \quad (\text{III.20})$$

En faisant intervenir l'angle de déplacement ainsi le déplacement  $z$  l'expression de la force électromotrice devient :

$$e = -\frac{d\left(\frac{\mu_0 m \sin^3 \theta}{2r}\right)}{dt} \cdot \frac{d\theta}{d\theta} \cdot \frac{dz}{dz} \quad (\text{III.21})$$

$$e = -\frac{3\mu_0 m}{2r^2} \cdot v \cdot \sin^4 \theta \cos \theta \quad (\text{III.22})$$

En fonction du déplacement  $z$  La formule décrite par l'équation (III.22) peut se reformuler ainsi :

$$e = -\frac{3\mu_0 m r^2}{2} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} v \quad (\text{III.23})$$

### III.2.7- Élément de courant $di$

L'élément du courant induit dans la spire par le champ électromoteur est donné par la loi d'ohm locale décrite dans l'équation (III.24) :

$$J = \sigma E = \frac{di}{ds} \Rightarrow di = \sigma E ds \Rightarrow di = \sigma E a dz \quad (\text{III.24})$$

En faisant intervenir l'équation du champ électromoteur de l'équation(III.19), on obtient :

$$di = -\sigma\gamma \frac{3\mu_0 m}{4\pi r^2} v \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \quad (III.25)$$

$\sigma$  : La conductivité

$a$  : L'épaisseur de la spire

### III.2.8- Force de Laplace

L'interaction entre le moment magnétique de l'aimant et le courant induit engendre une force de Laplace dont l'expression est donné par :

$$d\vec{F} = di \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (III.26)$$

En remplaçons  $\vec{B}$  par ces composantes, on abouti a :

$$d\vec{F} = di \cdot 2\pi r \cdot B_\rho \vec{e}_\theta - di \cdot 2\pi r \cdot B_\theta \vec{e}_\rho \quad (III.27)$$

En Faisant la projection selon l'axe du mouvement de l'aimant, on obtient :

$$d\vec{F} = \left( di \cdot 2\pi r \cdot B_\rho \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + di \cdot 2\pi r \cdot B_\theta \cos \theta \right) \vec{e}_z \quad (III.28)$$

En simplifiant cette équation, on aura :

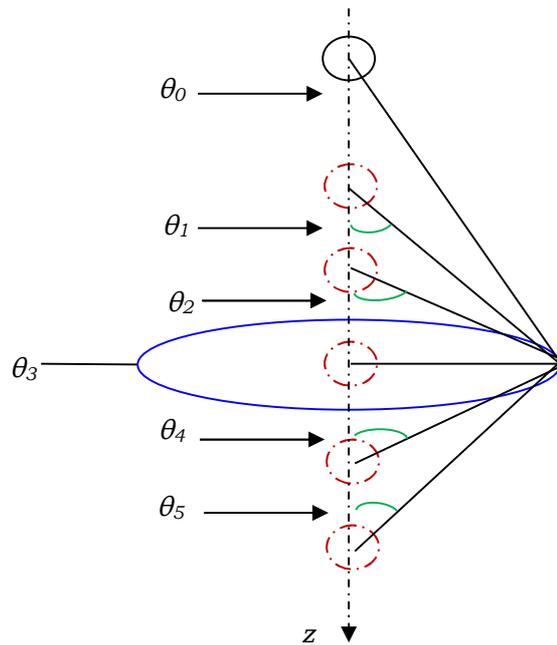
$$d\vec{F} = \left( -\frac{3\mu_0 m}{2r^2} \sin^4 \theta \cos \theta di \right) \vec{e}_z \quad (III.29)$$

En remplaçant l'équation (III.25) de l'élément de courant dans (III.29), on abouti :

$$d\vec{F} = \frac{9\sigma\gamma(\mu_0 m)^2}{8\pi r^4} v \sin^6 \theta \cos^2 \theta d\theta \vec{e}_z \quad (III.30)$$

$$\begin{cases} K = \frac{9\sigma\gamma(\mu_0 m)^2}{8\pi r^4} v & (a) \\ d\vec{F} = K \sin^6 \theta \cos^2 \theta d\theta \vec{e}_z & (b) \end{cases} \quad (III.31)$$

Lors de la chute de l'aimant, l'angle  $\theta$  varie par rapport aux points de la spire selon la figure en dessous :



**Figure III-3** : Variation de l'angle  $\theta$  avec le mouvement de

$\theta \in [0, \pi]$ , à  $\theta_3$  l'aimant passe à l'intérieure de la bobine. Cette angle correspond à  $\frac{\pi}{2}$  :

$$\vec{F} = K \int_0^{\pi} \sin^6 \theta \cos^2 \theta d\theta \vec{e}_z \quad (\text{III.32})$$

L'intégrale de la force est alors donné par :

$$\vec{F} = \frac{9\sigma a (\mu_0 m)^2}{8\pi r^4} \frac{5\pi}{128} \cdot v \vec{e}_z \quad (\text{III.33})$$

Cette force est donné par :

$$\vec{F} = \alpha v \vec{e}_z \quad (\text{III.34})$$

L'équation (III.34) montre que cette force est une force de freinage de coefficient  $\alpha$ , équivalente à la force de frottement visqueux qui s'oppose au mouvement. Le coefficient  $\alpha$  est donné par :

$$\alpha = \frac{45}{1024} \sigma a \cdot \left( \frac{\mu_0 m}{r^2} \right)^2 \quad (\text{III.35})$$

Tel que  $\alpha$  est le coefficient de proportionnalité de la force de Laplace et la vitesse de l'aimant.

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 :

$$m\vec{g} + \alpha v \vec{e}_z = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (\text{III.36})$$

En projetons cette équation sur l'axe  $Oz$ , on obtient :

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + \frac{\alpha}{m} v(t) = g \\ \tau = \frac{m}{\alpha} \\ \tau \frac{dv}{dt} + v(t) = g \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

La solution de cette équation différentielle est :

$$v(t) = v_{par}(t) + v_{gener}(t) \quad (\text{III.38})$$

La vitesse particulière est donné par :

$$v(t)_{par} = \frac{mg}{\alpha} \quad (\text{III.39})$$

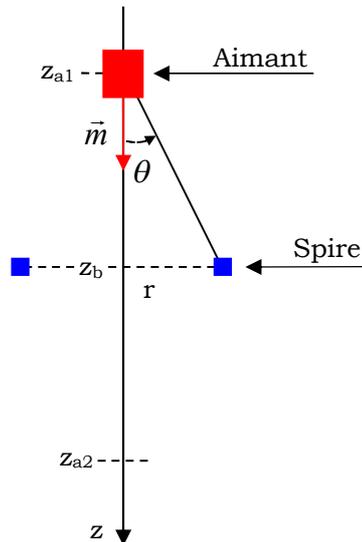
La formule générale de la vitesse est donc :

$$v(t) = -v(t)_{par} e^{-\frac{t}{\tau}} + v(t)_{par} \Rightarrow v(t) = \tau g \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (\text{III.40})$$

### III.3- Résultats

#### III.3.1- Modèle géométrique 2D

A partir de la figure (III.1), nous déduisons le modèle géométrique à deux dimensions (2D) du système à étudier qui est donné par la figure suivante.



**Figure III-4** : Schéma descriptif du modèle en 2D

#### III.3.2- Données géométrique et électromagnétiques

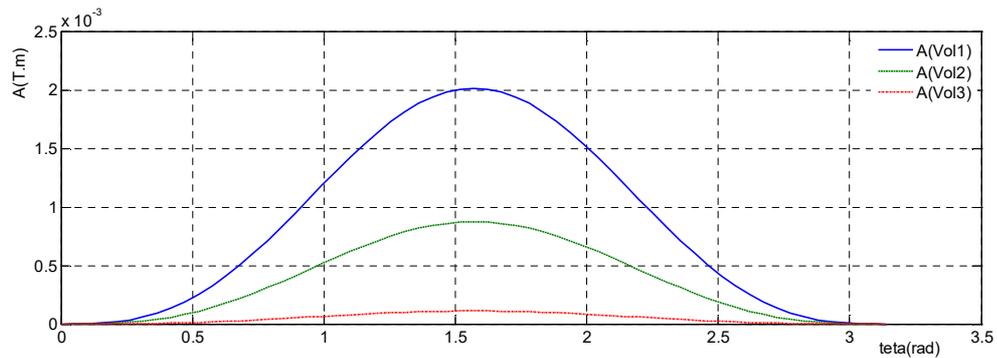
Après l'élaboration du modèle mathématique du récupérateur mécano électrique, les résultats de cette partie sont obtenus selon les paramètres du tableau (III.1) :

**Tableau III-1** : Données géométriques et électromagnétiques

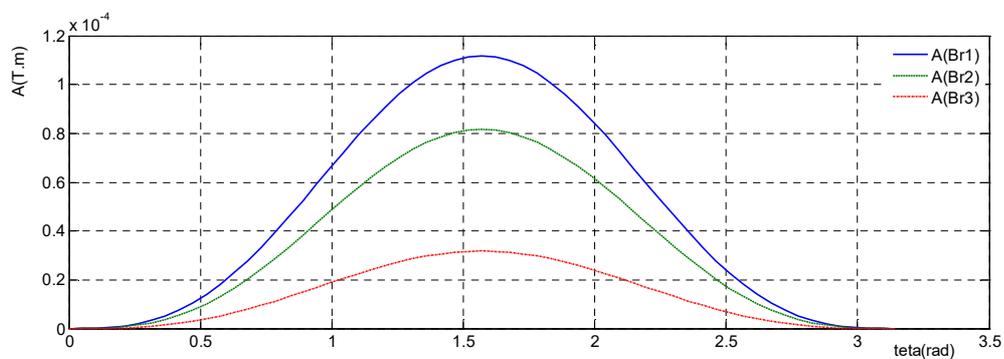
		Test 1	Test 2	Test 3
<b>Caractéristiques de l'aimant</b>	$z_{a1}$ (mm)	0		
	$z_{a2}$ (mm)	0.05		
	Hauteur (mm)	8	5	1
	Diamètre (mm)	6	5	4
	Masse (kg)	$0.29 \cdot 10^{-3}$		
	Rémanence (T)	1.37	1	0.39
<b>Caractéristiques de la spire</b>	Rayon (mm)	3	6	12
	Conductivité $(\Omega \cdot m)^{-1}$	$5.8 \cdot 10^7$		

### III.3.3- Potentiel vecteur A

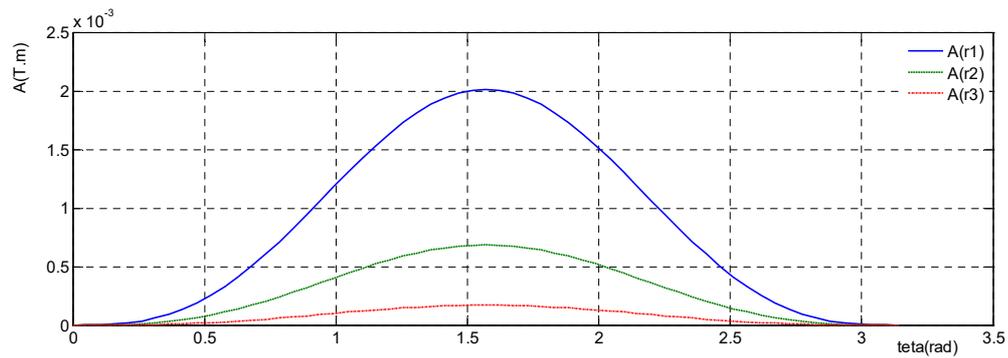
La représentation du potentiel vecteur donné par l'équation (III.4) est représentée dans les figures (III-4), (III-5), (III-6), respectivement pour des valeurs différentes de volume (Vol), de rémanence ( $B_r$ ) de l'aimant et de rayon de la spire.



**Figure III-5 :** Potentiel vecteur A en fonction de l'angle pour des différentes dimensions de l'aimant



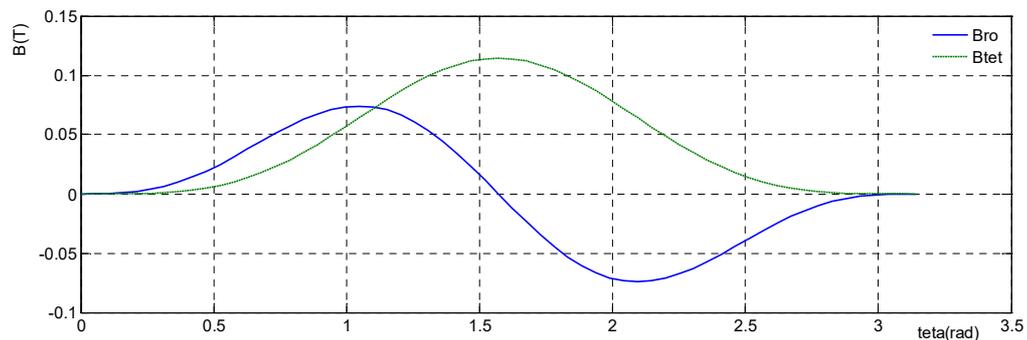
**Figure III-6 :** Potentiel vecteur A en fonction de l'angle pour les différents champs rémanents



**Figure III-7 :** Potentiel vecteur A en fonction de l'angle pour les différents rayons de la spire

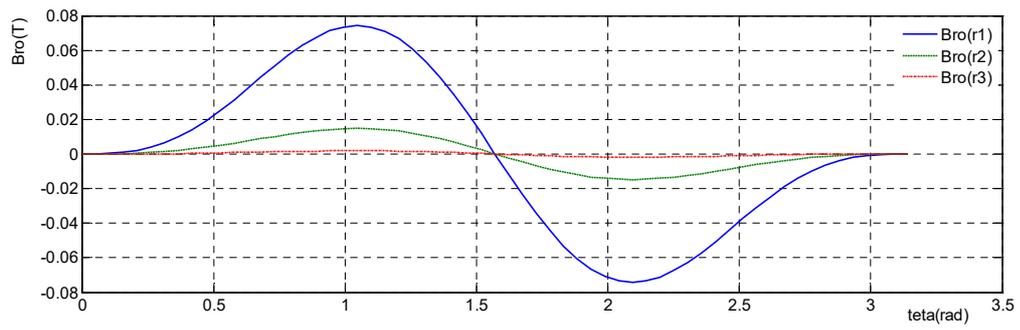
### III.3.4- Champ magnétique B

Les composantes du champ magnétique  $\vec{B}$  sont représentées dans la figure ci après :

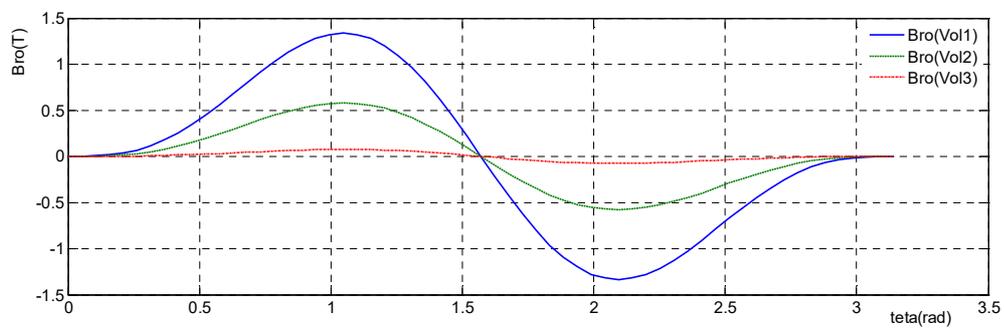


**Figure III-8 :** Composantes du champ magnétique généré par l'aimant

La composante radiale donnée par l'équation (III.11) est représentée dans la figure(III.9), pour des rayons de spire et des volumes différents



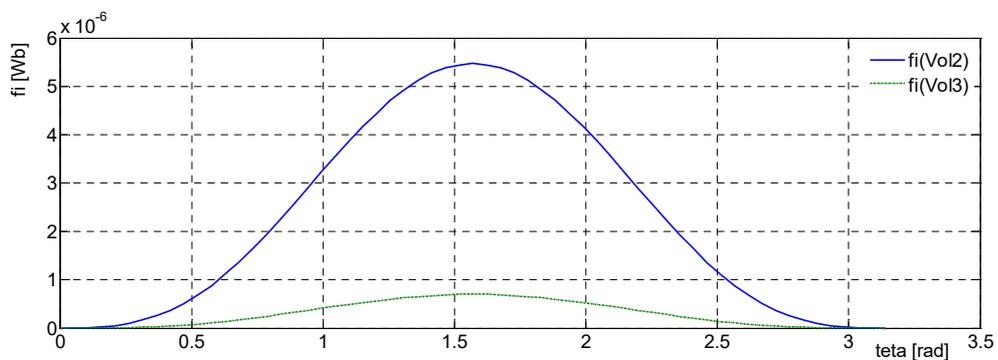
**Figure III-9** : Composante radiale en fonction de l'angle pour les différents rayons de la spire



**Figure III-10** : Composante radiale pour les différentes dimensions de l'aimant

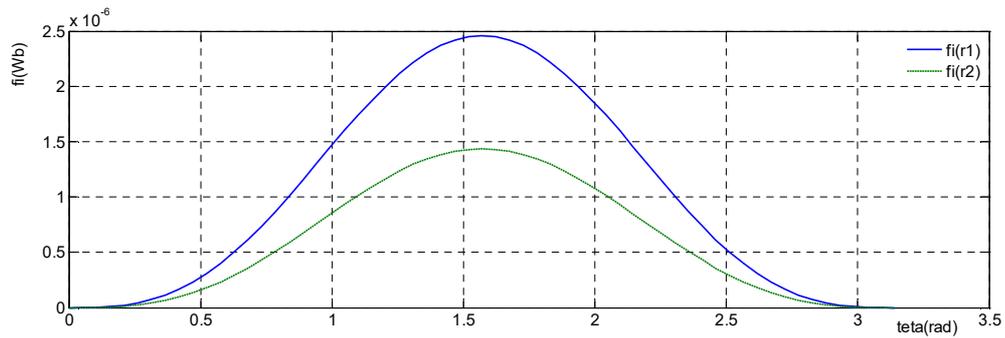
### III.3.5- Flux magnétique

La variation du flux magnétique selon l'angle de déplacement en faisant varier le rayon de la spire est comme illustré dans la figure (III.11).



**Figure III-11** : Flux pour les différentes dimensions

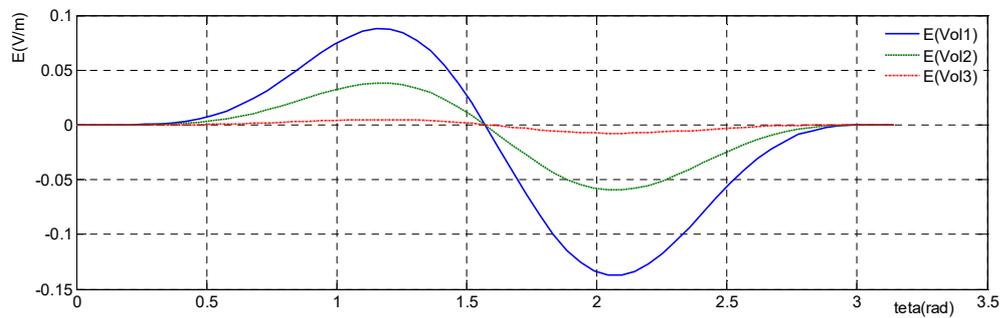
Ainsi le flux selon le rayon de la spire est représenté sur la figure (III-12) :



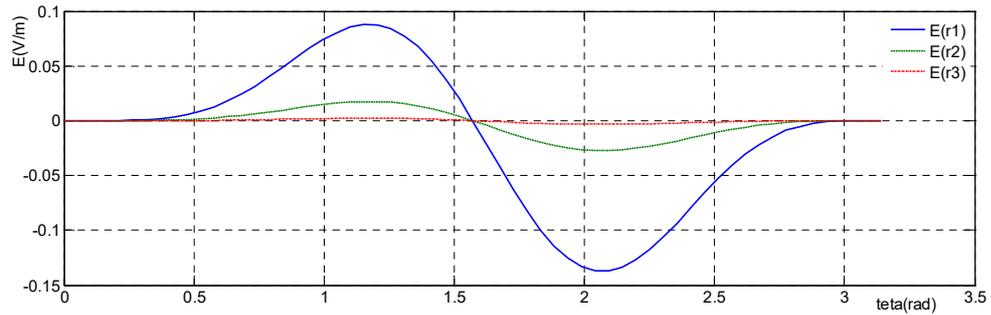
**Figure III-12** : Flux pour des rayons de spire différents

### III.3.6- Champ électromoteur

L'équation du champ électromoteur développée dans l'équation (III.19) est traduite sur les figures ci-dessous pour les différentes dimensions et différents rayons de spire.



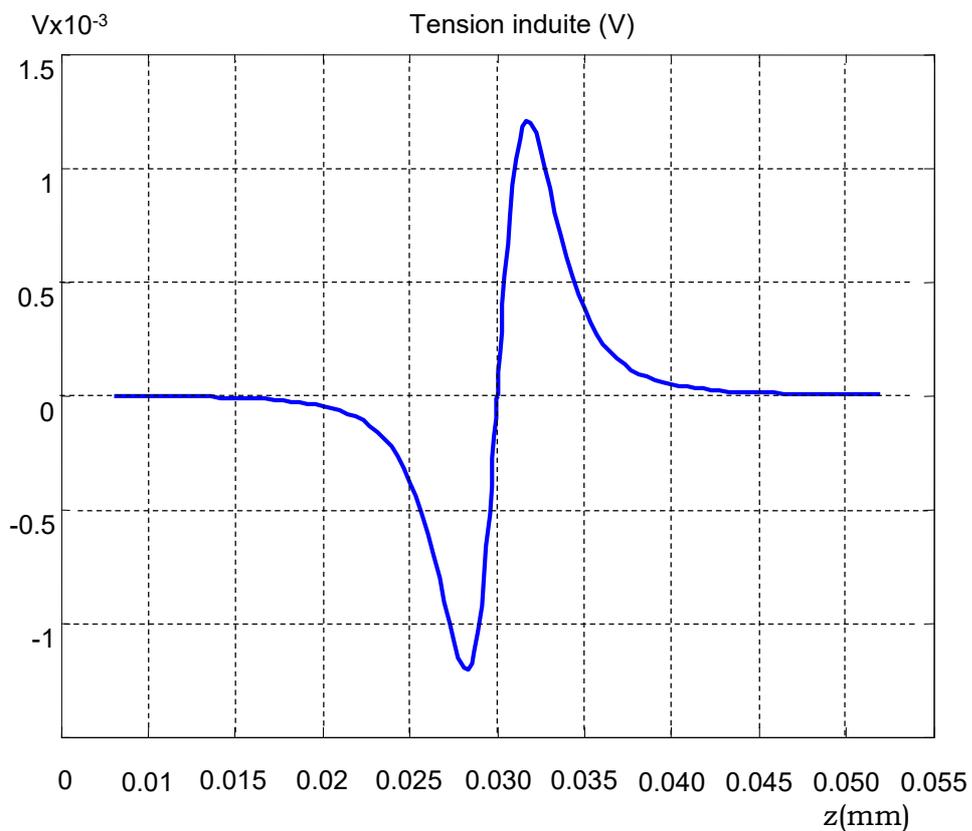
**Figure III-13** : Champ électromoteur induit en fonction de l'angle pour différentes dimensions



**Figure III-14 :** Champ électromoteur induit en fonction de l'angle pour différents rayon

### III.3.7- Force électromotrice

Après le cheminement suivi et les équations élaborées, le tracé de la force électromotrice est comme représentée sur la figure (III.15).



**Figure III-15 :** Force électromotrice induite en fonction du déplacement  $z$

### III.4- Conclusion

La présente étude concerne la modélisation d'une conception dédiée à la récupération d'une énergie mécanique. La conversion de cette dernière en énergie électrique est assurée par le mouvement d'un aimant à travers une bobine.

Les résultats obtenus mènent aux interprétations suivantes :

1. Quand l'aimant s'approche de la spire :

- Le flux augmente, le sens du courant induit est tel que par ces effets s'oppose au flux qui lui a donné naissance, la force électromotrice est donc négative.
- La force sur l'aimant est négative (force de freinage ou de repousse), l'action entre l'aimant et la spire est une répulsion, c'est l'équivalent de deux aimants nord-nord ou sud-sud

2. Quand l'aimant s'éloigne de la spire :

- Le flux diminue, le sens du courant est donc positif ainsi que la force électromotrice.
- La force sur l'aimant est toujours négative et tend toujours à le freiner, l'action entre l'aimant et la spire est donc une attraction, c'est l'équivalent de deux aimants nord-sud ou sud-nord.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La thématique de récupération de l'énergie ambiante est assez large et particulièrement prometteuse. Elle a toute sa place dans les problématiques des nouveaux enjeux énergétiques. Elle est aussi génératrice d'innovation permanente.

S'inscrivant dans cette thématique, le travail réalisé dans ce mémoire consiste à l'étude théorique d'un récupérateur d'énergie présente dans l'environnement humain et basé sur une conversion mécano-magnéto-électrique dédié à une micro-génération d'électricité.

Dans la première partie introductive, nous avons cité les potentialités énergétiques existantes dans le milieu ambiant, plus en détail l'énergie mécanique issue des vibrations et les différentes techniques de conversions de ces dernières. La technique de transduction électromagnétique est une technique ancienne de génération d'électricité par induction magnétique. D'autres thématiques différentes complémentaires ont été aussi exposées comme celles des microsystèmes, de l'autonomie ainsi du stockage.

A fin de répondre à cette technique de transduction, une part conséquente de ce travail a consisté en deuxième partie à élaborer la théorie des aimants, source du champ magnétique.

Dans le dernier chapitre, nous avons, dans la première partie, élaboré un modèle mathématique basé sur la loi de Biot et Savard et des formulations simplifiées basées sur le dipôle magnétique. Dans la seconde partie, nous avons présenté les résultats des calculs sous forme de courbes issues d'un programme implanté sous environnement MATLAB.

Les résultats obtenus montrent bien qu'on peut facilement récupérer de l'énergie électrique à travers le déplacement d'un aimant. Pour mettre en pratique ce phénomène, nous pouvons imaginer que le mouvement de l'aimant peut-être généré par le déplacement d'un homme.

En perspectives, le modèle peut-être élargie pour des forces d'excitation mécaniques quelconques autre que la pesanteur et voir un système à plusieurs bobines.

## RÉFERNES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LOSSEC Marianne, « Systèmes multi sources de récupération d'énergie dans l'environnement humain: modélisation et optimisation du dimensionnement », Thèse de doctorat en Électronique - Électrotechnique – Automatique, École Normale Supérieure De Cachan, juillet 2011.
- [2] MEDDAD Mounir, « Étude de l'énergie renouvelable dans l'environnement humain pour alimenter les systèmes électroniques portables », Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas – Sétif (UFAS), 2012.
- [3] DEFOSSEUX Maxime, « Conception et caractérisation de micro générateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes », Thèse de docteur en Micro&Nano Electronique, université de Grenoble, octobre 2011.
- [4] AHMED SEDDIK Bouhadjar, « Systèmes de récupération de l'énergie vibratoire large bande », Thèse de doctorat, université de Grenoble, Octobre 2012.
- [5] BOUSSETTA Hela, « Modélisation multi-physiques et simulation globale de systèmes autonomes sur puce », Thèse de doctorat en cotutelle internationale, Institut polytechnique de Grenoble et l'Université du 7 Novembre à Carthage, février 2011.
- [6] BADEL Adrien, « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire », Thèse de doctorat, école doctorale de l'université de Savoie, France, 2003.
- [7] COTTINET Pierre-Jean, « Actionnement et récupération d'énergie à l'aide de polymères électro-actifs », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Novembre 2010.

- [8] BOISSEAU Sébastien, « Récupération d'énergie vibratoire à électrets », thèse Docteur Micro et Nano Electronique (MNE), Université de Grenoble, Octobre 2011.
- [9] PAQUIN Simon, «Modélisation et optimisation mécanique d'un récupérateur piézoélectrique d'énergie vibratoire », Mémoire de maitrise des sciences génie mécanique, université de Laval, 2011.
- [10] TURRI Sylvie, POULIN Guylaine, « Dispositifs électromécaniques permettant l'exploitation de l'énergie des mouvements humains », Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain. 21-22 mars 2002 - Cachan – Journées Electrotechniques du Club EEA.
- [11] MULTON Bernard, LOSSEC Marianne, BEN AHMED Hamid, « Récupération d'énergie pour les systèmes autonomes », École thématique ECOFAC 2010, Plestin les Grèves - 29 mars au 2 avril 2010.
- [12] MAHIR Abdel-hakim, « La récupération d'énergie vibratoire », Rapport de projet de fin d'étude université Lille(1), 26 février 2014
- [13] BADEL Adrien, « De la conversion piézoélectrique à la récupération d'énergie », Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Grenoble Alpes, Novembre 2016.
- [14] YONG Julien, « Contribution à l'étude d'un capteur de force piézoélectrique résonant à forte raideur pour interfaces haptiques aéronautiques », Thèse de doctorat, université de Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), avril 2013.
- [15] ARROYO Emmanuelle, «Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes Dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone », Thèse de docteur de l'université de Grenoble, Novembre 2012.
- [16] DESPESE Ghislain, « Étude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micros systèmes

- communicants »Thèse de doctorat en énergétique physique, Institut National Polytechnique De Grenoble(INPG), Juin 2005.
- [17] DUPE Valérie, « Conception multidisciplinaire de microsystèmes autonomes », thèse de doctorat, université de Bordeaux 1, Novembre 2011.
- [18] PUGET Pierre, NERIN Philippe, « Les microsystèmes : technologies et traitement de l'information associé pour quelques applications », Seizième Colloque Grets, Grenoble, 15-19 Septembre 1997.
- [19] MERZOUK Mouhamed, MAOUCHE Lyazid, « Modélisation du phénomène d'induction électromagnétique des configurations axisymétrique : application au contrôle non destructif et au chauffage par induction », Mémoire de magister, 2002.
- [20] CHELGHOUM Leila, « Étude de l'hystérésis magnétique par le modèle de Preisach », Mémoire de magister, université de Batna, 2006.
- [21] CHELGHOUM Leila, « Étude des non linéarités dans les dispositifs électriques par la méthode de Galerkin sans maillage », Thèse de doctorat en sciences, université de Batna2, Avril 2016.
- [22] OULD OUALI Samy hassani, « Intégration de l'hystérésis magnétique dans un calcul éléments finis en vue de l'estimation de pertes dans les tôles des machines électriques », Thèse de doctorat, université mouloud Mammeri tizi ousou, Septembre 2010.
- [23] BRISSONNEAU Pierre, "Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique", Éditions Hermès, paris, 1997.ISBN :2-86601-579-1
- [24] CYR Charles, « Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques », Thèse de doctorat en cotutelle, université de Laval, Québec, et l'école nationale supérieure d'arts et métiers Lille, France, Juillet 2007.
- [25] HASSAD Mourad, « Analyse tridimensionnelle rigoureuse des antennes microbandes réalisées sur des couches diélectriques réciproques et non

- récioproques », Thèse de doctorat en sciences en Électronique, université Hadj Lakhdar Batna, Décembre 2015.
- [26] Edward Neville Da Costa Andrade, D.Sc, Ph.D, F.R.S, « The Early History of the Permanent Magnet», Université de London, Endeavour, Volume 17, Number 65, January 1958.
- [27] MADAGH Khayreddine, SAADI Fares, «Modélisation et calcul d'un aimant permanent », Mémoire de master en électrotechnique, université A mira Bejaïa, 2015.
- [28] ALLAG Hicham, « Modèles et Calcul des Systèmes de Suspension Magnétique Passive Développements et Calculs Analytiques en 2D et 3D des Interactions entre les Aimants Permanents», Thèse de docteur en génie électrique, université de Grenoble, Juin 2010.
- [29] LATEB Ramdane, « Modélisation des machines asynchrones et synchrones a aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : application à la propulsion marine par POD », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine(INPL), Octobre 2006.
- [30] MULTON Bernard, «Application des aimants aux machines électriques », Cours, Ecole Normale Supérieure de Rennes, 2014.
- [31] FONSECA Armando, «Comparaison de machines à aimants permanents pour la traction de véhicules électriques et hybrides », Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole doctorale: Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2000.
- [32] GIVORD Dominique, DEMPSEY Nora, «Les aimants permanents à base de terres rares », Actualité chimique, n°386, CNRS, juin 2014.
- [33] CONSTANTINIDES Steve, « The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets », 51<sup>st</sup> conference of Metallurgists, September 2012.

- [34] SLUSAREK Barbara, ZAKRZEWSKI Kazimierz, «Magnetic properties of permanent magnets for magnetic », Tele and Radio Research Institute (1), Lodz University of Technology (2), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b, 2012.
- [35] GASC Laurent, « Conception d'un actionneur à aimants permanents à faibles ondulations de couple pour assistance de direction automobile Approches par la structure et par la commande », Thèse de doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2004.
- [36] RINGUET F. Laprence, « Aimants permanents, matériaux et application », Techniques de l'ingénieur, juin 1996.
- [37] BARRE Olivier, « Contribution à l'étude des formulations de calcul de la force magnétique en magnétostatique, approche numérique et validation expérimentale », Thèse de docteur en génie électrique, école centrale de Lille et université des sciences et technologies de Lille, Décembre 2003.
- [38] KHOV Makara, « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2009.

## RÉSUMÉ/ABSTRACT

**Titre** : Modélisation et conception d'un dispositif inductif portable en vue de la récupération de l'énergie électrique.

**Mots clés** : Récupération, conversion, énergie, électrique, mécanique, ambiant, électromagnétisme, aimant, induction, mouvement, modélisation.

**Résumé** : Extraire de l'environnement une énergie est un challenge vue la complexité de sa conversion en électricité. Cette extraction constitue une démarche en plein essor car elle assure l'autonomie et la permanence en énergie. L'objectif du présent travail est l'étude d'un dispositif inductif portable dédié à une récupération d'énergie électrique. Ce dispositif est basé sur le principe de l'induction électromagnétique qui traduit la récupération de l'électricité à partir du déplacement d'un aimant à travers des bobines.

---

**Title**: Modeling and conception of a portable inductive device for the recovery of electrical energy.

**Key words**: Recovery, conversion, energy, electrical, mechanical, ambient, electromagnetism, magnet, induction, movement, modeling.

**Abstract**: Extracting energy from the environment is a challenge given the complexity of its conversion into electricity. This extraction is a step in full swing because it ensures autonomy and energy permanence. The objective of this work is the study of a portable inductive device dedicated to electrical energy recovery. This device is based on the principle of electromagnetic induction which translates the recovery of electricity from the movement of a magnet through coils.

