

N/620.830

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Génie Electrique**  
**Spécialité : Protection et contrôle des réseaux électriques**

**Mémoire de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

**Exploitation des champs pour la génération de l'électricité**

---

Présenté par :  
**Mellouki Hamza**  
**Khaldi Nasreddine**

Sous la direction de :  
**Mr.Miloud Kachi**

Mai 2014

## Remerciements



*Au terme de ce mémoire de fin d'études de Master , nous tenons à  
formuler nos chaleureux remerciement à notre encadreur  
« Dr .KACHI. M » pour ses efforts considérables.*

*Aussi nous remercions le directeur de laboratoire de Génie  
Electrique de Guelma « Dr. LEMZADMI . A » qui nous a  
permis de réaliser nos expériences dans le laboratoire .*

*Ainsi que toutes les enseignants et les administrateurs du  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique.*

*Sans oublier de remercier nos familles et nos amis et tous ceux qui  
nous ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce modeste travail.*

# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre I

I.1.Structure Générale des réseaux électrique.....	5
I.1.1.Production .....	5
I.1.2.Transport .....	5
I.1.3.Distribution .....	6
I.1.4.La consommation.....	6
I.2.Production de l'énergie électrique.....	6
I.3.classification des réseaux électriques.....	7
I.4.les lignes.....	8
I.4.1paramètre des lignes .....	9
I.4.1.1.Résistance active R.....	10
I.4.1.2.Inductance L.....	10
I.4.1.3.Capacité C.....	11
I.4.2.Relations caractéristiques entre les paramètres.....	11
I.5.Les réseaux électriques embarqués .....	12

### Chapitre II

II.1.Les formes d'énergie disponibles dans l'environnement.....	15
II.1.1.Energie finie.....	16
II.1.2. Energie infinie.....	17
II.1.2.1.Energie du rayonnement électromagnétique.....	17
II.1.2.1.1.Le rayonnement solaire .....	18
II.1.2.1.2.Les ondes hertziennes.....	19
II.1.2.2.L'énergie thermique.....	20
II.1.2.2.1.La pyroélectricité .....	20
II.1.2.2.2.La thermoélectricité classique .....	21
II.1.2.3.L'énergie mécanique.....	23
II.1.2.3.1.Energie de déformation .....	24

II.1.2.3.2.Energie de vibration.....	26
II.2.L'électromagnétisme .....	26
II.2.1.Champ électrique.....	26
II.2.2.Champ magnétique .....	26
II.2.3.Champ électromagnétique.....	26
II.2.4.Equations de Maxwell.....	27
II.2.5.Les sources du champ électromagnétique.....	28
II.2.6.Applications émettrices de champ électromagnétique .....	28

### **Chapitre III**

III.1.Champ magnétique d'une ligne aérienne.....	30
III.2.champ magnétique de la bobine.....	34
III.2.1.Détermination du champ magnétique au voisinage de la bobine.....	36
III.2.2.Récupération par induction magnétique.....	40
III.2.2.1. Détermination de la F.E.M induite.....	40
III.2.2.2. F.E.M induite mesurée.....	40
<b>Conclusion.....</b>	<b>43</b>

## Introduction générale [1]

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »,

*Antoine Lavoisier, 1777.*

L'énergie d'un système est sa capacité à produire un travail mécanique, à générer un courant électrique, à émettre un rayonnement ou de la chaleur ...etc. L'énergie est une grandeur universelle permettant de caractériser des phénomènes physiques différents ainsi que leurs interactions. Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. Bien qu'appliquée à la base à la conservation de la matière, cette maxime convient parfaitement à l'énergie : l'énergie ne se crée pas, ne se perd pas : elle se transforme. Ainsi, de l'énergie électrique pourra par exemple se transformer en énergie lumineuse, en énergie thermique ou en énergie mécanique, la transformation inverse étant également possible. De nombreuses formes d'énergie sont présentes dans notre environnement : la lumière, le vent, les vibrations issues des installations de l'homme,... et peuvent, d'après le principe énoncé ci-dessus être transformées en électricité : c'est ce que l'on fait depuis longtemps avec les éoliennes ou les panneaux solaires par exemple.

Dans ce travail de mémoire, nous allons travailler à de plus petites échelles. Notre but n'est pas d'alimenter en énergie une ville ou une maison, mais de rendre énergétiquement autonomes de petits systèmes capables de réaliser des actions basiques. Ainsi, en puisant l'énergie dans leur environnement direct, ces structures seront capables de capter une information (température, pression, accélération), de la traiter et de la transmettre sans fil. Cette thématique porte le nom de récupération d'énergie (Energy Harvesting) et commence à intéresser de plus en plus les laboratoires et les industriels tant les possibilités sont grandes ; on pensera notamment à toute la thématique des réseaux de capteurs autonomes.

L'objectif de notre travail est d'étudier la possibilité de récupération de l'énergie du champ magnétique au voisinage des lignes de transport ou celle de distribution afin d'alimenter des capteurs autonomes qui peuvent être utilisés pour des applications de signalisation ou de mesure.

# Chapitre I

## Les réseaux électriques

## **Les réseaux électriques**

Actuellement, la très grande majorité de l'énergie électrique consommée dans le monde est acheminée par l'ensemble des réseaux électriques existants. En un peu plus d'un siècle, ce que représente le terme de « réseau électrique » est passé de la mutualisation de quelques unités de production à une interconnexion généralisée au niveau des continents tout entiers. Si les étendues et les ramifications qui caractérisent ces réseaux en multiplient les performances et les potentiels, il faut savoir qu'elles en font également des systèmes complexes, gérés par une multitude d'intervenants et tirillés par des contraintes technico-économiques de plus en plus pesantes.

Sachant que la grande partie de l'énergie électrique vient des alternateurs, le lieu de sa production est souvent loin des centres de consommation, exigeant ainsi le recours aux lignes de transport et de distribution. Ces derniers constituent les artères du système électro-énergétique par lesquelles transite l'énergie des centres de production aux centres de consommation et qui, par interconnexion, forment le réseau électrique.

### **I.1 Structure générale des réseaux électrique [2]**

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties :

#### **I.1.1.La production**

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ».

#### **I.1.2.Le transport**

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en

direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension

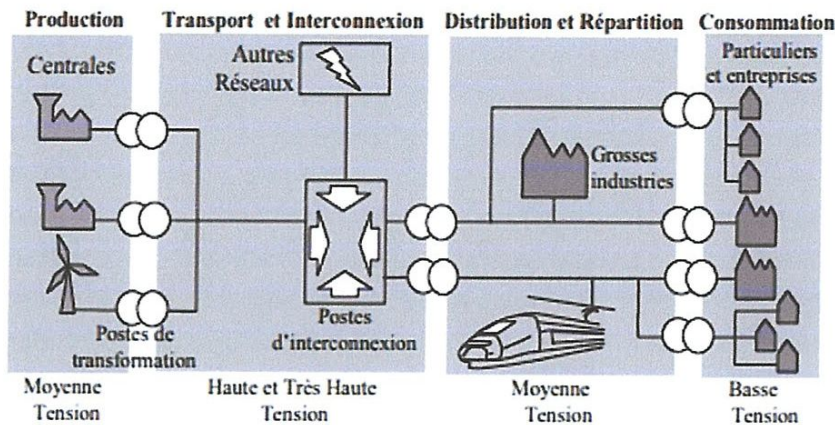
### I.1.3.La distribution

Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

### I.1.4.La consommation

Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V). Certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

La figure 1.1 représente, de façon très synthétique et symbolique, la structure d'un réseau et de ses grandes composantes



**Fig.1.1.Réseau électrique simplifié**

## I.2.Production de l'énergie électrique

La production de l'énergie électrique consiste en la transformation de l'ensemble des énergies convertibles (on parle d'énergies « primaires ») en énergie électrique. De façon prépondérante, la production se fait à partir du pétrole, du charbon, du gaz naturel, de réactions nucléaires, du vent ou de la force hydraulique. En réalité, quelques sources d'énergie supplémentaires et renouvelables, telles l'énergie solaire, la biomasse, la géothermie, etc.



### I.3. Classification des réseaux électriques [3]

Les réseaux électriques sont, en général, classés par leurs fonction leur niveau de tension leurs configuration et par la nature de leurs courant : continu ou alternatif.

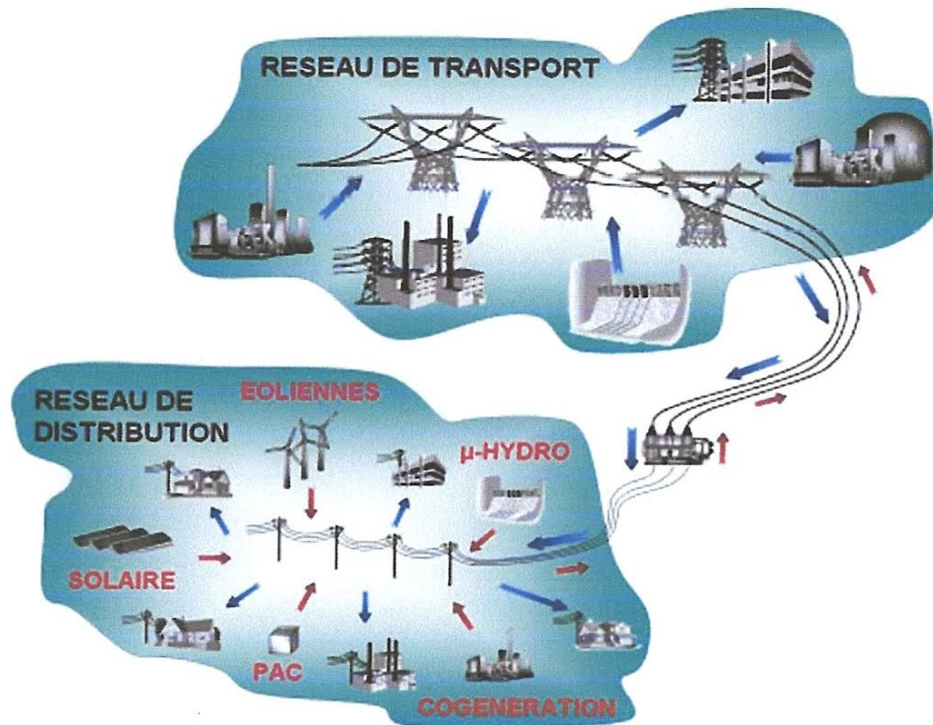


Fig.1.2.classification des reseaux électrique

La fonction des réseaux électriques permet de distinguer :

- les réseaux de transport de l'énergie électrique des centres de productions jusqu'aux centres d'alimentations
- les réseaux régionaux d'alimentations des centres de distributions
- les réseaux locaux de distribution, qui alimente les postes de transformation ou directement les consommateurs,

Selon le niveaux de tension, on peut définir :

- les réseaux de haute tension et très haute tension (transport)
- les réseaux de haute tension et moyen tension (alimentation)
- les réseaux de moyen tension et basse tension (distribution)

Le tableau 1.1 montre le domaine des différents niveaux de tension.

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale ( $U_n$ en Volts)	
		Tension Alternatif	Tension Continu
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTB	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50\ 000$	$1500 < U_n \leq 75\ 000$
	HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

**Tableau 1.1. Domaines de tension**

Par la configuration on peut également définir les types de réseaux suivants :

- réseau ouvert: les consommateurs reçoivent l'énergie à partir d'un seul circuit tel que le réseau magistral à une seule source, le réseau radial,
- réseau magistral à deux sources d'alimentation,
- réseau maillé : donne la possibilité aux consommateurs d'être alimentés par au moins deux circuits.
- réseau mixte.

#### I.4. Les lignes

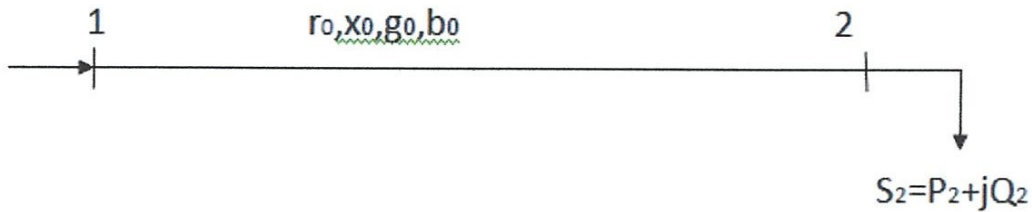
La notion de ligne, renferme en soit un ensemble d'aspects relatifs aux éléments constitutifs, aux grandeurs descriptives et aux effets interactifs impliqués. En effet, on distingue les aspects :

*Mécanique* : relatif à la construction de la ligne ;

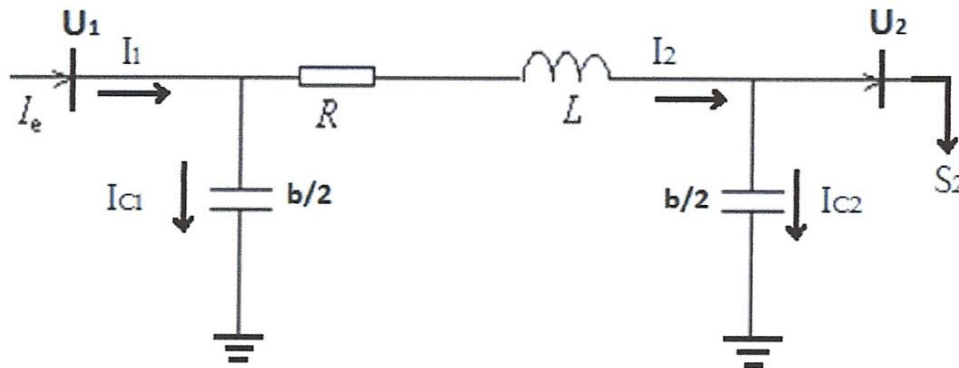
*Electrodynamique* : relatif aux interactions entre parties conductrices de la ligne ;

*Electrique* (électromagnétique) : relatif aux processus de transmission de l'énergie pour le quel le conducteur (phase) et l'élément essentielle, d'échange mutuel, relatif aux interactions avec l'environnement ...

a/



b/



**Fig.1.3. Modèle équivalent à la ligne**

#### **I.4.1. Paramètre de la ligne**

Les paramètres électriques de la ligne sont des grandeurs physiques qui permettent de décrire son comportement pendant l'écoulement des processus énergétique. Ils déterminent les conditions de fonctionnement de la ligne et les contraintes auxquelles elle est soumise, impliquées par le courant ou simplement par la tension appliquées.

### I.4.1.1. Résistance active R

La résistance active d'un conducteur est une résistance physique au passage du courant de conduction. Elle est mise en évidence par les effets thermique dans le conducteur, sa valeur ohmique pour un kilomètre de longueur peut être déterminée par l'expression connue

$$r_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{1}{\gamma F}$$

$\rho$  - résistivité du conducteur  $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$

$\gamma$  - conductivité correspondante  $\text{km}/\Omega\text{mm}^2$

F - section du conducteur

### I.4.1.2. Inductance L

L'application d'une F.é.m. force un courant dans la ligne le quel donne lieu à un champ magnétique variable qui s'établit autour à l'intérieur du conducteur. Le champ magnétique variable induit dans chaque élément  $\Delta l$  du conducteur une force électromotrice opposée au courant de la phase. Cette effet s'exprime par la résistance inductive linéique correspondante définie par :

$$X_0 = \omega L_0 \dots\dots\dots 1$$

$$L_0 = l_0 + l_{ex} \dots\dots\dots 2$$

Où  $l_0$ ,  $l_{ex}$  inductance dues au champ, respectivement interne et externe du conducteur.

$$L_0 = (l_0 + 4,6 \log \frac{D_m}{r_c}) 10^{-4}, \text{ H/km} ; \dots\dots\dots 3$$

Avec  $D_m$  - Distance moyenne géométrique entre les phases;  $r_c$  rayon géométrique du conducteur.

### I.4.1.3. La capacité C

La mise sous tension alternative de la ligne engendre un champ électrique entre phases et entre ces derniers et la terre. Le champ électrique  $E_{ex}$  alternatif ainsi établi et appliqué au milieu diélectrique qui entoure le conducteur (l'air pour une ligne aérienne) les circuits transversaux sont modélisés par une capacité C dont la valeur linéique est définie à partir des propriétés du champ électrique pour la fréquence industrielle.

La susceptance peut être déterminée par l'expression

$$b_0 = \omega C_0 = 2\pi f C_0 = \frac{7,58}{\log \frac{D_m}{r_c}} \cdot 10^{-6} \text{ , } \Omega^{-1}/\text{km}$$

### I.4.2. Relations caractéristiques entre les paramètres

La ligne en fonctionnement est le siège de processus énergétiques dont la mise en évidence des effets doit faire intervenir, pendant les diverses analyses, les paramètres électriques du régime, tels que la tension, les courants, les puissances...

En régime de fonctionnement, les paramètres longitudinaux (r, x) représentent le siège des effets de conduction tandis que les paramètres transversaux (g, b) représentent le courant de fuite dans l'air et le courant de déplacement.

Pour les lignes aériennes la distance moyenne  $D_m$  est considérablement supérieure au rayon  $r_c$ . Les calculs montrent effectivement que la valeur linéique de la réactance inductive des lignes et celle de leur susceptance capacitive en un niveau de tension  $U_n = 6 \div 110$  kV se fixent en moyenne comme suite :

$$X_0 \approx 0,36 \div 0,433 \text{ } \Omega/\text{Km}$$

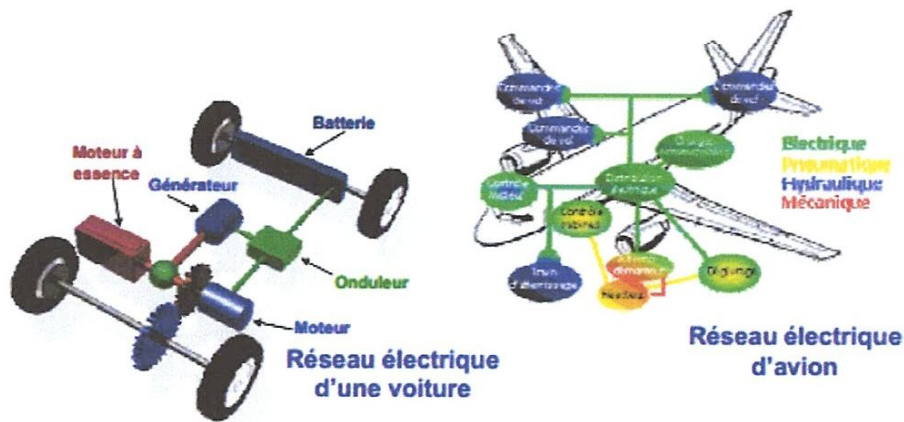
$$B_0 \approx 2,75 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega^{-1}/\text{Km}$$

## I.5. Les réseaux électriques embarqués [4]

Les réseaux embarqués, i.e. les réseaux d'alimentation électrique à bord des voitures, trains, avions ou bateaux ou les systèmes d'alimentation autonome, ont connu ces dernières années des évolutions conséquentes, évolutions qui ont suivi directement les progrès de l'électronique de puissance. Les contraintes sur les réseaux embarqués portent essentiellement sur le coût, l'encombrement et la fiabilité du réseau qui doit parfois être exceptionnelle (la probabilité de pannes dans l'aéronautique civile doit ainsi rester inférieure à  $10^{-9}$  par heure de vol!), tout ceci avec l'augmentation très importante de la demande en puissance embarquée. Par exemple, dans le cas de l'automobile, une R5 consommait environ 0.5 kW, alors qu'une monospace consomme actuellement environ 5 kW.

Ces réseaux sont :

- ✓ soit à courant continu (les réseaux automobile de 14 et 42 V),
- ✓ soit alternatif, comme par exemple à bord des bateaux avec là aussi, des niveaux de tension différentes qui cohabitent : 6,3 kV et 440 V, à une fréquence de 60 Hz pour une puissance d'environ 2x44 MW (le Queen Elisabeth II),
- ✓ soit hybride, i.e. avec des étages alternatifs et continus. Par exemple dans un avion cohabitent un réseau 115 V – 400 Hz pour l'alimentation des charges de puissance (par exemple les galeries des cuisines, l'éclairage ou les ventilateurs) et un réseau 28 V DC pour l'avionique. L'électronique de puissance a permis de réduire considérablement la masse et d'améliorer la fiabilité et la qualité de l'énergie dans ces réseaux, mais a entraîné un certain nombre de problèmes lié principalement à leur comportement non - linéaire.



**Figure 1.4. Exemples de réseaux électriques embarqués : réseau d'alimentation d'une voiture et réseau aéronautique**

On peut ainsi noter des problèmes liés à la pollution harmonique qu'il faut garder dans les normes et des problèmes de stabilité liés au fonctionnement à puissance constante de certaines charges.

# **Chapitre II**

**La récupération de l'énergie**



## La récupération de l'énergie

L'énergie...C'est-à-dire ? L'énergie caractérise la capacité à produire des actions, par exemple à engendrer du mouvement, modifier la température d'un corps ou à transformer la matière. L'énergie primaire peut-être présente dans la nature sous différentes formes : le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, le vent, le rayonnement solaire, les chutes d'eau, la chaleur interne de la terre, l'uranium...etc. Elle peut se traduire en : chaleur, énergie musculaire, énergie mécanique, énergie chimique, énergie électrique...etc. Ces formes multiples peuvent se transformer l'une en l'autre. La notion de récupération d'énergie définit le processus qui permet de transformer une énergie ambiante, dans ses formes multiples, en une énergie électrique exploitable pour alimenter un dispositif électronique.

### II.1.Les formes d'énergie disponibles dans l'environnement [5]

Les sources d'énergie que nous pouvons trouver dans le milieu ambiant sont multiples. Nous pouvons les classer en deux catégories, les sources finies (chimiques) et les sources infinies :

- (a) le rayonnement électromagnétique, en provenance du soleil, de la lumière artificielle ou bien des sources radiofréquences
- (b) le gradient ou la variation de température, spatial et temporel
- (c) l'énergie mécanique due aux vibrations ou bien aux déformations mécaniques.

Ces sources d'énergie peuvent être exploitées chacune séparément. Cependant, pour une meilleure efficacité, il est souvent privilégié d'utiliser au moins deux de ces sources pour assurer la continuité. Dans la suite de cette partie nous détaillons chacune de ces sources.

### II.1.1.Énergie finie

Le développement de l'électrochimie a conduit à l'apparition des appareils électroniques portables. Il s'agit essentiellement d'un moyen de stockage de l'énergie électrique qui a permis d'embarquer de l'énergie électrique sur des systèmes mobiles. C'est à Alessandro Volta qu'on doit l'invention de la première pile chimique composée d'empilements de couples *cuivre, zinc* séparés par du carton imbibé d'eau salée. Depuis, plusieurs techniques ont été développées dans le but d'améliorer la durée de vie et la capacité des batteries. A l'heure actuelle nous comptons trois principales technologies de batterie : les batteries Nickel Cadmium (Ni-Cd), les batteries Nickel Metal (Ni-MH) et les batteries Lithium Ion (Li-Ion). Bien que cette technologie ait permis d'apporter de l'autonomie aux objets nomades, plusieurs contraintes restent à résoudre, notamment celles liées à l'autonomie limitée et au remplacement ou bien au rechargement régulier, parfois impossible lorsqu'il s'agit d'alimenter des appareils enfouis ou dans des milieux hostiles. Pour contourner ces problématiques, une solution consiste à assister le fonctionnement de la batterie par un système récupérateur d'énergie qui permet d'augmenter son autonomie comme le montre la Figure 2.1. La batterie agit alors comme un tampon énergétique qui stocke en continu l'énergie récupérée du milieu ambiant et la met à disposition quand cela est nécessaire ou quand le niveau d'énergie stocké est suffisant.

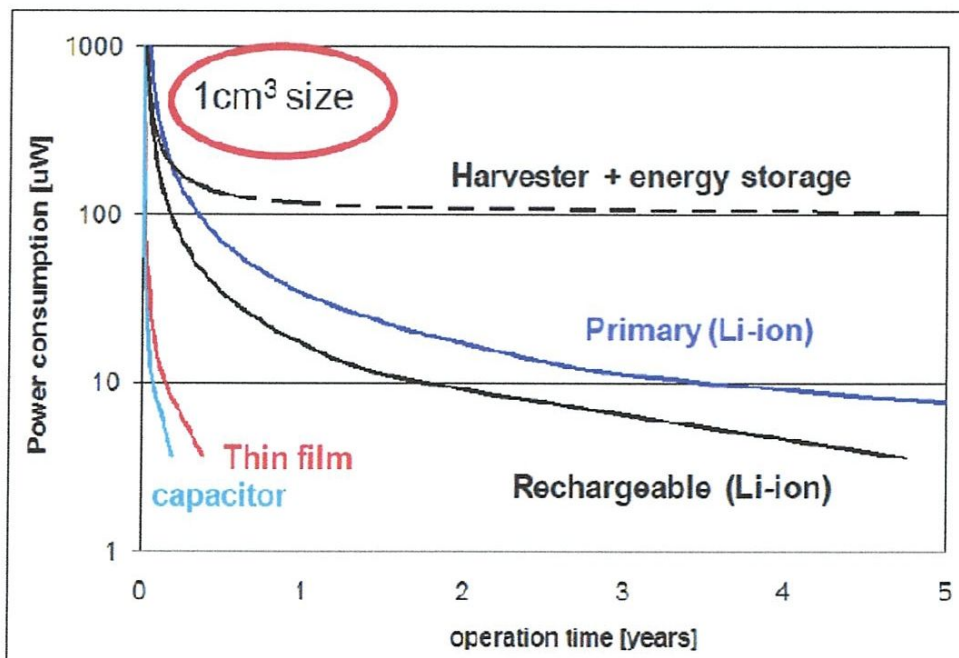


Figure 2.1 Illustration de l'amélioration de l'autonomie des batteries

Nous allons maintenant nous intéresser aux principales formes d'énergies ambiantes qui peuvent être exploitées afin d'augmenter l'autonomie des batteries, voire de les remplacer.

## II.1.2. Energie infinie

### II.1.2.1. Energie du rayonnement électromagnétique

Notre environnement est riche en ondes électromagnétiques qui peuvent avoir plusieurs natures. Sur la Figure 2.2 nous présentons l'étendue du spectre électromagnétique présent dans notre environnement en fonction de sa nature (sources d'émission), de sa longueur d'onde et de sa fréquence :

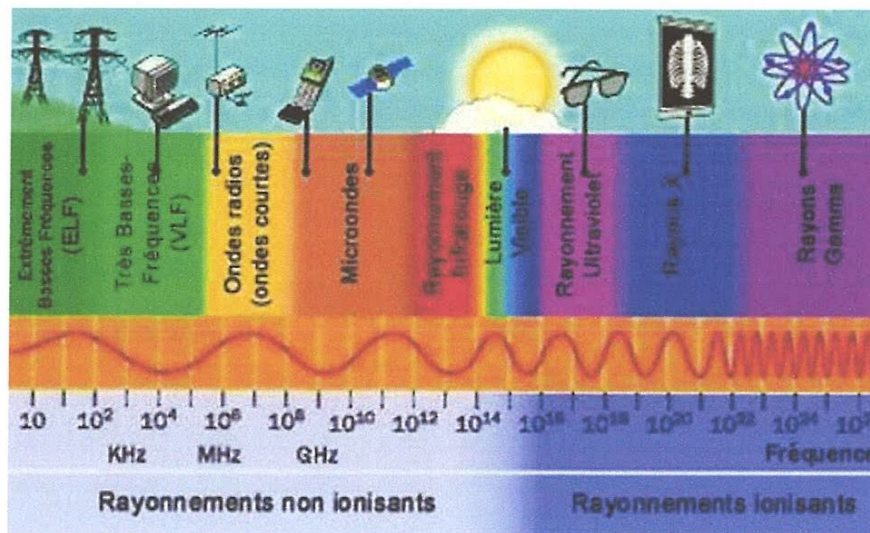
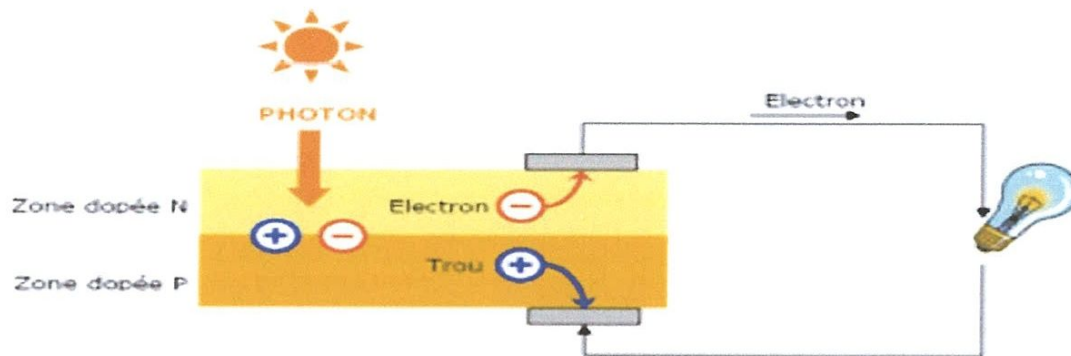


Figure 2.2 Etendu du spectre électromagnétique ambiant

Nous remarquons que le gisement du rayonnement électromagnétique à faible impact sur la santé a essentiellement pour origine : le soleil (rayonnement infra rouge + lumière visible) et les appareils électriques/électroniques. Chaque type de rayonnement requiert un système dédié pour le transformer en énergie électrique utile. Dans ce qui suit nous traitons chaque type de rayonnement séparément.

### II.1.2.2. Le rayonnement solaire

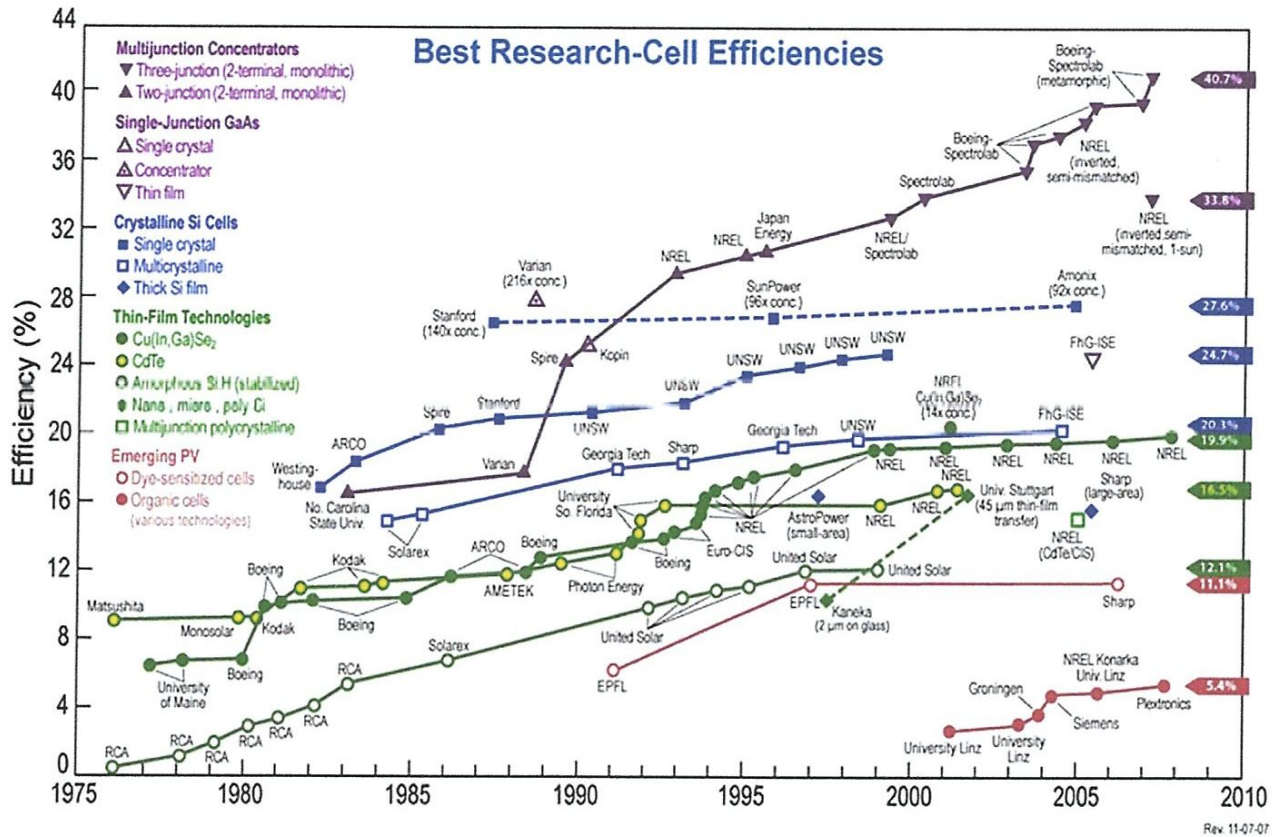
Le rayonnement naturel en provenance du soleil demeure la source d'énergie la plus abondante dans la nature. La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. Ce matériau comporte une jonction P-N, comme illustré sur la Figure 2.3.



**Figure 2.3** Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque

Il se crée au voisinage de la jonction une zone de charges d'espace (zone dépourvue de charges électriques), la présence des charges de signes opposés de part et d'autre de cette zone crée un champ électrique interne. Lorsqu'un photon en provenance du soleil, ou toute autre source de lumière, 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.

Sur le marché actuel, plusieurs technologies de panneaux photovoltaïques sont proposées, la plupart sont à base de matériau silicium multi/mono cristallin. L'efficacité des cellules photovoltaïques varie en fonction de la technologie et de la pureté des matériaux, on note un rendement entre 10 et 16 % pour les cellules du commerce, alors que des procédés avancés de fabrication en laboratoires de recherche permettent d'atteindre des rendements de l'ordre de 40%, leur principal inconvénient est le coût qui reste relativement élevé. Sur la Figure 2.4 l'évolution du rendement des cellules photovoltaïques par ordre chronologique.



**Figure 2.4 Evolution de l'efficacité des cellules photovoltaïque entre 1975 et 2007**

Il ressort de cette représentation graphique que les cellules en multi-jonction sont meilleures que les cellules simple jonction. Cependant, les cellules multi-jonction sont relativement chères à l'heure actuelle et requièrent des procédés de fabrication plus compliqués que ceux pour les cellules en silicium dont le procédé est bien maîtrisé. Il est à noter que la performance des cellules photovoltaïques est en progression continue, ce qui rend cette solution prometteuse pour l'avenir.

### II.1.2.3. Les ondes hertziennes

Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à la récupération de l'énergie issue des ondes radio fréquence, vu le nombre de sources d'onde électromagnétique émise par l'homme dans notre environnement, notamment les appareils de télécommunication, les appareils électroménagers, les lignes haute tension...etc. Cependant, 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). Yeatman et al., montrent qu'un champ électrique de  $1\text{V.m}^{-1}$  ne permet pas de récupérer plus de  $0.26 \mu\text{W.cm}^{-2}$  et il est peu courant de trouver dans notre environnement ambiant un champ électrique de cette intensité sauf aux voisinages de sources puissantes comme les antennes GSM par exemple.

### **II.1.2.2.L'énergie thermique**

La conversion thermoélectrique consiste à transformer un flux de chaleur circulant entre deux points à deux températures différentes en une énergie électrique. Plusieurs principes physiques ont été mis au point afin d'assurer cette transduction

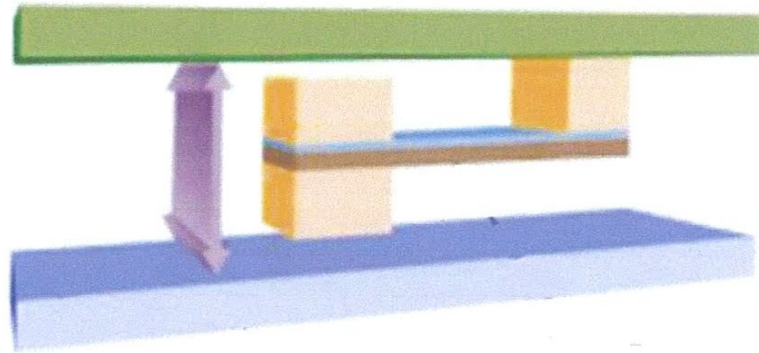
#### **II.1.2.2.1.La pyroélectricité**

Certains matériaux comme les cristaux pyroélectriques ont la propriété de changer de polarisation électrique sous un changement de température que ce soit temporel ou spatial. Cette variation de polarisation crée en effet une différence de potentiel temporaire et par conséquent un courant électrique si une charge électrique est connectée. Ce principe est utilisé pour convertir les variations de température rapides et continues en énergie électrique utile.

A titre d'exemple, nous citons le système inventé par Hunter et al., comme le montre la Figure 2.5, le système inventé est composé d'un bimorphe (une couche de matériau pyroélectrique et une couche de métal). Le bimorphe est en contact permanent avec une surface dont la température est susceptible de changer au cours du temps. Lorsque la température de cette surface augmente, la poutre fléchit vers le bas grâce à la différence entre le coefficient de dilation thermique de la couche métallique et celui de la couche pyroélectrique.

Après flexion, l'autre bout de la poutre touche la surface supposée froide. Ceci a deux conséquences :

- (1) une circulation de flux thermique de la surface chaude et la surface froide, ce flux est converti en énergie électrique grâce au matériau pyroélectrique,
- (2) refroidissement de la partie métallique après contact, cette dernière tente donc de revenir vers sa position initiale, lorsque le contact avec la partie froide est interrompu cette couche se réchauffe de nouveau et le même mécanisme se reproduit de nouveau.



**Figure 2.5 système de Hunter et al**

#### **II.1.2.2.2. La thermoélectricité classique**

Ce principe est le plus utilisé, à petite échelle, pour la récupération des gradients d'énergie thermique se trouvant dans l'environnement. La conversion thermoélectrique est basée sur l'effet dit de Seebeck .

La différence de température entre deux points conduit à la circulation de flux de chaleur. Ceci se traduit dans le matériau par la propagation d'une agitation moléculaire et en partie par un déplacement de charges électriques. Si ce transport se fait à travers un matériau dopé N alors une partie du flux thermique est transporté par des électrons et induit un courant d'électrons, si le flux thermique se fait à travers un matériau dopé P alors une partie du flux est transporté par des trous et conduit à un courant de trous. Le signe du courant généré dépend donc du type de dopage. Une alternance de matériaux dopés P et N associées électriquement en série et thermiquement en parallèle permet d'obtenir une tension de sortie suffisamment élevée pour être exploitable (Figure 2.6). La quantité d'énergie électrique que nous pouvons obtenir dépend étroitement du gradient température et du coefficient de Seebeck propre au matériau utilisé pour canaliser le flux thermique. Le rendement, quant à lui, dépend étroitement du ratio entre la conductivité thermique du matériau par les charges électriques (électrons/trous) et les phonons. Un grand gradient de température est nécessaire pour récupérer une quantité d'énergie utile en sortie du générateur. Cependant, pour les microsystemes et même les systemes de taille centimétrique, il est toujours difficile d'obtenir un gradient de température supérieur à 10°C.

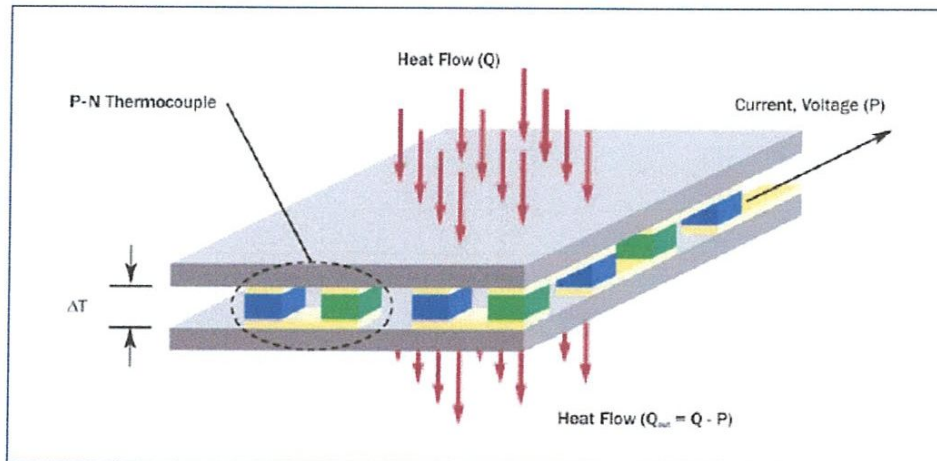


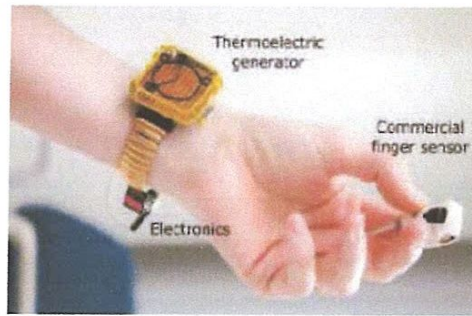
Figure 1-1: Thermoelectric generator (TEG).<sup>2</sup>

## Figure 2.6 Agencement des cellules PN pour la récupération de l'énergie Thermique

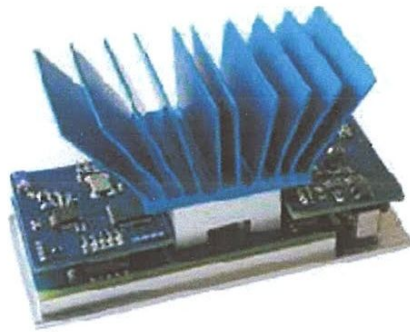
### Quelques résultats des systèmes de récupération de l'énergie thermique

Ce principe a connu un développement remarquable durant ces 10 dernières années, plusieurs produits sont arrivés à l'étape de commercialisation. Certaines applications visent à récupérer le gradient de température entre le corps humain et l'air ambiant (Figure 2.7) d'autres le gradient de température présents dans les appareils de transport notamment les avions (Figure 2.8).





**Figure 2.7 Oxymètre autonome**



**Figure 2.8 Technologie Micropelt**

La conversion thermoïonique est basée sur l'émission d'électrons par échauffement d'une électrode généralement métallique. Les électrons, quittant l'électrode chauffée, peuvent être récupérés sur une autre électrode tenue à basse température, ainsi, on crée un courant électrique entre les deux électrodes. Le courant généré peut atteindre typiquement plusieurs Ampères par centimètres carrés, tout dépend du gaz présent entre les deux électrodes et de la température de l'électrode émettrice d'électrons qui doit être supérieur à 800K pour les matériaux connus jusqu'ici, ce qui limite fortement l'utilisation de ce principe à la récupération de l'énergie.

### **II.1.2.3.L'énergie mécanique**

L'énergie mécanique universellement présente dans notre environnement sous deux formes distinctes : déformation (déplacement relatif entre deux parties en mouvement) et vibration (une seule partie en mouvement). Dans les deux cas de figure, il est possible, grâce à un mécanisme dédié, de transformer cette énergie en une énergie électrique. Dans le cas de la déformation, il suffit

d'un convertisseur qui transforme le déplacement relatif en énergie électrique, et dans le cas de la vibration, il faut d'abord créer un point de référence, par exemple une masse sismique, pour transformer la vibration en un déplacement relatif qui peut être converti en énergie électrique via un convertisseur mécanique/électrique. Nous analysons dans ce qui suit les quelques systèmes de récupération de l'énergie de déformation et de vibrations mécaniques.

### II.1.2.3.1.Énergie de déformation

Un objet se déforme lorsqu'il est soumis à une force, une pression, ou un poids. Parmi les sources qui existent dans notre environnement nous pouvons trouver :

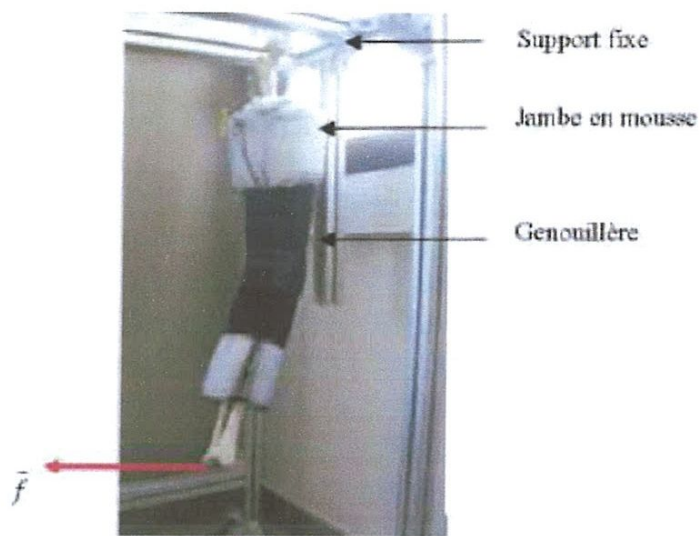
- La semelle d'une chaussure lorsque l'on marche
- La torsion d'un ski ou d'un surf des neiges pendant l'effort
- L'interrupteur soumis à une pression
- La déformation d'un habit lorsque celui-ci est porté ou au lavage.
- La déformation d'objets liée à un échauffement

Le corps humain est une source intéressante de déformation mécanique, ceci ouvre la voie à un large champ d'applications pour les systèmes de récupération d'énergie mécanique, comme par exemple l'alimentation des implants dans le corps humain, des appareils électroniques à usage quotidien...etc.

La conversion de l'énergie de déformation en une énergie électrique est souvent réalisée grâce aux matériaux dits électro-actifs qui sont caractérisés par un couplage électromécanique intrinsèque. Il existe différents types de matériaux électro-actifs, comme par exemple les polymères ioniques, les polymères diélectriques, les piézoélectriques, les alliages magnétostrictifs...etc

- Utilisation des polymères électro-actifs :

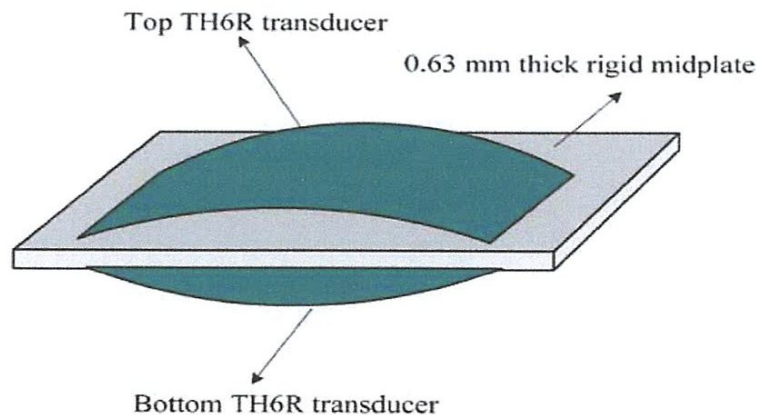
Les polymères électro actifs sont des matériaux de type *composés organiques* caractérisés par leur couplage électromécanique qui leur permet de changer de forme ou de dimension sous une contrainte électrique et vice versa. De nombreux travaux ont été menés dans ce cadre de recherche. A titre d'exemple nous citons le prototype développé au sein du CEA-Let dans le cadre de la thèse de C. Jean-Mistral , Figure 2.9. Le système développé permet de convertir l'énergie d'étirement sur le genou en énergie électrique par utilisation de polymères électro actifs. On a constaté que pour une marche à un rythme de 1 Hz, on devrait pouvoir récupérer jusqu'à 1.74 mW sous une tension de polarisation de 1000 V.



**Figure 2.9 Illustration de la récupération de l'énergie d'extension/compression sur le genou**

- Utilisation des matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux qui ont la propriété de se déformer sous un champ électrique et de générer un champ électrique sous une déformation mécanique, Un exemple bien connu pour la récupération de l'énergie de déformation par utilisation de matériaux piézoélectriques est le prototype développé par une équipe au MIT d'une chaussure équipée d'un bimorphe piézoélectrique, et qui sous la pression subie pendant la marche, génère de l'énergie électrique (Figure 2.10). Le prototype permet de récupérer jusqu'à 8.4mW.



**Figure 2.10 Prototype de récupération d'énergie dans les chaussures**

### **II.1.2.3.2.Energie de vibration :**

Depuis environ une dizaine d'années, la récupération de l'énergie vibratoire fait l'objet d'une thématique de recherche très active (plus d'une cinquantaine de laboratoires dans le monde ont une action dans le domaine). L'énergie vibratoire est omniprésente dans notre environnement, comme sur la plupart des appareils à usage quotidien, dans les bâtiments, dans les systèmes de transport...etc. En plus de l'omniprésence de cette énergie dans notre environnement, les mécanismes associés peuvent être miniaturisés, ce qui ouvre la voie à des applications miniatures comme les implants dans le corps humain, l'intégration dans les cartes magnétiques...etc.

## **II.2 l'électromagnétisme**

### **II.2.1 Champs électriques**

[6]

Les champs électriques sont liés à la présence des charges électriques mobiles ou pas. Ils peuvent aussi être induits par un champ magnétique variable. Les champs électriques produisent une force électrique qui a pour effet de mettre en mouvement toute particule chargée se trouvant dans le champ. L'unité de mesure du champ électrique est me V/m et augmentent d'intensité en fonction de la tension électrique qui les génère. Il diminue d'intensité on fonction de la distance à leur source, d'un facteur  $1/r$  à  $1/r^3$  suivant le type de source et sont éloignement. Il est modifié et atténué par tous les obstacles qu'il rencontre.

### **II.2.2.Champs magnétiques**

Sont produit par des champs électriques variables ou des courants électriques. Ils produisent une force magnétique qui ne peut affecter que des particules chargées en mouvement on modifiant leur trajectoire.

### **II.2.3.Champs électromagnétiques**

Les champs électromagnétiques (CEM) résultent de la combinaison des champs électrique et magnétique. Ils sont constitués d'une onde électrique et d'une onde magnétique qui se déplacent ensemble à la vitesse de la lumière. Les champs électromagnétiques se caractérisent par leur fréquence et leur longueur d'onde. La fréquence est le nombre d'oscillations de l'onde en une seconde, mesuré en hertz (Hz). La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde

pendant la durée d'une oscillation. Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte, et l'énergie déployée dans le champ élevée

#### II.2.4. Equation de Maxwell

Elles constituent un système d'équation aux dérivées partielles qui lie la variation spatiale et temporelle d'une grandeur vectorielle.

$$\text{Div}D = \rho_{\text{libre}} \dots\dots\dots 1$$

$$\text{Div}B = 0 \dots\dots\dots 2$$

$$\text{rot}E = - \frac{dB}{dt} \dots\dots\dots 3$$

$$\text{div}H = j \dots\dots\dots 4$$

Ces équations sont complétées par les équations constitutives qui décrivent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considérés.

$$B = \mu H \dots\dots\dots 5$$

$$D = \epsilon E \dots\dots\dots 6$$

$$J = \sigma E \dots\dots\dots 7$$

B : induction magnétique

D : induction électrique

E : champ électrique

H : champ magnétique

J : densité de courant

$\sigma$  : conductivité électrique

$\epsilon$  : permittivité électrique

$\mu$  : perméabilité magnétique

$\rho$  : densité de courant

## II.2.5. Les sources du champ électromagnétique [7]

Les champs électromagnétiques sont omniprésents dans notre environnement. Certains sont d'origine naturelle comme dans les champs atmosphériques et terrestres, mais, depuis le développement des micro-ondes dans les années 1950 et la progression des nouvelles technologies, les CEM proviennent principalement des activités humaines. Nous sommes tous soumis en permanence à des CEM statiques d'origine naturelle, de l'ordre de quelques dizaines de microteslas ( T) pour le champ magnétique et d'une centaine de volts par mètre (V/m) par beau temps pour le champ électrique. Au sein des foyers, les personnes sont exposées aux champs EM émis par les appareils de technologie actuelle utilisant l'électricité. Il s'agit des écrans de télévision, des lampes et appareils électroménagers, qui émettent des champs EM d'extrêmement basses fréquences, principalement à 50 Hz (champs de quelques nT à quelques T et de quelques V/m à quelques centaines de V/m). Les champs EM dans la gamme des radiofréquences sont également utilisés pour leurs propriétés thermiques. Les fours à induction, le chauffage thermique diélectrique et à induction, fonctionnent à des fréquences de 1 kHz à 3 MHz, les fours à micro-ondes à plus haute fréquence (2,45 GHz - émissions à des puissances de 150 à 1 000 watts [W]).

## II.2.6. Applications émettrices de champ électromagnétique

- ✓ Les antennes relais de téléphonie mobile
- ✓ les téléphones portables
- ✓ les lignes à haute tension
- ✓ les ordinateurs
- ✓ les équipements radar
- ✓ les appareils électroménagers
- ✓ les réseaux informatiques sans fil
- ✓ les dispositifs antiviol
- ✓ les sources de chaleur à induction
- ✓ certains types de cuisinières et de radiateurs

# **Chapitre III**

**Expérience de récupération de l'énergie**

## **Expérience de récupération de l'énergie**

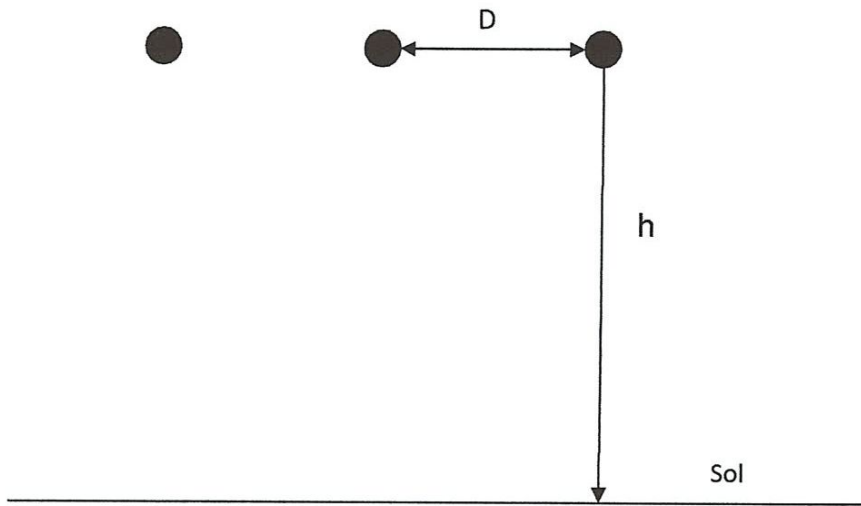
Les lignes de transport et de distribution de l'énergie électrique traversent souvent des régions rurales et montagneuses non électrifiées. Dans ces régions, il est possible d'imaginer des applications de faible puissance, telles que par exemple : détecteurs d'incendie, signalisation lumineuse (avertissement pour les pilotes d'hélicoptères), micro actionneurs...etc, qui nécessitent une alimentation électrique. Les lieux de ces applications peuvent être éparpillés et, plus au moins, éloignés des lignes de transport, ce qui rend l'utilisation des transformateurs une opération très coûteuse. Ainsi, l'idée de récupérer l'énergie des champs au voisinage des lignes peut être une solution très avantageuse et très intéressante. Une des voies possibles pour la récupération d'une partie de l'énergie rayonnée par la ligne (sous forme de champ magnétique et électrique) est l'induction magnétique, qui consiste à exposer un circuit électrique (conducteur, bobine) au champ magnétique de la ligne.

Dans ce travail, nous avons opté pour l'usage de l'induction magnétique pour récolter une tension aux bornes d'une bobine victime (un capteur). A cette fin nous avons essayé de simuler au laboratoire le champ magnétique créé par une ligne de transport à travers une bobine équivalente qui engendre un champ magnétique à son voisinage lequel traverse une deuxième bobine cible et crée une f.é.m. induite. Le calcul des champs magnétiques de la ligne et de la bobine équivalente a été effectué en première étape et des mesures de champ et de la f.é.m. induite en seconde étape.

### **III.1 Champ magnétique d'une ligne aérienne**

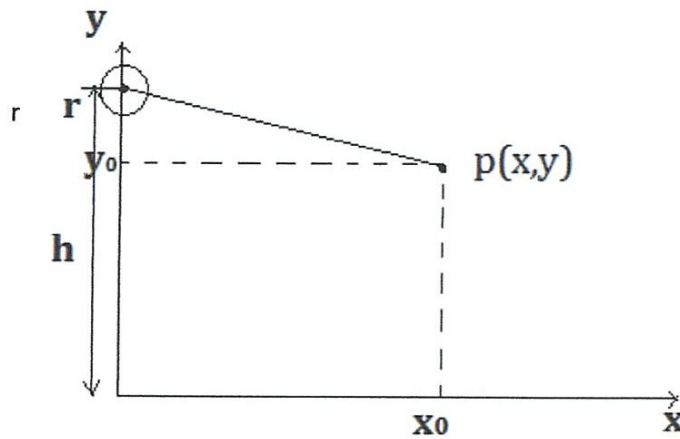
Nous avons calculé le champ magnétique d'une ligne aérienne en nappe de 90kV parcourue par un courant de 270 A (fig.3.1).





**Figure 3.1. Ligne aérienne en nappe**

Pour simplifier le calcul, considérons le cas d'un conducteur suspendu à une hauteur  $h$  du sol et parcouru par un courant  $I$  (fig.3.2).



**Fig.3.2.representation d'une phase**

Le théorème d'Ampère  $\oint B \cdot dl = \sum \mu \cdot I$  donne pour un point distant de  $r$  par rapport au centre du conducteur

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \dots\dots\dots 1$$

En exprimant la distance r en fonction des coordonnées on obtient :

$$r = \sqrt{x^2 + (y - h)^2} \dots\dots\dots 2$$

Ce qui donne un champ magnétique

$$B = \frac{\mu I}{2\pi \sqrt{x^2 + (y - h)^2}} \dots\dots\dots 3$$

En faisant le même calcul pour les autres conducteurs et tenant compte de leurs positions (fig.3.3), le champ totale créer par la ligne au point  $p(x,y)$  et la somme des trois champs engendrés par les trois phase :  $B = B_1 + B_2 + B_3$

$$B = \frac{\mu I_1}{2\pi r_1} + \frac{\mu I_2}{2\pi r_2} + \frac{\mu I_3}{2\pi r_3} \dots\dots\dots 4$$

Si le conducteur central est à l' origine des abscisses :

$$r_1 = \sqrt{(x + D)^2 + (h - y)^2} \dots\dots\dots 5$$

$$r_2 = \sqrt{x^2 + (h - y)^2} \dots\dots\dots 6$$

$$r_3 = \sqrt{(x - D)^2 + (h - y)^2} \dots\dots\dots 7$$

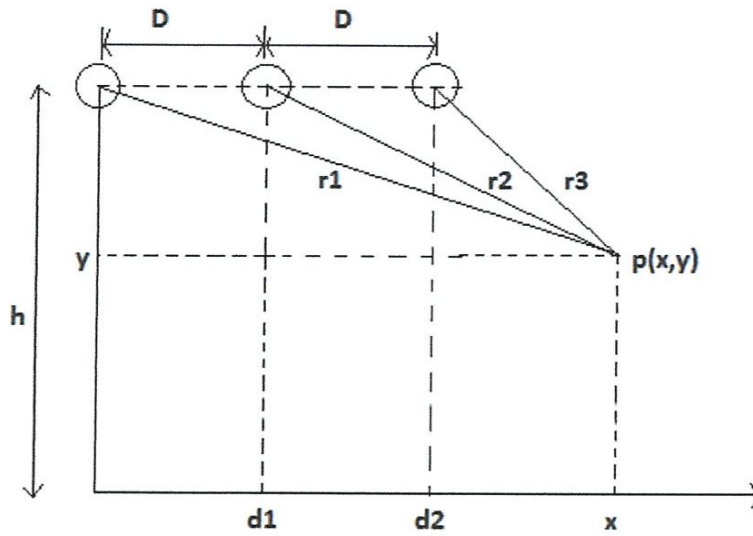


Fig.3.3. Géométrie de calcul du champ

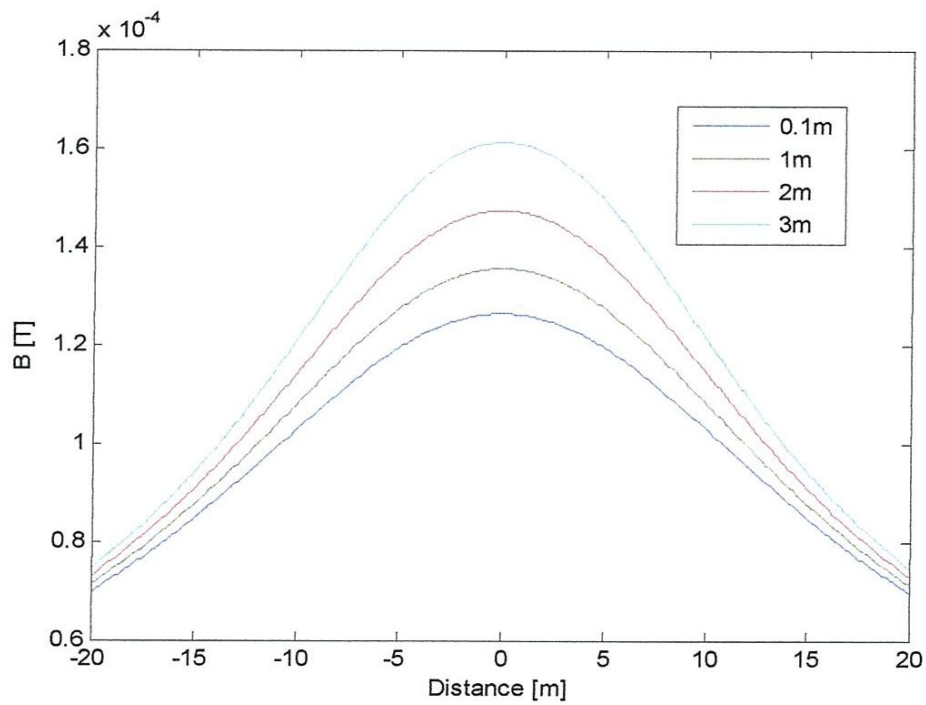
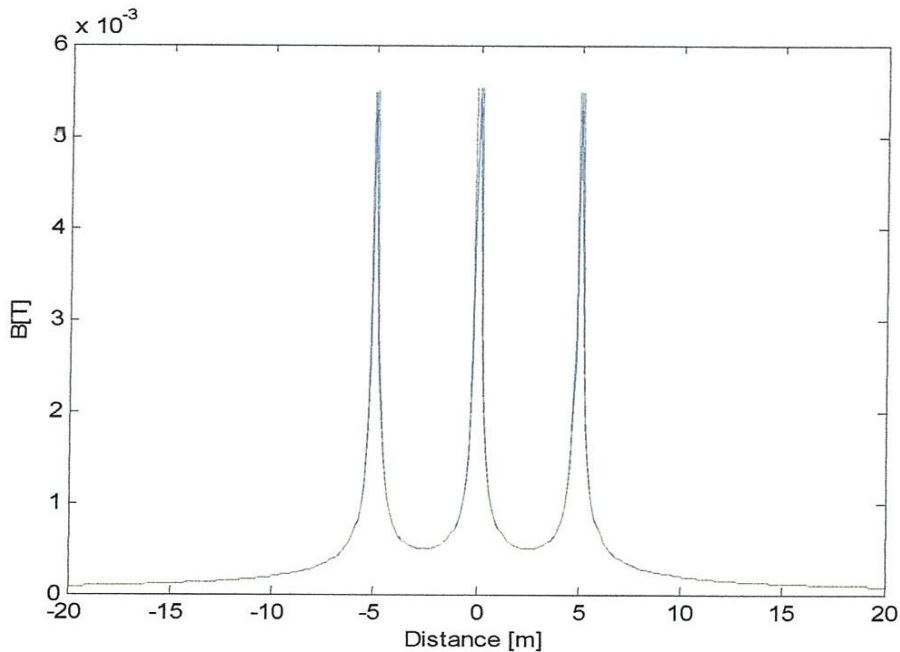


Fig.3.4. Répartition du champ magnétique au voisinage du sol ( $I = 270A$ )

La figure 3.4 illustre le profil du champ magnétique au voisinage du sol pour quatre différentes distances  $y=0.1$  m, 1m, 2m, 3m. Le champ est maximal au centre de la ligne et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre.

La figure 3.5 montre le profil du champ magnétique au voisinage des conducteurs. On constate que le champ devient important à l'approche des conducteurs de phases.



**Fig.3.5 Champ magnétique au voisinage des conducteurs de la ligne ( $I = 270A$ )**

### III.2. Champ magnétique d'une bobine

Une bobine de rayon 7 cm et de hauteur 25cm est utilisée dans le laboratoire pour simuler le champ magnétique d'une ligne. Nous avons calculé et mesuré l'amplitude du champ de la bobine utilisée. La figure 3.6 montre le montage expérimental utilisé pour la mesure du champ. Une Sonde modèle 50 HZ EHP-50 est placée à une distance variable par rapport au centre de la bobine. La bobine alimentée par une tension de 220 V absorbe un courant de 0.2 A.

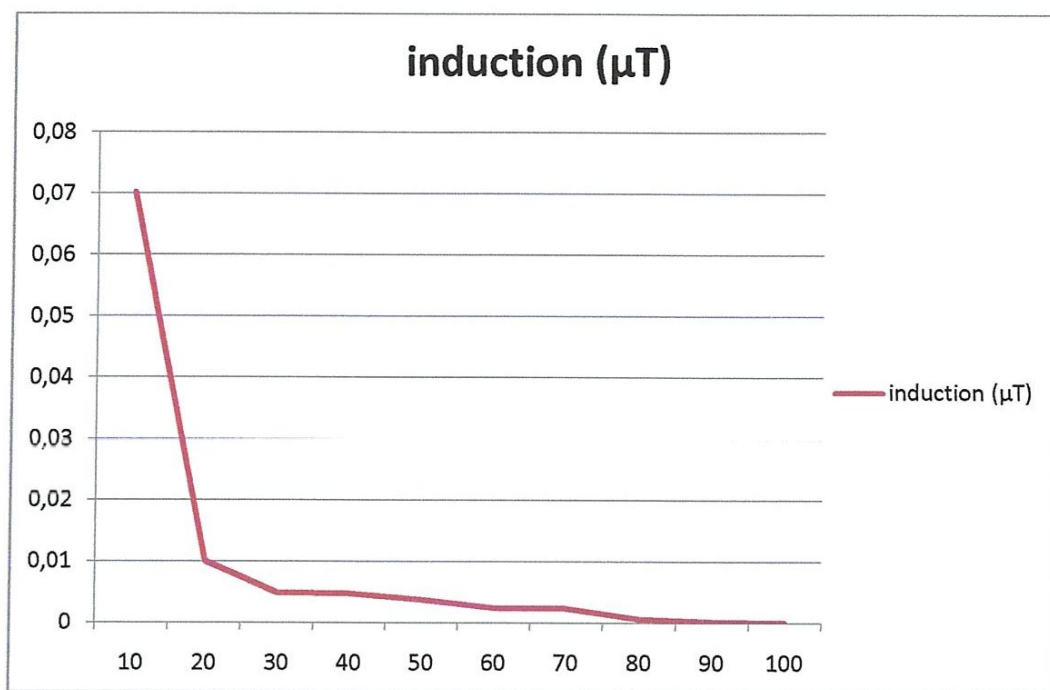
Le tableau 3.1 donne les valeurs mesurées du champ magnétique de la bobine sous test. Ces valeurs ont été tracées sur la figure 3.7. Le champ magnétique engendré par la bobine est inférieur à celui créé par la ligne, ce qui implique que la bobine utilisée peut servir à simuler les champs lointain.



**Fig.3.6. Mesure du champ magnétique de la bobine**

Tableau 3.1. Mesure des variations du champ magnétique d'une bobine en fonction de la distance

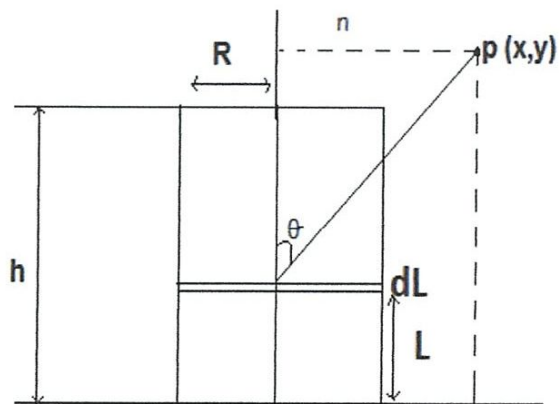
Distance (cm)	L'induction ( $\mu\text{T}$ )
10	0.0703
20	0.0101
30	0.005
40	0.0048
50	0.0038
60	0.0025
70	0.0024
80	0.0007
90	0.0003
100	0.0001



**Fig.3.7. L'induction B( $\mu$ T) en fonction de la distance (cm)**

### III.2.1. Détermination du champ magnétique au voisinage de la bobine

Soit une bobine de rayon "R" et de hauteur "h" pour le quelle nous voulons trouver le champ a son voisinage au point P(x,y).



**Figure 3.8. Géométrie de calcul pour la bobine**

Considérons une spire au milieu qui présente un élément " dL" parcourue par courant I et se situant à une hauteur L. Les composantes des champs magnétique Br et Bθ suivant les directions "r" et "θ" sont données par :

$$dBr = \frac{2m\mu \cos \theta}{4 \pi r^3} \dots\dots\dots 1$$

$$dB\theta = \frac{m \mu \sin \theta}{4 \pi r^3} \dots\dots\dots 2$$

Avec m=S.I est le moment magnétique de la spire ; et S représente la surface de la spire.

Sachant qu'à partir de la figure 3.8 :

$$\cos\theta = \frac{y-L}{r} ; \sin \theta = \frac{x}{r} \text{ et } r = \sqrt{x^2 + (y - L)^2}$$

Les deux équations 1 et 2 deviennent donc :

$$dBr = \frac{2m\mu}{4 \pi} \frac{y-L}{r^4} \dots\dots\dots 3$$

$$dB\theta = \frac{m \mu}{4 \pi} \frac{x}{r^4} \dots\dots\dots 4$$

Pour simplifier les équations on substitue y-L = yi, et  $\frac{n\mu_0}{4 \pi} = k$  ce qui donne :

$$dBr = 2k \frac{yi}{(x^2 - yi^2)^2} \dots\dots\dots 5$$

$$dB\theta = k \frac{x}{(x^2 - yi^2)^2} \dots\dots\dots 6$$

La distance L varie de 0 à h (L=0 : h), il s'en suit yi=y-L varie de y à y-h. Or L=y-yi donc dL= - dyi

Le champ total créé au point p(x,y) par l'ensemble des spires constituant la bobine est la somme des champs de chacune des spires individuellement :

$$Br = \int Br = -2k \int_y^{y-h} \frac{yi}{(x^2 + yi^2)^2} dyi$$

Considérons une spire au milieu qui présente un élément " dL" parcourue par courant I et se situant à une hauteur L. Les composantes des champs magnétique Br et Bθ suivant les directions "r" et "θ" sont données par :

$$dBr = \frac{2m\mu}{4\pi} \frac{\cos\theta}{r^3} \dots\dots\dots 1$$

$$dB\theta = \frac{m\mu}{4\pi} \frac{\sin\theta}{r^3} \dots\dots\dots 2$$

Avec m=S.I est le moment magnétique de la spire ; et S représente la surface de la spire.

Sachant qu'à partir de la figure 3.8 :

$$\cos\theta = \frac{y-L}{r} ; \sin\theta = \frac{x}{r} \text{ et } r = \sqrt{x^2 + (y-L)^2}$$

Les deux équations 1 et 2 deviennent donc :

$$dBr = \frac{2m\mu}{4\pi} \frac{y-L}{r^4} \dots\dots\dots 3$$

$$dB\theta = \frac{m\mu}{4\pi} \frac{x}{r^4} \dots\dots\dots 4$$

Pour simplifier les équations on substitue y-L = yi, et  $\frac{n\mu_0}{4\pi} = k$  ce qui donne :

$$dBr = 2k \frac{yi}{(x^2 - yi^2)^2} \dots\dots\dots 5$$

$$dB\theta = k \frac{x}{(x^2 - yi^2)^2} \dots\dots\dots 6$$

La distance L varie de 0 à h (L=0 : h), il s'en suit yi=y-L varie de y à y-h. Or L=y-yi donc dL= - dyi

Le champ total créé au point p(x,y) par l'ensemble des spires constituant la bobine est la somme des champs de chacune des spires individuellement :

$$Br = \int Br = -2k \int_y^{y-h} \frac{yi}{(x^2 + yi^2)^2} dyi$$



$$B_r = 2k \int_{y-h}^y \frac{yi}{(x^2 + yi^2)^2} dyi = 2k \left[ \frac{-1}{2(x^2 + yi^2)} \right]_{y-h}^y$$

$$B_r = 2k \left[ \frac{-1}{2(x^2 + y^2)} + \frac{1}{2(x^2 + (y-h)^2)} \right]$$

$$B_r = \frac{m\mu}{4\pi} \left[ \frac{1}{(x^2 + (y-h)^2)} + \frac{1}{(x^2 + y^2)} \right] \dots\dots\dots 7$$

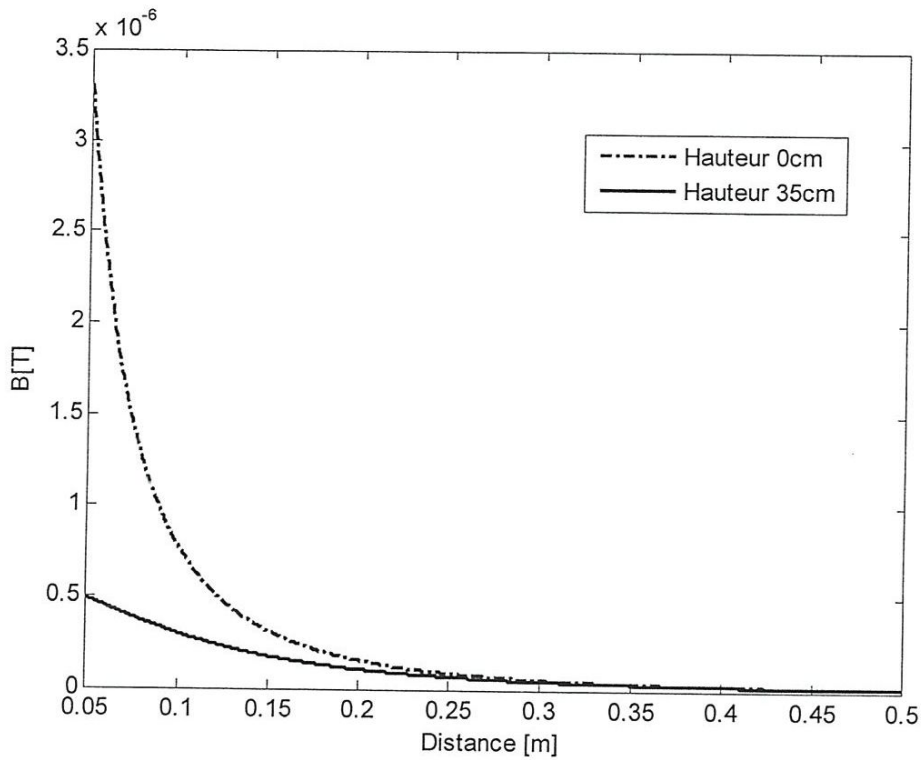
De la même façon on peut calculer  $B_\theta$

$$B_\theta = \int dB_\theta dyi = k \int_{y-h}^y \frac{x}{(x^2 + yi^2)^2} dyi$$

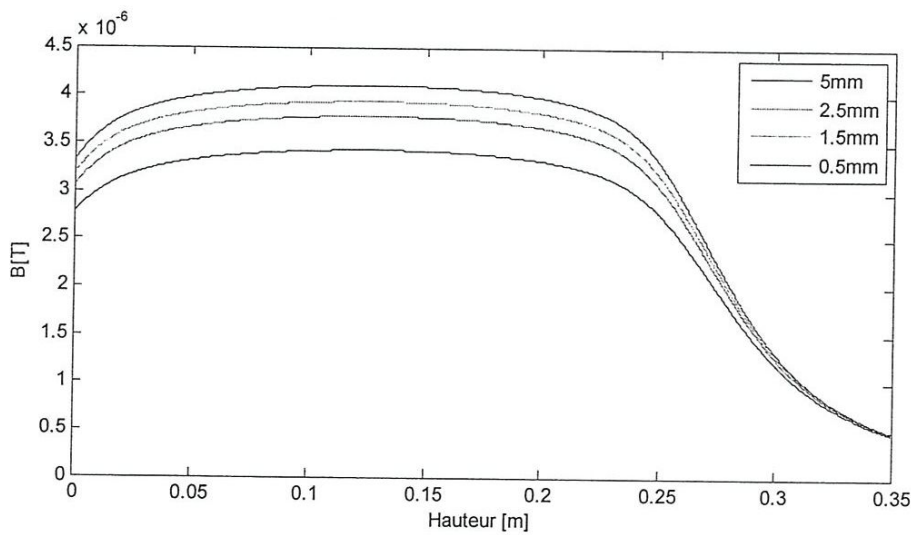
$$B_\theta = k \left[ \frac{\frac{xyi}{x^2 + yi^2} + \tan^{-1}\left(\frac{yi}{x}\right)}{2x^2} \right]_{y-h}^y$$

$$B_\theta = k \cdot \left[ \frac{y}{2x(x^2 + y^2)} + \frac{1}{2x^2} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \frac{y-h}{2x(x^2 + (y-h)^2)} - \frac{1}{2x^2} \tan^{-1}\left(\frac{y-h}{x}\right) \right] \dots\dots\dots 8$$

La figure représente la variation du champ magnétique d'une bobine pour  $d=0$  cm et  $d=35$  cm. Il est clair que le champ magnétique diminue en s'éloignant de la bobine suivant les deux directions verticale et horizontale.



**Fig.3.9. Champ magnétique d'une bobine pour deux hauteurs**



**Figure .3.10. Variation du champ magnétique en fonction de la hauteur pour plusieurs distances**

La figure 3.10 représente la variation du champ magnétique d'une bobine suivant la hauteur et à plusieurs distances :  $d=0.5$  mm, 5 mm, 2.5 mm et 5 mm. Le maximum du champ magnétique de la bobine est obtenu à une hauteur égale à la moitié de celle de la bobine. Cependant, le champ peut être quasiment constant le long de la bobine.

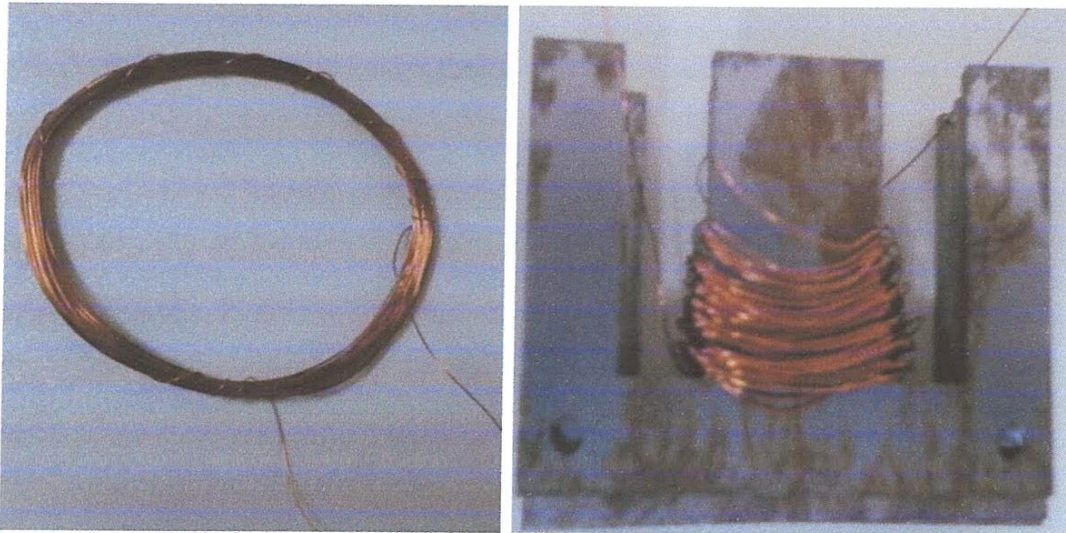


Figure 3.11. Les bobines sièges de l'induction (a) bobine à vide (b) bobine à noyau de fer.

○ Bobine à vide

Distance (cm)	Tension (mV)
1	30
2	28
3	23
4	15
10	10

Tableau 3.2. - F.E.M induite dans une bobine à vide

○ Bobine à noyau du fer

Distance (cm)	Tension (mV)
2	38
5	20
10	13
15	5

Tableau 3.3.- F.E.M induite dans une bobine à noyau de fer

Les tableaux 3.2 et 3.3 montrent les valeurs mesurées de la tension induite dans la bobine à vide et celle à noyau de fer en fonction de la distance par rapport à la bobine génératrice du champ.

La comparaison des deux tableaux montre que l'utilisation d'un noyau dans une bobine permet d'améliorer la valeur obtenue de la tension induite.

Ces résultats de mesure montrent que malgré la faible valeur du champ généré par la bobine il est possible de récolter une tension à partir du champ magnétique au voisinage.

Pour le cas de la ligne le champ est plus important, notamment proche de la ligne (des conducteurs), ce qui permet d'avoir une tension encore plus importante.

**Conclusion :**

Ce travail nous a permis de vérifier expérimentalement et par voie de calcul la possibilité de récupérer une partie de l'énergie du champ magnétique d'une ligne de transport. L'exploitation des champs au voisinage des lignes de transport peut être une piste d'une très grande importance pour autoalimenter généralement des microsystèmes.

La ligne de transport a été simulée au laboratoire par une bobine équivalente, ce qui a permis de réaliser des mesures du champ magnétique et de la tension induite.

Basé sur l'induction magnétique, les bobines cibles qui sont le siège d'une FEM induite ont permis de récolter des tensions de l'ordre d'une dizaine de mV. La tension récupérée dépend d'orientation du circuit, du nombre de spires mais aussi du noyau de la bobine. En effet, une bobine à noyau de fer permet d'augmenter la tension récupérée par rapport à une bobine à vide.

Une fois obtenue, la tension induite peut être améliorée par un traitement ultérieur en utilisant par exemple des montages multiplicateurs de tension...etc

## Références

- [1] Sébastien Boisseau « Récupération d'énergie vibratoire à électrets ».Thèse pour obtenir grade doctorat . Université de Grenoble,2011.
- [2] Electrotechnique.Luc lasne.professeur agrègè a l'université de bordeaux 1.prèface de jean-claude gianduzzo Enseignant chercheur en physique et electrotechnique a l'université de bordeaux1.
- [3] Bounaya Kamel, Les réseaux électriques, Eléments de description et d'analyse de base.professeur a l'université de 08 Mai 1945 Guelma
- [4] These pour obtenir le graded de docteur de l'université de joseph fourier specialité : << Génie électrique >>.par Octavian ENACHEANU , le titre : Modélisation fractale des réseaux électriques.
- [5] THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE Spécialité : Electronique Electrotechnique et Automatique Arrêté ministériel : 7 août 2006 Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes Dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchroneThèse soutenue publiquement le 21 novembre 2012.
- [6] Memoire d'etude pour obtenir le diplôme de master compatibilité electromagnetique : etude therorique expirementale de l'environement electromagnetique gènerer par les lignes HT,presentè par Abakar Ibrahim Djabaye , L'university 08 Mai 1945 Guelma Juin 2012
- [7] <http://www.veolia.com/fr/medias/dossiers/champs-electromagnetiques.htm> ».Les sources du champ electromagnetique.