

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : RÉSEAUX ÉLECTRIQUES



## *Mémoire de Master*

*En vue de l'obtention du diplôme de master en génie électrique*

# Réalisation d'un système de détection du champ magnétique d û au présence de métaux ferromagnétique

Réalisé par: - Djeddou Iskander sif eddine

Soutenue publiquement le:31/05/2017

Devant le jury composé de:

Mr. KHENE Mohamed Lotfi	MCA	Université de Biskra	Président
Mr. MIMOUNE Sourî Mohamed	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr. REZIG Mohamed	MAA	Université de Biskra	Examineur

*Année Universitaire 2016/2017*

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : **Réseaux électriques**



*Mémoire de Fin d'Etudes*

*En vue de l'obtention du diplôme:*

***Master(LMD)***

***Thème***

***Réalisation d'un système de détection du champ  
magnétique dû au présence de métaux  
ferromagnétique***

Présenté par

Djeddou Iskander sif eddine

Avis favorable de l'encadrement

*Cachet et signature*

## REMERCIEMENTS



Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude et reconnaissance à mon directeur de mémoire Pr MIMOUNE Sourî Mohamed .sa disponibilité, son soutien et surtout sa patience ont été des éléments déterminants dans la réussite de mon mémoire.

J'adresse mes respectueux remerciements aux membres du jury : Monsieur KHENE Mohamed Lotfi , MCA à l'université de Biskra, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury Monsieur REZIG Mohamed, MAA à l'université de Biskra d'être examinateur de mon travail.

Je souhaite également exprimer mes remerciements aux collègues et aux amis ainsi qu'à ma famille (ma mère, mon frère, et mes soeurs ) pour leurs encouragements et soutien. Merci à tous !!

**Résumé:**

**O**N a fait dans ce travail de connaître le principe de fonctionnement de détecteur des métaux et ces types, il est basé sur les techniques de l'électromagnétisme, ce que nous permet de connaître la position des corps ferromagnétiques.

**Abstract:**

**W**E have done in this work to know the operating principle of metal detector and these types, it is based on the techniques of electromagnetism, which allows us to know the position of the ferromagnetic bodies.

Réalisation d'un système de détection du champ  
magnétique dû au présence de métaux ferromagnétique

Djeddou Iskander sif eddine

July 3, 2017

# TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction Générale</i>	1
<b>1</b> <i>Généralité sur les systèmes de détections</i>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 La création d'un champ magnétique . . . . .	4
1.2.1 Les aimants : . . . . .	4
1.2.2 Solénoïde . . . . .	5
1.2.3 Électroaimants . . . . .	6
1.3 Méthodes de mesure d'un champ magnétique . . . . .	6
1.3.1 L'effet Hall . . . . .	6
1.3.2 Principe du capteur à effet hall . . . . .	7
1.4 La physique du magnétisme . . . . .	8
1.4.1 définition sur magnétisme . . . . .	8
1.4.2 Définition de l'aimantation . . . . .	8
1.4.3 Moments magnétiques . . . . .	9
1.5 Les martiaux magnétiques . . . . .	11
1.5.1 Les différentes classes de matériaux magnétiques . . . . .	11
1.5.2 Classification des substances magnétiques . . . . .	11
1.5.3 Diamagnétisme : . . . . .	12
1.5.4 Paramagnétisme : . . . . .	12
1.5.5 Ferromagnétisme . . . . .	13
1.5.6 Ferrimagnétisme . . . . .	14

1.5.7	Antiferromagnétisme . . . . .	15
1.6	Les détecteurs de métaux . . . . .	16
1.6.1	Principe de fonctionnement d'un détecteur de métaux . . . . .	16
1.6.2	Discrimination . . . . .	16
1.6.3	Principes physiques . . . . .	17
1.7	Les types de détecteurs de métaux . . . . .	17
1.8	Utilisation . . . . .	19
1.8.1	Déminage . . . . .	20
1.8.2	Archéologie . . . . .	20
1.8.3	Risques . . . . .	21
1.8.4	Détection sécuritaire . . . . .	21
1.9	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b><i>Modèles et étude des mathématiques</i></b>	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Équations de base de l'électromagnétisme . . . . .	22
2.2.1	Historique . . . . .	22
2.2.2	Équations de Maxwell . . . . .	23
2.3	Interprétation physique des équations électromagnétique . . . . .	24
2.3.1	équation de couplage électromagnétique . . . . .	24
2.4	Les équations de conservation . . . . .	26
2.4.1	Divergence de l'induction magnétique . . . . .	26
2.5	Loi de comportement des matériaux (Milieux physiques) . . . . .	27
2.6	Formulation des équations électromagnétiques . . . . .	28
2.6.1	Le modèle électrostatique . . . . .	28
2.6.2	Le modèle électrocinétique . . . . .	29
2.6.3	Le modèle magnétiostatique . . . . .	29
2.7	Le modèle magnétodynamique . . . . .	31
2.8	Formulation de l'équation magnétodynamique . . . . .	31
2.9	Conclusion . . . . .	34
<b>3</b>	<b><i>Réalisation d'un système de détection</i></b>	<b>35</b>
3.1	Introduction . . . . .	35

3.2	Description des appareils utilisés . . . . .	35
3.2.1	Un générateur de basses fréquences (GBF) . . . . .	36
3.2.2	Multimètre . . . . .	37
3.2.3	Les bobines : émettrice et réceptrice . . . . .	38
3.3	Essais pour la détection du signal à 50Hz . . . . .	40
3.3.1	Essais 1: bh1 émettrice et bh2 réceptrice (disposition bh12) . . . . .	41
3.3.2	Essais 2 : bh2 émettrice et bh1 réceptrice . . . . .	41
3.3.3	Essais 3 : bl1 émettrice et bl2 réceptrice (disposition bl12) . . . . .	42
3.3.4	Essais 4 : bl2 émettrice et bl1 réceptrice (disposition bl21) . . . . .	43
3.3.5	Essais 5 : bl2 émettrice et bl1 réceptrice (disposition bl21) . . . . .	44
3.4	Essais pour la détection du signal à fréquence variable . . . . .	45
3.4.1	Essais pour la détection du signal . . . . .	47
3.5	Essais pour la détection de barreaux magnétiques . . . . .	49
3.6	Conclusion . . . . .	52
<b>4</b>	<b><i>Amélioration d'un système de détection de matériaux ferromagnétiques</i></b>	<b>53</b>
4.1	Introduction . . . . .	53
4.1.1	Utilisation des bobines pour une (disposition bl21) à une distance 0.6m et 0.8m . . . . .	53
4.2	Amélioration du dispositif . . . . .	54
4.2.1	Première technique . . . . .	55
4.2.2	La deuxième technique . . . . .	56
4.3	Conclusion . . . . .	62
	<b><i>Conclusion Générale</i></b>	<b>63</b>



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

**D**e l'antiquité jusqu'au XVIIe siècle l'origine du magnétisme et les premières applications. L'histoire du magnétisme repose sur une durée longue de 3000 ans. On ne sait ni où ni quand il a été découvert, cependant quatre pistes restent envisageable en Égypte et à Sumer, en Amérique centrale, en Chine et enfin en Grèce. Cette histoire repose sur deux phénomènes d'attractions incompris et confondus durant l'antiquité celle d'un morceau de fer par la pierre d'aimant et celle de la paille par un morceau d'ambre frotté. L'observation du magnétisme repose sur la découverte de pierres qui pouvaient attirer le fer. Ces pierres ont été découvertes dans la région de Magnésie en Asie mineure, cette région a donc donné le nom de magnétisme au phénomène.[1]

En Égypte et à Sumer ce sont les plus anciennes traces de matériaux ferromagnétiques qui ont été découverte dans des tombes datées de 4000 ans av. J.-C. À ce jour il reste une question en suspens, les Égyptiens et les Sumériens avaient-ils découvert les propriétés magnétiques de tels matériaux. La civilisation chinoise nous livre le plus vieil écrit parlant de la pierre d'aimant qui a été écrit par un écrivain nommé Ganzhorn mort en 645 av. J.-C. Ces pierres appelées ( magnétite ) sont constituées d'oxyde de fer. Vers le 2ème siècle, les chinois ont exploité la propriété qu'a une aiguille métallique aimantée de s'orienter constamment vers la même direction ; c'est la naissance de la boussole. Les premiers traités de magnétisme ont été rédigés vers 1600 par l'anglais William Gilbert. C. A. Coulomb a réalisé les premières mesures de forces magnétiques s'exerçant sur deux charges magnétiques, puis Hans Oersted a établi le lien entre l'électricité et le magnétisme en observant que l'aiguille magnétique est déviée par un courant parcourant un fil conducteur situé à proximité de cette aiguille. W. Thomson a découvert l'effet magnétorésistance

qui consiste en la propriété qu'ont certains matériaux de présenter une résistance qui évolue lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique. Enfin S.A. Goudsmit et G. E. Uhlenbeck ont montré en 1925 que l'électron se comporte comme un aimant. Ce procédé est employé dans tous les types d'industries utilisant des pièces en matériau conducteur d'électricité, particulièrement la métallurgie, l'aéronautique, l'aérospatiale, l'armement et ferroviaire.[2] champ électromagnétique décèle les moindres morceaux de métal qui le pénètrent. Tout objet conducteur de courant, donc métallique, et soumis à une variation de champ magnétique est à son tour parcouru par des courants électriques induits, les courants de Foucault, Ces courants qui apparaissent au sein de l'objet conducteur, génèrent à leur tour un champ magnétique qui rayonne autour de l'objet. En d'autres termes, le champ magnétique initial régnant dans le portique est déformé par les courants induits et le nouveau champ magnétique qu'ils engendrent. Pour détecter les métaux, il faut analyser la présence d'un objet métallique. Dans un portique d'aéroport, des panneaux récepteurs captent cette déformation. Puis un système informatique détermine si celle-ci est supérieure au seuil fixé par le constructeur en accord avec les autorités. Si tel est le cas, une sonnerie s'enclenche. Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Dans le premier ce chapitre, nous allons commencer par présenter la définition du magnétisme et spécialement le champ magnétique et sa détection en présence de métaux.de l'aimantation des corps ferromagnétiques, qui peuvent affectées. L'objectif de ce chapitre est de présenter la détection et les notions de base du ferromagnétisme ainsi que les propriétés générales des ferrites.On présente ensuite les différentes classes de matériaux magnétiques, et nous allons faire le calcul des tensions entre les bobines qui font l'objet de la définition de système de détection.

Dans le deuxième ce chapitre on va présenter les équations de base à résoudre, pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques, sont les équations de Maxwell. Nous débuterons par un rappel de ces équations et nous en extrairons les équations qui permettent le calcul des grandeurs physiques.

La suite de ce chapitre va consister à exposer les différentes formulations mathématiques développées sur la base de ces équations.

Dans le troisième chapitre est consacré à la réalisation pratique du système de détection. La réalisation d'un système de détection à distance où la distance suit un cahier des charges telle que la distance varie entre 0.5m à 1m semble à première vue facile mais dans

la pratique cela peut engendrer des problèmes de détection suivant les moyens disponibles au laboratoire. Notre stratégie de détection est d'utiliser une bobine émettrice et une bobine réceptrice en faisant varier la fréquence par l'utilisation d'un GBF. Cela nous évite d'utiliser les systèmes à résonance et nous permet de localiser la fréquence qui doit être sensible à la détection. La stratégie de détection passe par deux étapes. La première est de s'assurer de la bonne réception du signal aux distances voulues. Et la deuxième étape est de chercher la fréquence la plus sensible à la détection.

Le chapitre précédent était consacré pour la détection à courte distance. Cette courte distance ne permet pas le passage de personne ou gros objets entre les deux bobines. Pour augmenter l'intervalle qui sépare les deux bobines, on a procédé à une amélioration personnelle du dispositif de détection. L'inconvénient d'obtenir une tension détectable à une grande distance de 0.6m à 0.8m était la contrainte sur la valeur maximal de la tension d'alimentation puisque'on utilise un GBF dont la source ne dépasse pas la valeur de 10V.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈMES DE DÉTECTIONS

### 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter la définition du magnétisme et spécialement le champ magnétique et sa détection en présence de métaux. de l'aimantation des corps ferromagnétiques, qui peuvent affectées. L'objectif de ce chapitre est de présenter la détection et les notions de base du ferromagnétisme ainsi que les propriétés générales des ferrites. On présente ensuite les différentes classes de matériaux magnétiques, et nous allons faire le calcul des tensions entre les bobines qui font l'objet de la définition de système de détection.

### 1.2 La création d'un champ magnétique

Le champ magnétique est créé par les conducteurs parcourus par un courant, par les corps aimantés ainsi que par tout champ électrique variable. Les sources de champs magnétiques existent à l'état naturel (Terre, aimant naturel) ou peuvent être créés artificiellement (aimant, électro-aimant).

#### 1.2.1 Les aimants :

Un aimant est constitué d'une pièce d'acier qui a conservé la mémoire d'un traitement magnétique antérieur. Il peut être plat, avoir la forme d'un barreau. Les effets magnétiques

des aimants sont dus à l'orientation d'une majorité des orbitales électroniques des atomes les constituants suivant une direction privilégiée.

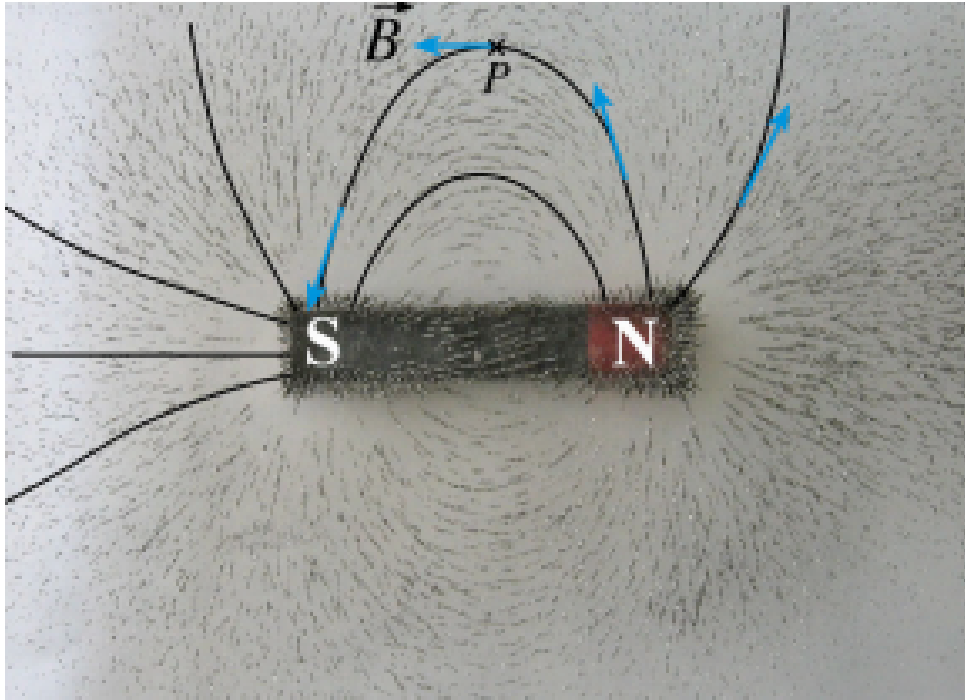


Fig 1.1: Champ d'excitation magnétique d'un aimant droit.

### 1.2.2 Solénoïde

Un solénoïde, parcouru par un courant  $I$ , constitue une source d'excitation magnétique. Le solénoïde donne un champ analogue à celui d'un aimant droit.

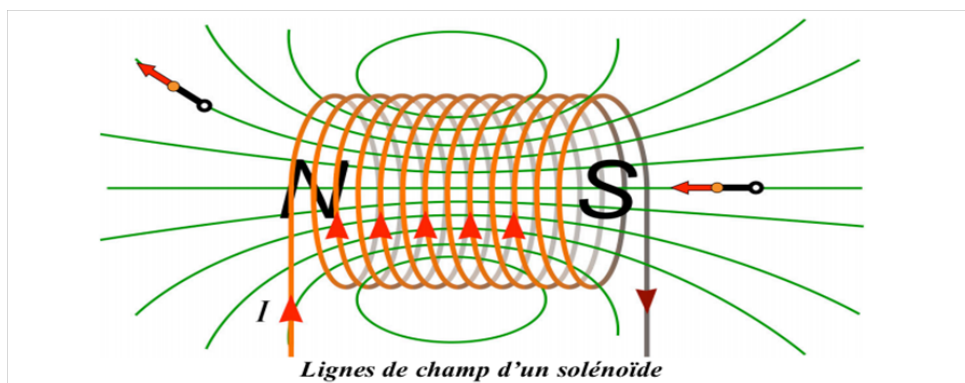


Fig 1.2: Champ d'excitation magnétique d'un solénoïde

### 1.2.3 Électroaimants

Un électroaimant est constitué d'un noyau ferromagnétique ou d'un noyau d'air, enlacé par un solénoïde possédant un grand nombre de spires (de quelques centaines à quelques milliers). Il peut être alimenté en courant alternatif ou continu. Sous l'influence du champ magnétique créé par le bobinage, le noyau s'aimante. Il crée une induction magnétique [3].

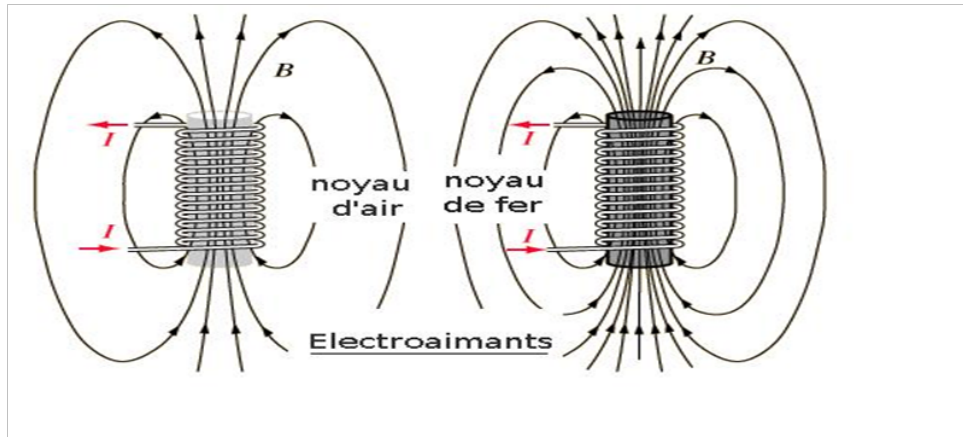


Fig 1.3: champ crée par un électroaimant

## 1.3 Méthodes de mesure d'un champ magnétique

Les méthodes de mesure des champs magnétiques sont assez nombreuses et il existe plusieurs principes de capteurs magnétiques. Un capteur de champ magnétique est un transducteur capable de convertir un champ magnétique en un signal électrique utile. Ils permettent bien évidemment de mesurer des champs magnétiques. Ces capteurs magnétiques sont utilisés dans une grande variété d'applications (mesure de position, mesure d'angle ou de vitesse de rotation ou la détection de pièces métalliques), en passant par la mesure de courant. La plupart du temps, ces capteurs sont basés sur l'effet Hall. Le principe, connu depuis longtemps, est bien maîtrisé [4].

### 1.3.1 L'effet Hall

Ce qu'on appelle effet Hall est l'apparition d'une différence de potentiel et d'un champ électrique transversal dans un conducteur, lorsque celui-ci est parcouru par un courant électrique et plongé dans une induction magnétique perpendiculaire  $\vec{B}$  à la direction de

ce courant.

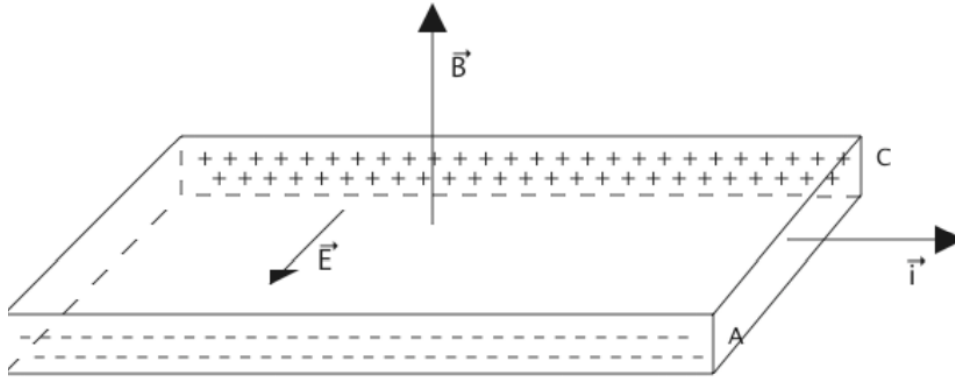


Fig 1.4: champ électrique transversal dans un conducteur

Avec le développement des semi-conducteurs, des valeurs plus élevées de tensions de Hall peuvent être engendrées. Comme matériau semi-conducteur, il est souvent fait usage de l'arséniure d'indium (In.As) . Un élément de In As, placé dans un champ magnétique, peut engendrer une tension Hall de 60 [mV] lorsque l'induction vaut 1 [T] et qu'il est parcouru par un courant de 100 [mA] . Le flux appliqué doit être perpendiculaire à la direction du courant. Lorsque le courant circule dans le sens longitudinal du conducteur, la tension engendrée est développée au travers de la largeur. La valeur de la tension Hall  $U_H$  est directement proportionnelle à la valeur de la densité de l'induction magnétique  $B$ . Cela signifie qu'il est possible de mesurer la valeur de l'induction  $B$  par l'intermédiaire de la tension Hall  $U_H$ .

### 1.3.2 Principe du capteur à effet hall

Si un courant  $I_0$  traverse un barreau en matériau conducteur, et si on applique un champ magnétique  $B$  perpendiculaire au sens de passage du courant, il se produira une tension  $V_h$  proportionnelle au champ magnétique ainsi qu'à  $I_0$  c'est la tension dite de Hall .La caractéristique principale d'un capteur à induction est d'étendre la mesure de  $10^{-3}$  à 105 [mT].

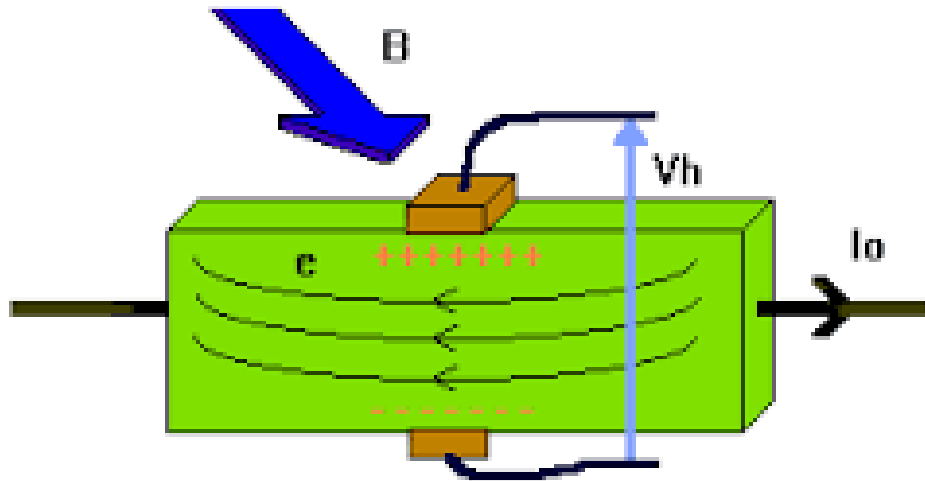


Fig 1.5: principe de l'effet Hall

$$V_h = K_h \cdot I_0 \cdot B \quad (1.1)$$

$K_h$  : constante de Hall fonction de matériau.

$B$ : Le champ magnétique appliqué en Gauss.

$I_0$ : Courant induit.

$V_h$  : tension de Hall.

## 1.4 La physique du magnétisme

### 1.4.1 définition sur magnétisme

Un champ magnétique, tout comme le champ de pesanteur, ne peut être touché ou vu et correspond à un champ vectoriel (un champ magnétique possède une direction et une intensité). Nous pouvons prendre conscience de l'existence d'un champ magnétique par son effet sur des objets particuliers sensibles[5].

### 1.4.2 Définition de l'aimantation

Les propriétés magnétiques d'un solide dérivent de sa structure cristallographique et du moment magnétique d'un atome libre qui a trois origines principales:

- Le spin de l'électron.



- Le moment cinétique orbital de l'électron par rapport au noyau.
- La variation du moment orbital créée par l'application d'un champ magnétique.

Selon le comportement de cet ensemble, on distingue différents types de magnétisme. On appelle substance magnétique tous les milieux susceptibles de s'aimanter par un champ magnétique, c'est-à-dire de créer un champ magnétique propre [5].

### 1.4.3 Moments magnétiques

Un matériau est constitué d'atomes; ces atomes possèdent un noyau et un certain nombre d'électrons périphériques. La charge équivalente de ce noyau est une charge positive, celle des électrons est négative. La rotation des électrons autour du noyau donne naissance à une force centrifuge qui tend à éloigner les électrons du noyau, mais ils ne peuvent s'en éloigner car la force de Coulomb les retient et s'oppose à cette force centrifuge comme illustré sur la figure 1.6 La rotation des électrons autour du noyau de l'atome donne naissance à un courant électrique [5]. On définit deux notions élémentaires qui sont : le moment orbital et le moment de spin.

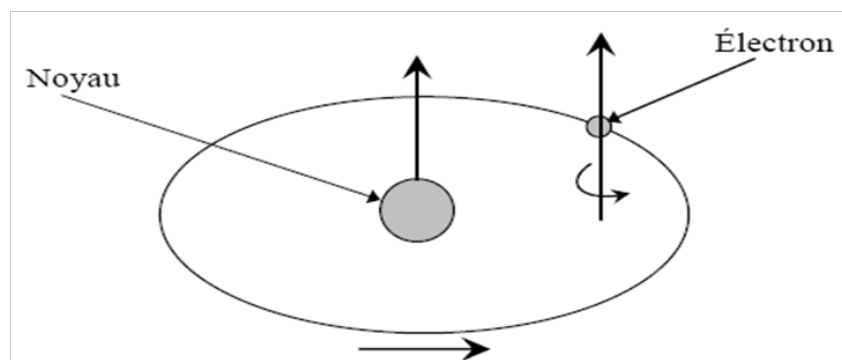


Fig 1.6: Mouvement d'électron

#### a)Le moment orbital :

L'électron décrit une orbite circulaire à raison de  $n$  rotations par seconde. Il est donc équivalent à un courant. Ce courant circulant dans une spire confondue avec l'orbite comme illustré sur la figure 1.7

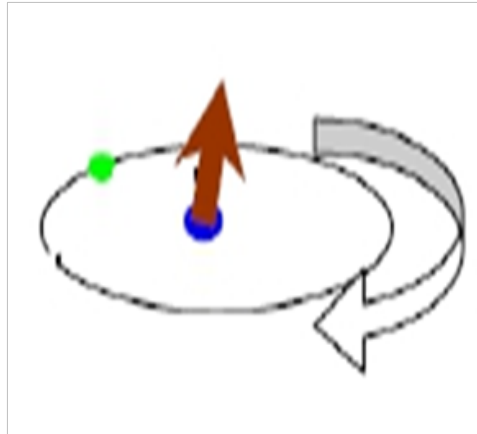


Fig 1.7: Moment orbital

**b)Moment de spin :**

De plus, nous savons que l'électron tourne aussi sur lui-même (spin) et présente donc un moment magnétique dit moment de spin . Ce dernier est une propriété purement quantique des électrons. Il est défini comme suit [6] :

$$m_s = \frac{e}{2m} \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (1.2)$$

Où e est la charge d'électron (  $e = -1.607 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ), m la masse d'électron (  $m = 9.107 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  ) et h est la constante de Plank (  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  ).

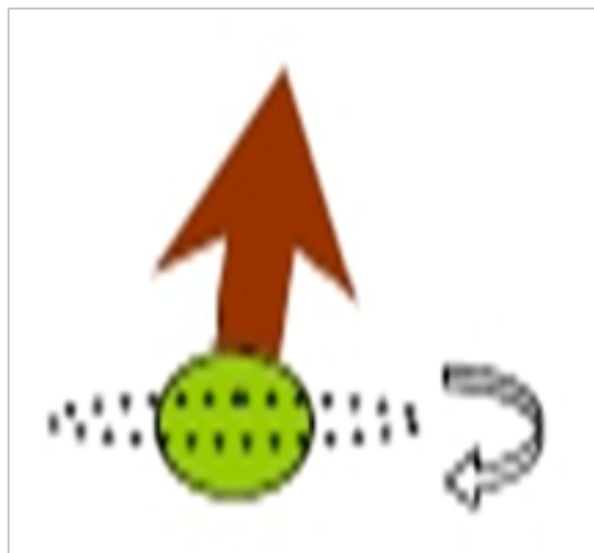


Fig 1.8: Moment de spin

Enfin, le moment magnétique total de l'atome est la somme des moments orbitaux et des moments de spin de ses électrons.

## 1.5 Les martiaux magnétiques

### 1.5.1 Les différentes classes de matériaux magnétiques

Tout d'abord, il est nécessaire de présenter les différentes relations décrivant un matériau magnétique soumis à un champ magnétique externe  $\vec{H}$ . L'induction magnétique  $\vec{B}$  à l'intérieur du matériau est liée au champ magnétique  $\vec{H}$  et à l'aimantation  $\vec{M}$  de la façon suivante [7], [8] :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.3)$$

De plus par définition, un matériau magnétique placé dans un champ magnétique acquiert un vecteur d'aimantation  $\vec{M}$  qui est proportionnel au champ d'excitation tel que :

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (1.4)$$

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi) \cdot \vec{H} \quad (1.5)$$

Où

$\vec{B}$  :: Induction magnétique

$\mu_0$ : Perméabilité du vide

$\vec{H}$ : Champ magnétique

$\vec{M}$ : Moment magnétique

$\chi$ : Susceptibilité magnétique

### 1.5.2 Classification des substances magnétiques

Un matériau magnétique apparaît comme un ensemble de moments magnétiques élémentaires; interagissant entre eux et organisés en un réseau cristallin. Les moments magnétiques dépendent de l'environnement magnétique de chaque atome; à savoir la nature et la position des atomes voisins, la température et le champ magnétique appliqué. Selon le comportement de cet ensemble, on distingue différents types de magnétisme. On appelle substance magnétique tous les milieux susceptibles de s'aimantés par un champ magnétique, c'est-à-dire de créer un champ magnétique propre [9].

### 1.5.3 Diamagnétisme :

Le diamagnétisme décrit le magnétisme d'un matériau formé d'atomes sans moment magnétique. L'aimantation  $M$  induite dans ce matériau par un champ magnétique  $H$  appliqué, est très faible et s'oppose à ce dernier. La susceptibilité magnétique  $\chi$  est négative et est définie par la pente pratiquement constante de la courbe d'aimantation  $M(H)$  :

$$\chi = \frac{\partial \mu}{\partial H} \quad (1.6)$$

Le diamagnétisme a pour origine les modifications du mouvement orbital des électrons sous l'effet du champ magnétique.

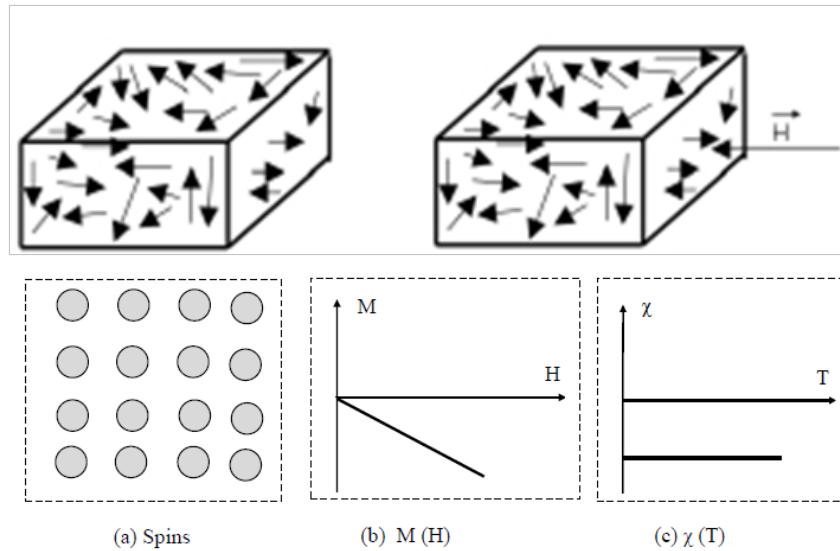


Fig 1.9: Diamagnétisme

### 1.5.4 Paramagnétisme :

On appelle paramagnétisme l'ensemble des propriétés magnétiques de certaines substances dont les atomes (ions) possédant un moment magnétique constant indépendant du champ magnétique extérieur, caractérisé par une susceptibilité relative positive, de faible amplitude. C'est un magnétisme non coopératif, il ne fait pas appel aux interactions d'échanges, les matériaux qui relèvent de ce modèle n'ont pas d'aimantation spontanée, l'orientation des moments magnétiques est aléatoire ce qui donne un moment résultant nul. Sous un champ magnétique extérieur, les corps paramagnétiques possèdent une aimantation non nulle, la susceptibilité est positive et inversement proportionnelle à la température absolue.

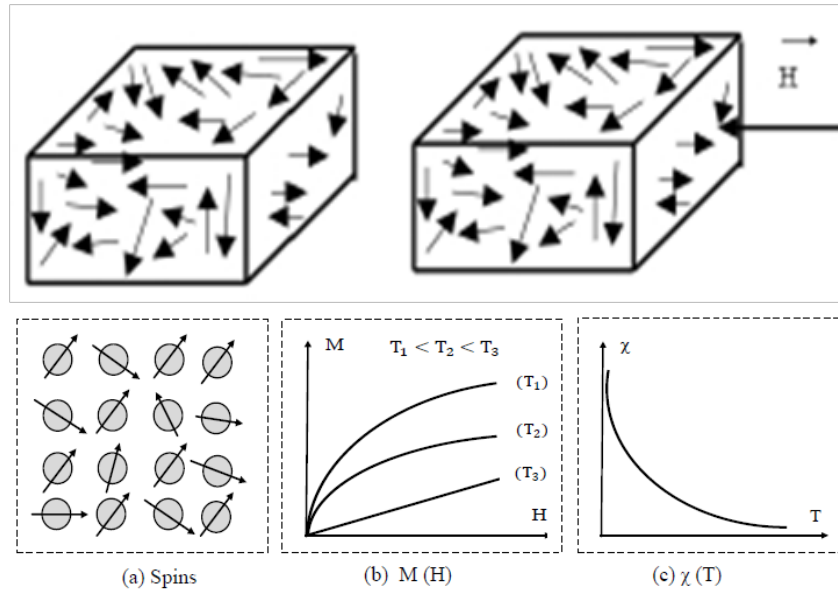


Fig 1.10: Paramagnétisme.

### 1.5.5 Ferromagnétisme

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité positive avec une amplitude importante. Un matériau Ferromagnétique peut faire apparaître une induction très importante pour des faibles valeurs du champ d'excitation extérieur. Un corps ferromagnétique à un moment magnétique spontané à l'échelle microscopique, les spins électroniques sont arrangés de façons régulières. Le ferromagnétisme est dû à l'existence d'interactions internes entre les moments magnétiques qui tendent à aligner les spins. On observe en effet que les moments atomiques sont bien alignés dans des zones appelées domaines magnétiques de Weiss [10].

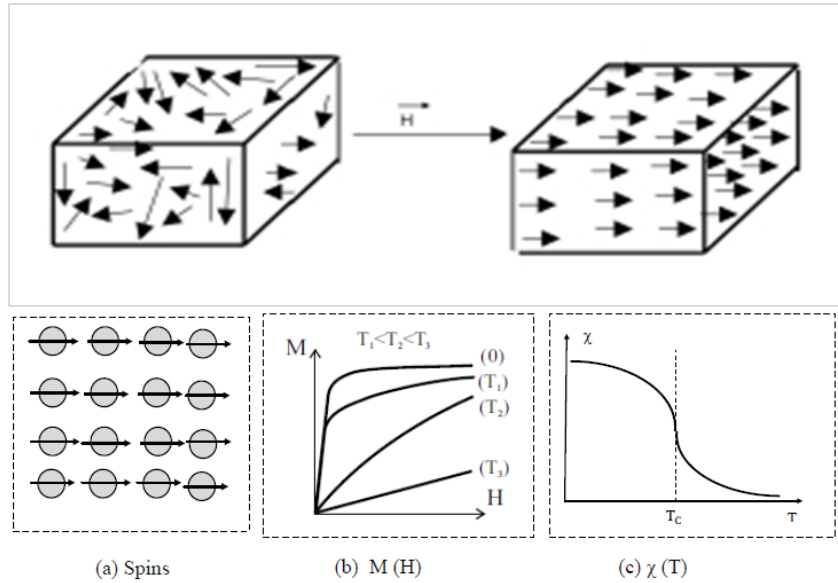


Fig 1.11: Ferromagnétisme

L'augmentation de la température rend l'aimantation faible . Au de-là d'une température appelée température de Curie, l'agitation thermique induit un comportement paramagnétique. Ainsi, l'aimantation, maximum à faible température, devient nulle au de-là d'une température de Curie. La susceptibilité des matériaux ferromagnétiques est très importante en dessous de la température de Curie et adopte un comportement paramagnétique, La susceptibilité de ces matériaux est généralement très grande .

### 1.5.6 Ferrimagnétisme

Le ferrimagnétisme est le magnétisme d'une classe d'oxydes appelés ferrites. Dans la structure cristalline de ces métaux, on peut distinguer deux familles, occupées par des ions possédant des moments magnétiques. Le couplage entre les deux familles donne une polarisation spontanée, c'est à dire, une polarisation existant en l'absence d'un champ magnétique appliqué. Comme dans les matériaux paramagnétiques, les atomes portent un moment magnétique permanent. Toute fois ces moments ne sont plus indépendants les uns des autres mais au contraire fortement lié. De cette interaction, qui porte le nom de couplage antiferromagnétique, résulte un arrangement antiparallèle des moments.

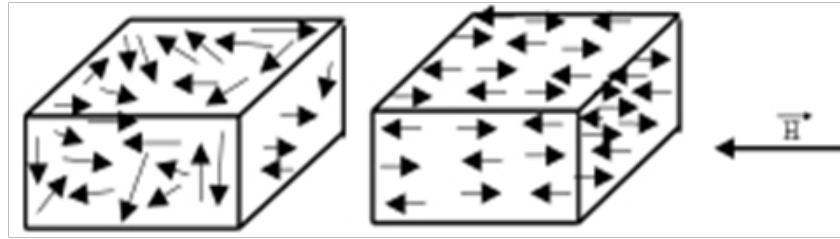


Fig 1.12: Ferrimagnétisme

### 1.5.7 Antiferromagnétisme

Les matériaux antiferromagnétiques contiennent des moments magnétiques permanents dus principalement aux spins. La susceptibilité est faiblement positive car les moments s'équilibrent dans un arrangement antiparallèle en deux sous-réseaux d'aimantations égales et opposées, ainsi l'aimantation est globalement nulle. Ceci est dû aux interactions d'échange négatives entre atomes voisins. La susceptibilité présente un maximum en fonction de la température à la température de Néel ( $T_N$ ). Au de là de cette température, l'agitation thermique perturbe l'ordre antiferromagnétiques et l'on retrouve un comportement paramagnétique[11] [13] [14].

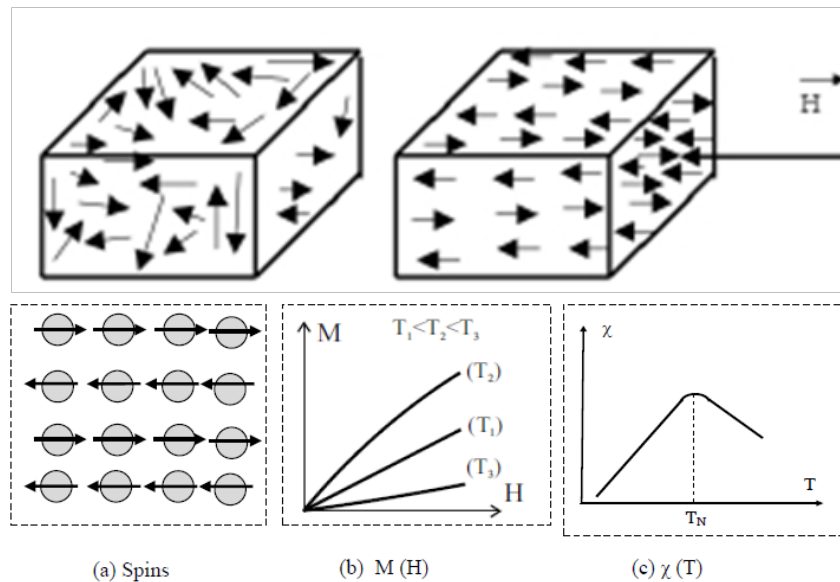


Fig 1.13: Antiferromagnétisme.

## 1.6 Les détecteurs de métaux

Certains pourraient penser que l'utilisation du dispositif de détection de métal limité aux professionnels et aux amateurs qui veulent s'enterrer sous la surface des métaux de terres ; mais en fait le dispositif détecteur de métal a un processus multi-applications, par exemple, est utilisé dans l'inspection par le personnel de sécurité à l'entrée des lieux qui exigent un degré élevé de sécurité et la sécurité, tels que les aéroports et les attractions touristiques. Ces appareils sont devenus des exigences de sécurité et de sûreté dans les aéroports, les universités, les écoles, les théâtres. Ceci est en plus de leur utilisation dans l'exploration et la recherche de minéraux sous la surface de la terre.

### 1.6.1 Principe de fonctionnement d'un détecteur de métaux

Un détecteur de métaux fonctionne en exploitant un phénomène physique bien connu: l'induction électromagnétique. Seuls les objets métalliques peuvent induire un courant. Un détecteur de métaux est composé de deux bobines.

**\* la bobine émettrice est traversée par un courant électrique alternatif sinusoïdal d'une certaine fréquence.**

**\* la bobine réceptrice récupère le courant induit. Il se produit un décalage de phase qui est analysé par un processeur.**

### 1.6.2 Discrimination

Plus l'objet métallique est gros, plus il sera conducteur et plus le décalage de fréquence sera grand. De même certains métaux sont meilleur conducteurs (l'argent notamment) et le décalage de fréquence sera d'autant plus grand. C'est en étudiant ce décalage de fréquence que l'on peut tenter de l'objet détecté. Mais dans la pratique, c'est un peu différent. En effet un détecteur de métaux cherche du métal et aussi ses différents alliages. La conductivité électrique d'un alliage est différente d'un alliage à un autre et sa valeur peut être proche entre deux alliages de nature très différente [15].



### 1.6.3 Principes physiques

La détection d'un métal dans l'air par un appareil électronique se fait toujours selon le même principe physique : l'induction magnétique. Un conducteur électrique transportant du courant produit un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure mais l'inverse est également vrai. Un champ magnétique variable produit un courant dans un conducteur. A travers une bobine, la loi de Faraday explicite la force électromotrice produite par la variation du champ magnétique. La présence d'un objet métallique dans le champ magnétique induit par une bobine modifie la tension aux bornes de cette dernière ce que l'on repère en électronique par la modification de l'inductance de la bobine.

## 1.7 Les types de détecteurs de métaux

Les premiers détecteurs fonctionnaient selon le principe du battement de fréquence mais ils étaient peu performants. La technique des très basses fréquences donna une meilleure sensibilité, mais dans les années 1960, l'induction par impulsion fut mise au point et elle est actuellement encore la plus utilisée.

### 1.7.0.1 Détecteur à battement de fréquence :

Les détecteurs à battement de fréquence furent les premiers à apparaître car ils sont simples à mettre en oeuvre mais se sont également les moins sensibles. Le principe est le battement de fréquence. Il utilise, en fait, deux oscillateurs, l'un fixe, l'autre sensible aux modifications du champ magnétique. La modification du champ magnétique d'une bobine influe, comme nous l'avons vu, sur son inductance et donc, si l'on construit un oscillateur autour de cette dernière, celui-ci aura une fréquence qui réagit avec le champ magnétique et donc la présence de métal. Pour l'utiliser, il suffit de comparer le signal issu de cet oscillateur avec un signal de référence, ce dernier représente le signal de premier oscillateur qui ne serait pas modifié par la présence de métal. Le signal comparé peut servir à allumer une diode ou être relié à un amplificateur pour entendre via un haut parleur la différence des fréquences si celle-ci est comprise entre 20Hz et 20kHz [16].

### 1.7.0.2 Détecteur à très basse fréquence :

Les fréquences utilisées sont inférieures à 30kHz. Ce détecteur est composé de deux bobines, une émettrice et une réceptrice. La bobine émettrice traversée par un courant sinusoïdal génère autour d'elle un champ magnétique; lorsqu'un objet métallique passe dans ce champ magnétique, des courants de Foucault apparaissent en son sein. Ces courants génèrent à leur tour un champ magnétique qui tend à compenser le champ magnétique créé par la bobine émettrice. La bobine réceptrice va réagir au champ magnétique émis par l'objet métallique, un courant induit va la traverser. Ce courant traité par l'électronique permet de savoir s'il y a ou non un objet métallique. Ce détecteur permet de discriminer les métaux et les ferromagnétiques. Le signal perçu par la bobine réceptrice est déphasé par rapport au signal émis. Le déphasage dépend des métaux et permet ainsi de les discriminer.

### 1.7.0.3 Détecteur à induction pulsée :

Le détecteur à induction pulsée ne nécessite qu'une seule bobine. Ces détecteurs sont très performants dans la recherche en grande profondeur. Ils peuvent détecter jusqu'à 1,50 m sous le sol pour des objets réduits et jusqu'à environ 3,50 m pour de grosses masses métalliques. Une puissante impulsion de courant est envoyée dans la bobine. Chaque impulsion génère un champ magnétique très bref. Quand l'impulsion prend fin, la polarité du champ s'inverse et s'écroule soudainement ce qui provoque un pic de courant, l'impulsion de retour. Celui-ci dure quelques microsecondes et cause un autre courant à travers la bobine. Le processus se répète. Si le détecteur est au-dessus d'un objet métallique, l'impulsion crée un champ magnétique opposé dans l'objet. Quand l'impulsion s'arrête, le champ magnétique de l'objet augmente la durée de l'impulsion de retour. Un circuit test permet de contrôler la durée de l'impulsion de retour. En le comparant avec la longueur de départ, le circuit détermine si un autre champ magnétique a rallongé le temps de décroissance de l'impulsion de retour.

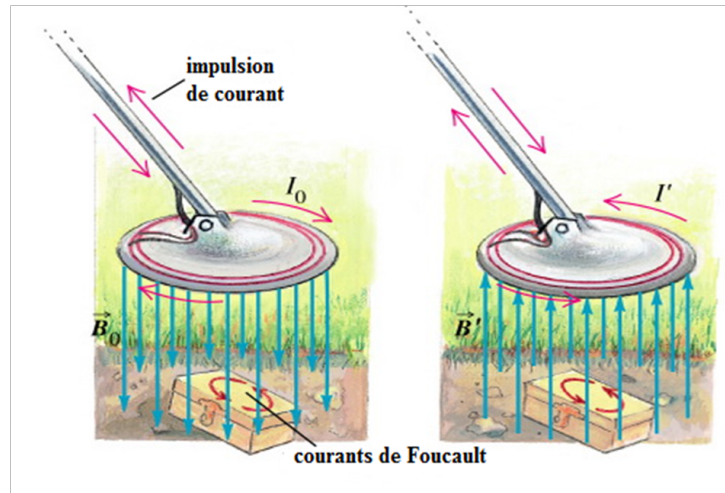


Fig 1.14: Détecteur à induction pulsée (détection souterraine)

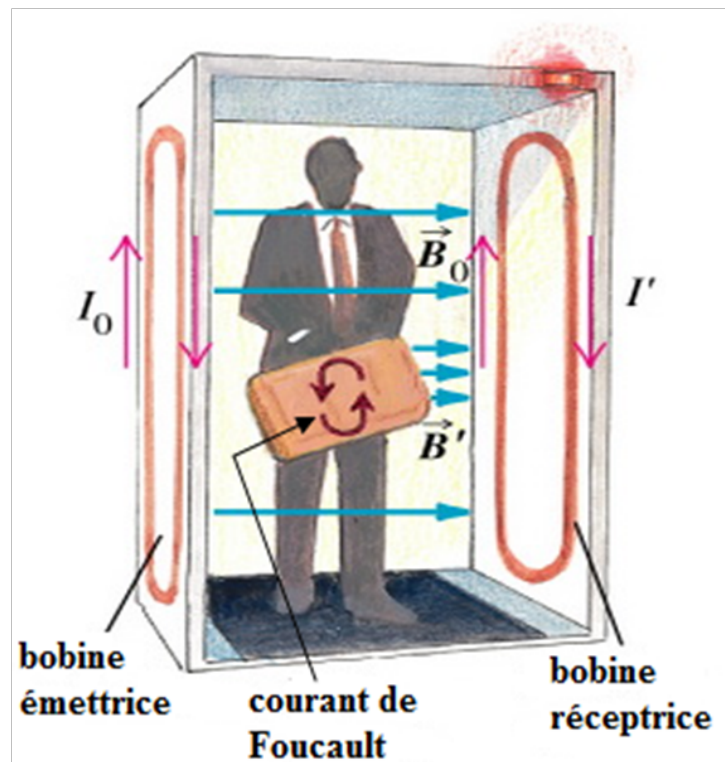


Fig 1.15: : Détecteur à induction pulsée (pour la sécurité)

## 1.8 Utilisation

L'utilisation d'un système de détecteur de métaux en plusieurs endroits, parmi lesquels:

### 1.8.1 Déminage

Le déminage militaire a pour but de permettre à des unités de se frayer un chemin parmi un champ de mines ou de sécuriser un environnement militaire (camp, base) où des mines ont été cachées, du déminage humanitaire qui tend à rendre un terrain miné accessible, sans danger pour des populations environnantes.



Fig 1.16: Equipé d'un détecteur de métaux

### 1.8.2 Archéologie

Les détecteurs de métaux font parfois l'objet d'une utilisation professionnelle dans le domaine de l'archéologie. En effet, l'objectif fondamental de celle-ci n'est pas la collecte d'objets métalliques mais leur mise au jour dans le cadre de fouilles méthodiques comme la fouille programmée, en documentant le contexte auquel ils étaient associés. Les détecteurs de métaux sont donc employés marginalement à des fins de vérification ou dans des contextes d'urgence dans le cadre d'une fouille préventive [17].

### 1.8.3 Risques

Tous les gros objets ne sont pas des trésors et les lieux de combats des deux dernières guerres nous le rappellent régulièrement. Du fait même de leur fabrication (fer, acier, plomb, cuivre), les engins explosifs se détectent très bien. L'utilisation de détecteurs de métaux dans ces contextes nécessite une grande vigilance : il est recommandé de ne jamais toucher ni démonter une munition non explosée car elle demeure toujours dangereuse. Chaque année, des accidents sont à déplorer dans lesquels sont impliqués des pratiquants de la détection qui n'ont pas su observer cette règle élémentaire de sécurité [17].

### 1.8.4 Détection sécuritaire

On trouve les détecteurs de métaux en usage sécuritaire, par exemple dans les aéroports pour détecter d'éventuelles armes métalliques cachées sur les passagers d'un avion.



Fig 1.17: Détecteur de métaux dans un aéroport

## 1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons fait une étude sur les matériaux magnétiques qui sont à la base des applications des dispositifs . Nous avons rappelé que chaque atome dans la matière possède un moment magnétique qui résulte des moments de spin et du moment orbital des électrons. On peut trouver plusieurs formes de magnétisme selon la susceptibilité de chaque matériau. Parmi les matériaux magnétiques les plus utilisés.

## CHAPITRE 2

# MODELÉS ET ÉTUDE DES MATHÉMATIQUES

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les équations de base à résoudre, pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques, sont les équations de Maxwell. Nous débuterons par un rappel de ces équations et nous en extrairons les équations qui permettent le calcul des grandeurs physiques.

La suite de ce chapitre va consister à exposer les différentes formulations mathématiques développées sur la base de ces équations.

### 2.2 Équations de base de l'électromagnétisme

#### 2.2.1 Historique

Tout au début, les phénomènes électriques et magnétiques ont été étudiés séparément. Les interactions entre ces deux phénomènes ont été mises en évidence pour la première fois par : Ampère (1775-1836), qui a prouvé que la source du magnétisme est le courant électrique, Gauss (1777-1855), qui a démontré que la source du champ électrique est la charge électrique statique, et Faraday (1791-1867) qui relie la création de l'un des champs électrique et magnétique par l'autre et vis versa. Le couplage des deux phénomènes qu'on regroupe en un mot (Électromagnétisme), on le doit à James Clerk Maxwell (1831-1879). Ce génie a exploité les découvertes des précédents, pour donner une formulation la plus

complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques [18][19][20].

## 2.2.2 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne ou est due à l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans n'importe quel système d'axes. Ainsi, dans tous les problèmes nécessitant le calcul du champ électromagnétique qui règne dans un système matériel, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de Maxwell, qui sous leurs formes la plus générale s'écrivent :

- **Équations de Maxwell:**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{D} = \rho \end{array} \right. \quad (2.1)$$

- **Lois constitutives des milieux**

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \mu(H) \cdot \vec{H} \\ \text{où} \\ \vec{H} = \nu(B) \vec{B} \\ \vec{D} = \xi \cdot \vec{E} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

où

$\vec{j}_c = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ : Densité des courants de déplacement négligeable à basse fréquence [A/m<sup>2</sup>].

$\vec{H}$ : Vecteur champ magnétique [A/m].

$\vec{E}$ : Vecteur champ électrique [V/m].

$\vec{B}$ : Vecteur induction magnétique [T].

$\vec{D}$ : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m<sup>2</sup>].

$\vec{j}_c$ : Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m<sup>2</sup>].

$\mu$ : Perméabilité magnétique [H /m].

$\rho$ : Densité volumique de charges électriques [C/m<sup>3</sup>].

$\xi$ : Permittivité diélectrique [F/m].

$\nu$ : Réductivité magnétique [m/H].

A ces équations, doit être associée la loi d'Ohm généralisée.

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} + \sigma \cdot \vec{E} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

où :

$\vec{v}$  : Vecteur vitesse des pièces conductrices susceptible de ce déplacé [m/s].

$\sigma$ : Conductivité électrique [S/m].

$\vec{J}_{ex}$  : Densité du courant d'excitation (source) [ $A/m^2$ ].

$\sigma \cdot \vec{E}$  : : Densité des courants induits par variation du champ électrique E [ $A/m^2$ ].

$\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ : Densité des courants induits par mouvement [ $A/m^2$ ].

## 2.3 Interprétation physique des équations électromagnétique

### 2.3.1 équation de couplage électromagnétique

- **Loi d'induction de Faraday**

$$r\vec{ot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Cette équation exprime le couplage électrique- magnétique en régime dynamique et où la variation temporelle de  $\vec{B}$  détermine le  $r\vec{ot}\vec{E}$  , mais ceci ne suffit pas pour déterminer complètement  $\vec{E}$  .

- **Démonstration :**

Quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique, en coupant des lignes de flux, une force électromotrice (F.e.m) est induite dans ce conducteur [21], tel que :

$$e = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

où est une boucle fermée (circuit).

De la même manière, une (F.e.m) est aussi induite, si le flux  $\Phi$  varie dans le temps à travers un circuit fixe, tel que :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ où}$$

$$\Phi = f(x, y, z, t) ;$$

$$\text{Alors } e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Où (S) est une surface s'appuyant sur le contour (C).

Dans les deux cas, la force électromotrice induite (e) et le taux de la variation temporelle du flux magnétique ( $\frac{d\Phi}{dt}$ ) sont liés par la loi de Faraday de la manière suivante:



$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

D'après le théorème de Stockes (voir Annexe I), nous avons :

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_s r\vec{ot}\vec{E} \cdot d\vec{s}$$

On obtient :

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_s r\vec{ot}\vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Ainsi, nous aurons :

$$r\vec{ot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

• **Théorème d'Ampère**

$$r\vec{ot}\vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Cette équation exprime la dépendance du champ magnétique de la densité du courant total (conduction plus le déplacement).

Cette relation peut être interprétée comme étant le taux de variation spatiale du champ en fonction du taux de mouvement des charges.

• **Démonstration**

L'énoncé général du théorème d'AMPÈRE indique que l'intégrale curviligne de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique  $\vec{H}$ , le long d'un contour fermé (C), est égale au courant encerclé par ce contour [21]. Soit :

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = I$$

(S) : est la surface qui s'appuie sur le contour(C).

$\vec{J}$  : est la densité du courant.

Selon le théorème de STOCKES, nous avons :

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s r\vec{ot}\vec{H} \cdot d\vec{s}$$

$$\text{Donc } \int_c r\vec{ot}\vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

$$D'où r\vec{ot}\vec{H} = \vec{J}$$

• **Continuités du courant : densité du courant de déplacement :**

Le courant total I traversant une surface (S) fermée, est donné par :

$$\begin{cases} I = \oint_c \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dQ}{dt} \\ dQ = \rho \cdot dV \end{cases} \quad (2.3)$$

Où :

dQ : élément de charge,

dV : élément de volume.

$$\text{D'où } I = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot dV)$$

On divise par l'élément de volume  $\Delta V$  on obtient :

$$\frac{\oint_C \vec{J} \cdot d\vec{s}}{\Delta V} = \frac{-\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot dV)}{\Delta V}$$

Si  $\Delta V \mapsto 0$ , le membre de gauche de l'équation tend, par définition, vers  $\text{div} \vec{J}$  (la divergence de la densité du courant; théorème d'ostrogradski - Green), tandis que celui de la droite tend vers  $-\frac{\partial \rho}{\partial t}$ . Par conséquent :  $\text{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$

C'est l'équation de continuité du courant, pour des champs statiques :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}$$

Cette densité due au mouvement de charges réelles, (électrons, protons et ions), est appelée densité du courant de conduction ( $J_c$ ).

Si :  $\text{rot} = (J_c)$  reste valable pour les champs dépendants du temps, il vient alors que :

$$\text{div} \vec{J}_c = \text{div}(\text{rot} \vec{H}) \implies \text{div} \vec{J}_c = 0$$

Une contradiction avec l'équation de continuité du courant ( $\text{div} \vec{J}_c = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ )

c'est pourquoi, Maxwell, fut amené, à postuler que :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_D$$

Où,  $\vec{J}_D$  est la densité du courant de déplacement définie par :

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

On aura alors :

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{J}_c &= \text{div}(\text{rot} \vec{H}) - \text{div} \vec{J}_D \\ &= 0 - \text{div} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ &= 0 - \frac{\partial}{\partial t}(\text{div} \vec{D}) \\ &= -\frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned}$$

## 2.4 Les équations de conservation

### 2.4.1 Divergence de l'induction magnétique

$$\text{div} \vec{B} = 0$$

Cette relation traduit mathématiquement le fait que les seules sources de champ magnétique sont les courants électriques, et il n'existe pas de charge magnétique; c'est pourquoi les lignes du champ sont toujours fermées sur elles-mêmes. Elles forment des boucles. Ces

boucles n'ont ni point de départ, ni point d'arrivée, ni point de convergence, d'où la nomination d'induction conservative (champ conservatif).

• **Théorème de Gauss :**

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

Une charge électrique est source d'un champ électrique; autrement dit, les lignes de champs électriques commencent et se terminent autour des charges électriques [8].

• **Démonstration :**

L'énoncé général du théorème de Gauss indique que la charge totale  $Q(V)$  contenu dans un volume  $V$ , limité par la surface fermée  $S(V)$ , est égale au flux du vecteur déplacement électrique  $\vec{D}$  sortant de la surface  $S(V)$ . C'est à dire :

$$\begin{aligned} \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} &= Q_{in}(V) \\ &= \oint_v \rho \cdot dv \end{aligned}$$

D'après le théorème d'ostrogradski Green (voir Annexe I), nous avons

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint_v \operatorname{div} \vec{D} \cdot dv$$

D'où :

$$\oint_v \operatorname{div} \vec{D} \cdot dv = \oint_v \rho \cdot dv$$

Ainsi

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

## 2.5 Loi de comportement des matériaux (Milieux physiques)

• **Induction et champ électriques :**

Pour tout champ électrique, dans un milieu isotrope, de permittivité  $\xi$ , nous avons :

$$\vec{D} = \xi \cdot \vec{E}$$

où  $\xi = \xi_0 \xi_r$

$\xi_0$  : Permittivité absolue du vide [F/m],

$\xi_r$  : Permittivité relative du milieu [USI].

Cette équation d'écrit la relation entre le vecteur induction électrique  $\vec{D}$  et le vecteur champ électrique  $\vec{E}$ . Elle est linéaire si  $\xi$  est constante.

Dans le cas des conducteurs non-polarisés, nous avons :

$$\vec{D} = \xi_0 \cdot \vec{E} ;$$

$$\xi_0 = \frac{1}{36 \cdot \Pi \cdot 10^9} ; [\text{F} / \text{m}]$$

La détermination de de l'équation et de l'équation détermine complètement .

• **Induction et champ magnétiques :**

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$\mu_0$ : Perméabilité magnétique absolue du vide

$$\mu_0 : 4.\pi.10^{-7} \text{ [H/m]},$$

$\mu_r$  : Perméabilité relative du milieu [USI].

Dans le cas d'un aimant permanent, nous avons :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{B}_{re}$$

$\vec{B}_{re}$  : Vecteur induction magnétique rémanente [T].

L'équation détermine la relation entre le champ magnétique et l'induction magnétique.

Cette relation donne la courbe d'aimantation  $B = f(H)$ .

Une variation  $\vec{H}$  de conduit à une variation de l'induction  $\vec{B}$  on trouve par la suite le cycle d'hystérésis dont la forme se diffère d'un matériau à un autre; donc d'un dispositif électrotechnique à un autre.

## 2.6 Formulation des équations électromagnétiques

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier aux siens des dispositifs électrotechniques sont régis pas quartes équations aux dérivées partielles de MAXWELL et par les trois relations du milieu considéré. Nous disposerons alors du système des sept équations. Ces équations décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivants les dispositifs que l'on étudie, certain phénomènes deviennent négligeables ; Les équations se découples donnant alors des modèles plus simples[23].

### 2.6.1 Le modelé électrostatique

Dans ce modèle, le champ  $\vec{E}$  est produit par des charges stationnaires qui ne varient pas en terme de répartition, et de valeur avec le temps. Ce modèle est régit par les équations suivantes[23] . :

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = \vec{0}; \text{ car } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \\ \text{div} \vec{D} = \rho \\ \vec{D} = \xi \vec{E} \end{cases} \quad (2.4)$$

La relation  $\text{rot} \vec{E} = \vec{0}$  : permet de définir une fonction auxiliaire V appelée potentiel scalaire électrique, tel que :  $\vec{E} = -\text{grad}V$

Ce modèle se ramène alors à l'équation suivante :

$$\text{div}(\xi \text{grad}V) + \rho = 0$$

### 2.6.2 Le modèle électrocinétique

Ce modèle est utilisé dans l'étude de la répartition du courant électrique de conduction dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues[23] .

Il est régit par les équations :

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = \vec{0} \\ \text{div} \vec{J} = 0 \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (2.5)$$

La relation :  $\text{rot} \vec{E} = \vec{0}$  ; implique qu'il existe encore un potentiel électrique scalaire V (tension électrique), tel que :  $\vec{E} = -\text{grad}V$

Le modèle se ramène alors à :

$$\text{div}(\text{grad}V) = 0$$

### 2.6.3 Le modèle magnétiostatique

Dans ce modèle, le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  de l'équation est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps[23] .

Dans le cas de ce modèle, deux sortes de formes, peuvent l'exprimer. Il s'agit de :

#### 2.6.3.1 Le modèle magnétiostatique scalaire

Dans ce cas, les courants électriques sont nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps. D'après les équations et , on obtient :

$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{0}; \text{courants nuls} \\ \text{div}\vec{B} = 0; \text{induction conservative} \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec la loi du milieu,  $\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_{re}$

$\vec{H}$  Dérive d'un potentiel scalaire magnétique  $\Phi$ , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que :

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{div}(\mu\vec{\text{grad}}\Phi) = \text{div}\vec{B}_{re}$$

### 2.6.3.2 Le modelé magnétostatique vectoriel :

Dans le modèle magnétostatique vectoriel, les courants électriques ne sont pas nuls. Il vient alors que :

$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{0} \\ \text{div}\vec{B} = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Avec la loi du milieu :  $\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_{re}$

La relation  $\text{div}\vec{B} = 0$ , permet de définir une fonction vectoriel  $\vec{A}$  appelée potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = r\vec{\text{rot}}\vec{A}$$

D'où le système d'équations

$$r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{j}$$

En tenant compte des relations de l'analyse vectorielle, l'équation devient :

$$r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{\text{grad}}v.r\vec{\text{rot}}\vec{A} + vr\vec{\text{rot}}r\vec{\text{rot}}\vec{A}$$

$$r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{\text{grad}}v.r\vec{\text{rot}}\vec{A} + v(-\Delta\vec{A} + \vec{\text{grad}}\text{div}\vec{A})$$

Dans notre travail on utilise la Jauge de Coulomb  $\text{div}\vec{A} = 0$ , on obtient alors :

$$r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{\text{grad}}v.r\vec{\text{rot}}\vec{A} - v\Delta\vec{A}$$

$$= \vec{\text{grad}}v.r\vec{\text{rot}}\vec{A} - v(\text{div}\vec{\text{grad}}\vec{A})$$

Dans chaque région du dispositif étudié, la réductivité magnétique est constante c'est-à-dire

$$\vec{\text{grad}}v = 0$$

L'équation précédente devient :

$$r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) = -(\text{div}(v\vec{\text{grad}}))\vec{A} = \vec{J}$$

## 2.7 Le modelé magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources du courant ou tension sont dépendantes du temps, ainsi, les champs électrique et magnétique seront alors couplés par la présence des courants induits (ou courants de Foucault)[23]. Le potentiel vecteur  $\vec{A}$  joue un rôle primordial, où la connaissance de  $\vec{A}$  implique la connaissance de tous les autres grandeurs physiques où :

$$\vec{B} = r\vec{\text{ot}}\vec{A}$$

En termes d'équations, nous avons :

$$\left\{ \begin{array}{l} r\vec{\text{ot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \\ r\vec{\text{ot}}\vec{H} = \vec{J} \\ \vec{B} = r\vec{\text{ot}}\vec{A} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

A ces équations, nous ajoutons les lois caractéristiques au milieu

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \mu\vec{H} \\ \vec{D} = \xi.\vec{E} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

C'est à partir de ces équations de base de ce modèle que nous pouvons déterminer l'équation décrivant l'évolution des phénomènes électromagnétiques dans un dispositif où l'ensemble des champs présents sont en fonction explicite ou implicite de l'espace et du temps.

L'utilisation de ce modèle est très réponde dans l'étude des machines électriques, des dispositifs du chauffage par induction, des transformateurs, etc.

## 2.8 Formulation de l'équation magnétodynamique

- **Une formulation de potentiel vecteur magnétique : les raisons de ce choix**

Pour le calcul numérique, différents choix de variables d'état aboutissant à des formulations différentes sont possibles. Les formulations en potentiels en particulier, sont toute fois mieux adaptées aux éléments finis.

Par ailleurs, dans le cadre du chauffage par induction, les avantages présentés par ce type de formulation sont nombreux :

- Elle permet d'imposer des sources électriques proches des procédés réels (densités de courant différences de potentiels),
- La réaction d'induit est directement prise en compte,
- La grandeur utile pour le chauffage, à savoir, la densité de puissance induite, est directement liée à la variable d'état, bénéficiant ainsi d'un maximum sur la précision.

En se basant sur les équations de J. C. Maxwell, on peut formuler l'équation qui décrit l'évolution spatiale- temporelle des phénomènes électromagnétiques. Nous avons :

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{Avec: } \vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

On obtient:

$$\text{rot} \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t}(\text{rot} \vec{A})$$

$$= -\text{rot} \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$$

$$\text{rot} \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \implies \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$  est un champs conservatif, il dérive donc d'un potentiel scalaire électrique V,

tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad} V \implies \vec{E} = -\left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right)$$

A partir de l'équation et de l'équation nous avons :

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \vec{B} \right) = \vec{J}$$

A partir des équations et nous avons :

$$\Leftrightarrow \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_{ex} + \sigma \cdot \vec{E} + \sigma (\vec{\nu} \wedge \text{rot} \vec{A})$$

$$\Leftrightarrow \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_{ex} - \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right) + \sigma (\vec{\nu} \wedge \text{rot} \vec{A})$$

$$\Leftrightarrow \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad} V - \sigma (\vec{\nu} \wedge \text{rot} \vec{A}) = \vec{J}_{ex}$$

Le potentiel vecteur  $\vec{A}$  ne peut pas être défini par la seule condition ;  $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$  on doit fixer sa divergence pour assurer l'unicité de la solution de l'équation aux dérivées partielles (E.D.P). On ajoute alors la condition ;  $\text{div} \vec{A} = 0$  appelée Jauge de Coulomb [23]. Nous obtenons ainsi :

$$\begin{cases} \Leftrightarrow \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad} V - \sigma (\vec{\nu} \wedge \text{rot} \vec{A}) = \vec{J}_{ex} \\ \text{div} \vec{A} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$



Les termes  $\sigma(\vec{v} \wedge r\vec{\text{rot}}\vec{A})$  et  $\sigma(\vec{v} \wedge r\vec{\text{rot}}\vec{A})$  représentent les densités des courants induits. Ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques, tandis que le terme  $(-\sigma\vec{\text{grad}}V)$  décrit la densité du courant dépendante des conditions électriques imposées aux extrémités des conducteurs.

U peut être considéré comme nul[23]. Nous observons que la relation définissant une équation locale qui devra être systématiquement adaptée à la région à la quelle s'applique.

Enfin, la définition complète du problème magnétodynamique doit prendre en compte les conditions aux limites du type :

★ **Dirichlet** dans son cas général :  $A=A_0$

★ **Neumann** (homogène) dans son cas particulier :  $= 0$

Dans le cas où la pièce à chauffer est immobile par rapport à l'inducteur et U est considérée uniformément nulle, l'équation devient :

$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) + \sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ex}; v = \frac{1}{\mu} : \text{rélectivité magnétique} \\ \text{div}\vec{A} = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

• **Cas de dispositifs alimentés en courant harmonique** On suppose que la perméabilité ne dépend pas de l'induction magnétique; si les courants d'excitation sont de nature alternative, on peut utiliser une représentation de Fresnel pour modéliser leur variation temporelle.

L'utilisation des nombres complexes permet alors de remplacer le terme :

$$\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \text{ Par } i\omega\sigma\vec{A}$$

$$\omega = 2\pi f$$

Avec i: Unité imaginaire ( $i^2 = -1$ )

$\omega$ : Pulsation des sources [rd/s]. D'où l'équation devient :

$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}(vr\vec{\text{rot}}\vec{A}) + i\omega\sigma\vec{A} = \vec{J}_{ex} \\ \text{div}\vec{A} = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

• **Cas de dispositifs alimentés en courant transitoire**

Dans le cas d'une alimentation en courant transitoire, le traitement du système d'équations caractéristiques, nécessite une décritisation en pas à pas dans le temps (échantillonnage temporel).

Si un algorithme du type Euler explicite est adopté, nous aurons : à chaque pas de temps  $\Delta t_i$

$$J_i = \frac{J_I - J_{i-1}}{\Delta t_i}$$

Ainsi :

$$\Rightarrow \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A_i - A_{i-1}}{\Delta t_i}$$

L'expression de la dérivée  $(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t})$  doit être alors remplacée dans le système d'équation et, les calculs auront être effectués à chaque pas du temps ( $\Delta t_i$ ).

## 2.9 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques présents dans les dispositifs électrotechniques. Des modèles mathématiques ont été établis, dans leurs formes générales.

## CHAPITRE 3

# RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE DÉTECTION

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la réalisation pratique du système de détection. La réalisation d'un système de détection à distance où la distance suit un cahier des charges telle que la distance varie entre 0.5m à 1m semble à première vue facile mais dans la pratique cela peut engendrer des problèmes de détection suivant les moyens disponibles au laboratoire. Notre stratégie de détection est d'utiliser une bobine émettrice et une bobine réceptrice en faisant varier la fréquence par l'utilisation d'un GBF. Cela nous évite d'utiliser les systèmes à résonance et nous permet de localiser la fréquence qui doit être sensible à la détection. La stratégie de détection passe par deux étapes. La première est de s'assurer de la bonne réception du signal aux distances voulues. Et la deuxième étape est de chercher la fréquence la plus sensible à la détection.

### 3.2 Description des appareils utilisés

Les dispositifs utilisés dans la détection sont : un générateur GBF (25MHz), une bobine émettrice et une bobine réceptrice et des voltmètres. La description de chaque appareil est donnée par la suite. Le montage est montré dans la figure 3.1 suivante :



Fig 3.1: Le montage de détection

### 3.2.1 Un générateur de basses fréquences (GBF)

Le GBF est un appareil utilisé dans le domaine de l'électricité. Un GBF permet de délivrer un signal avec la fréquence désirée jusqu'aux MHz sous forme de sinusoides, de créneaux, ou de triangles. Ce signal peut être observé grâce à un oscilloscope en effectuant un simple montage électrique. De nombreux paramètres de réglage permettent de modifier la forme du signal général. En effet, il est possible de modifier la fréquence et le rapport cyclique mais aussi de modifier l'amplitude du signal, voire de le moduler avec un autre signal. L'ajout d'une composante continue est également souvent possible. Les générateurs numériques constitués sur la base de DSP peuvent être programmables et générer des formes de signal quasi quelconques. Pour cela, il suffit de créer une table de fonction polynomiale et de la rentrer comme une table d'échantillon à fournir au CNA[23].

Le GBF utilisé est montré dans la figure 3.2 avec ses caractéristiques :



Fig 3.2: Un générateur de basses fréquences

Marque : ITT

Bande : 25 MHz

Bande minimale de fréquence sinusoïde:  $1\mu\text{Hz}$

Poids: 2.55kg

Hauteur : 97mm

Impédance de sortie:  $50\Omega$

Dimensions: 270 x 250 x 97mm

Température de fonctionnement minimum:  $-5^{\circ}\text{C}$

Température d'utilisation maximum:  $+40^{\circ}\text{C}$

### 3.2.2 Multimètre

Un multimètre est indispensable pour mesurer le courant électrique : ampères, volts, ohms. Il est particulièrement utile pour détecter tous les problèmes électriques. Pour rappel, l'ampère est la mesure d'intensité du courant, l'ohm est la mesure de résistance d'un circuit électrique et le volt est la mesure de tension. Il faut savoir qu'un tel appareil remplace plusieurs appareils : ampèremètre, voltmètre, ohmmètre retenez qu'il en existe deux types : le multimètre analogique ou à aiguille et le multimètre digital. Ces appareils peuvent aussi proposer d'autres mesures : température du circuit, fréquence des signaux électriques, pics de tension, etc. Le multimètre dispose de deux bornes qui doivent être

raccordées au circuit électrique à mesurer. Sélectionnez à l'aide du bouton l'un des modes présents en fonction de vos besoins, puis branchez les câbles. Il est préférable de bien lire le mode d'emploi avant utilisation[23].

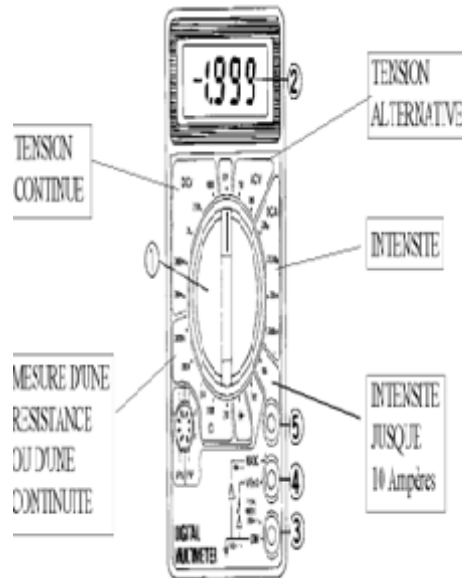


Fig 3.3: multimètre utilisé

### 3.2.3 Les bobines : émettrice et réceptrice

Les bobines sont un élément essentiel du système de détection et beaucoup de paramètres sont à prendre en compte : le diamètre du fil, le nombre de spires, et la longueur du

solénoïde. Nous avons utilisé deux sortes de bobines : Bobines à fort courant de section du fil grande nommé bh1 et bh2 et bobines à faibles courant de section du fil faible bl1 et bl2. La description des bobines est la suivante :

• **a. Bobine bh1 :**

- ★ Marque : PHYWE
- ★ Nombre de spires : 600 spires ★ Courant max : 2 A
- ★ Résistance interne : 2.5 Ohm
- ★ Inductance interne : 9 mH



• **b. Bobine bh2 :**

- ★ Marque : PHYWE
- ★ Nombre de spires : 300 spires ★ Courant max : 4 A
- ★ Résistance interne : 0.8 Ohm
- ★ Inductance interne : 2 mH



• c. Bobine bl1 :

- ★ Marque : Banic d'essai
- ★ Nombre de spires : 1100 spires
- ★ Courant max : 0.45 A
- ★ Inductance interne : 40 mH



• d. Bobine bl1 :

- ★ Marque : Banic d'essai
- ★ Nombre de spires : 600 spires
- ★ Courant max : 0.8 A
- ★ Inductance interne : 12 mH



### 3.3 Essais pour la détection du signal à 50Hz

Les essais ont été élaborés par paire de bobines soit les bobines bh1 et bh2, soit bl1 et bl2. A chaque fois on test l'émission et la réception par l'une ou l'autre disposition. La détection à été faite à la fréquence 50Hz pour voir quelle paire de bobine est la meilleure.



### 3.3.1 Essais 1: bh1 émettrice et bh2 réceptrice (disposition bh12)

Pour ce premier essai la bobine bh1 joue le rôle de la bobine émettrice et bobine bh2 joue le rôle de la bobine réceptrice et on nomme cette disposition bh12. Nous avons fixé la fréquence à 50Hz en variant la distance entre 10cm jusqu'au 1m. Le tableau 3.1 donne la tension détectée dans la bobine réceptrice bh2 en fonction de la distance. La figure 3.4 montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bh2 en fonction de la distance.

D(cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tension (mv)	9.3	1.9	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Tableau 3.1: La tension détectée dans la bobine réceptrice bh2 en fonction de la distance à 50 Hz.

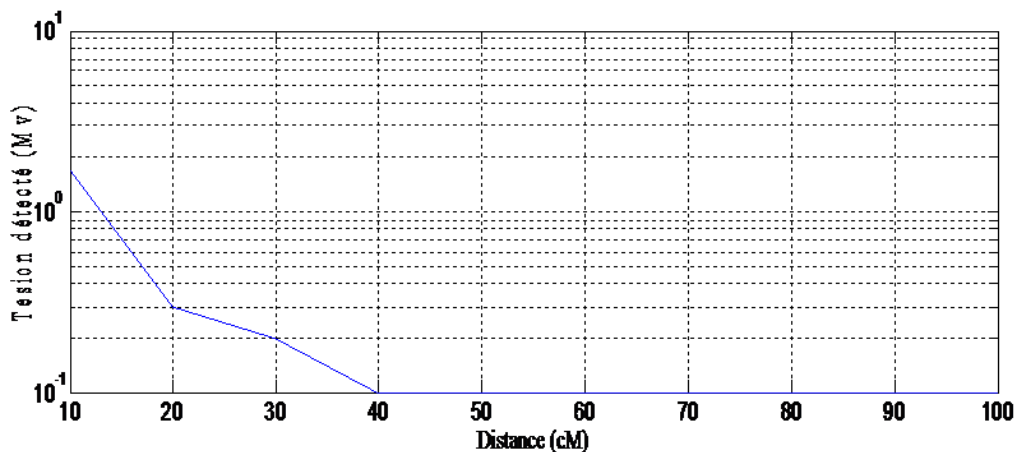


Fig 3.4: La tension détectée dans la bobine réceptrice bh2 en fonction de la distance à 50 Hz.

On remarque d'après cette figure 3.4 que la tension détectée est possible à partir d'une distance de 10cm puis diminue rapidement en augmentant la distance. Après 50cm, la détection devient impossible.

### 3.3.2 Essais 2 : bh2 émettrice et bh1 réceptrice (disposition bh21)

Pour ce deuxième essai la bobine bh2 joue le rôle de la bobine émettrice et bobine bh1 joue le rôle de la bobine réceptrice. Nous avons fixé la fréquence à 50Hz en variant la distance entre 10cm jusqu'au 1m. Le tableau 3.2 donne la tension détectée dans la bobine

réceptrice bh1 en fonction de la distance. La figure 3.3 montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bh1 en fonction de la distance.

D(cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tension (mv)	9.3	1.9	00.6	00.2	00.1	00.1	00.1	00.1	00.1	00.1

Tableau 3.2: La tension détectée dans la bobine réceptrice bh1 en fonction de la distance à 50 Hz.

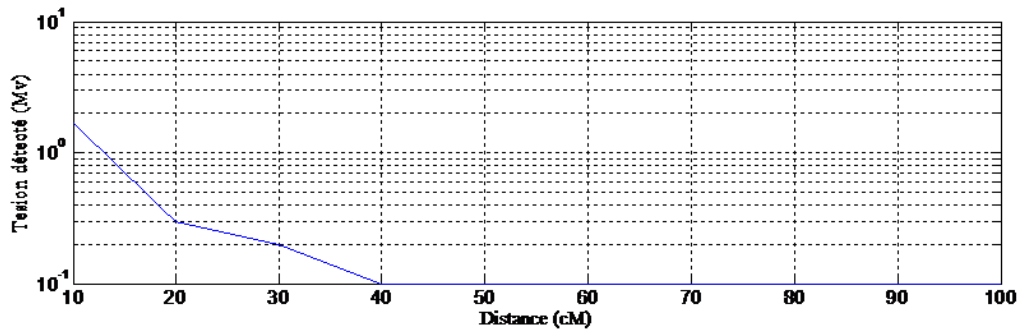


Fig 3.5: La tension détectée dans la bobine réceptrice bh1 en fonction de la distance à 50 Hz.

On remarque d'après cette figure 3.5 que la tension détectée est possible à partir d'une distance de 10cm puis diminue rapidement en augmentant la distance. Après 40cm, la détection devient impossible. On peut remarquer que l'essai 1 donne le même résultat que l'essai 2.

### 3.3.3 Essais 3 : bl1 émettrice et bl2 réceptrice (disposition bl12)

Pour ce deuxième essai la bobine bl1 joue le rôle de la bobine émettrice et bobine bl2 joue le rôle de la bobine réceptrice. Nous avons fixé la fréquence à 50Hz en variant la distance entre 10cm jusqu' au 1m. Le tableau 3.3 donne la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance. La figure 3.6 montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance.

D(cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tension (mv)	7.7	1.5	00.4	00.2	00.1	00.1	00.1	00.1	00.1	00.1

Tableau 3.3: montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance

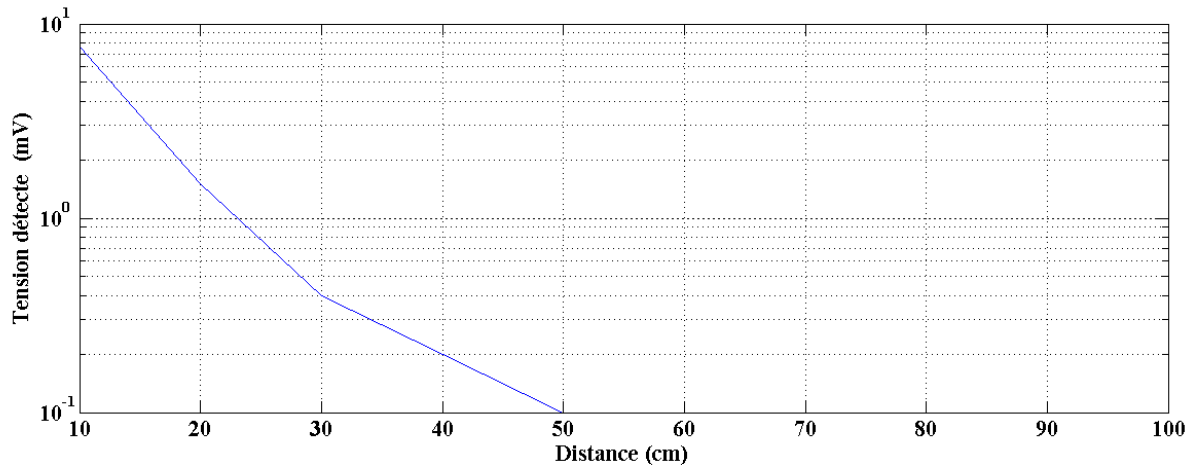


Fig 3.6: montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance

On remarque d'après cette figure 3.6 que la tension détectée est possible à partir d'une distance de 10cm puis diminue rapidement en augmentant la distance. Après 50cm, la détection devient impossible.

### 3.3.4 Essais 4 : bl2 émettrice et bl1 réceptrice (disposition bl21)

Pour ce deuxième essai la bobine bl2 joue le rôle de la bobine émettrice et bobine bh1 joue le rôle de la bobine réceptrice. Nous avons fixé la fréquence à 50Hz en variant la distance entre 10cm jusqu'au 1m. Le tableau 3.4 donne la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance. La figure 3.7 montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance.

D(cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
tension (mv)	9.3	1.9	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Tableau 3.4: donne la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance.

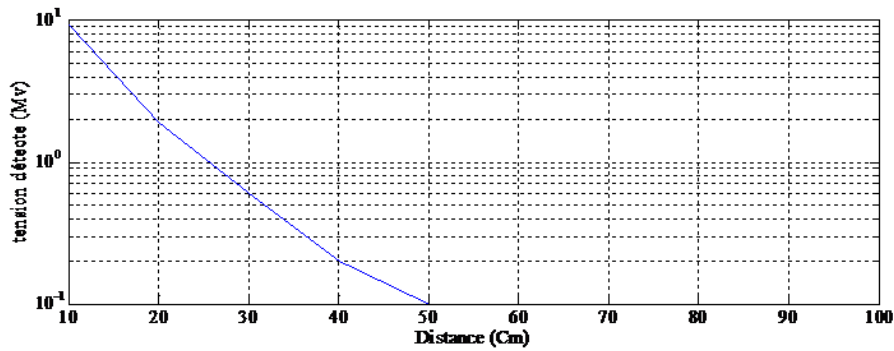


Fig 3.7: montre la tension détectée dans la bobine réceptrice bl2 en fonction de la distance

On remarque d'après cette figure 3.7 que la tension détectée est possible à partir d'une distance de 10cm puis diminue rapidement en augmentant la distance. Après 50cm, la détection devient impossible.

On peut remarquer que l'essai 4 donne un résultat meilleur que l'essai 3. On remarque aussi que le résultat de la paire de bobine bl1 et bl2 est meilleur que celui de bh1 et bh2. C'est pour cela que nous avons utilisé par la suite ces bobines dans nos mesures de détection.

### 3.3.5 Essais 5 : bl2 émettrice et bl1 réceptrice (disposition bl21)

Dans cet essai nous montrons l'effet de la fréquence. Si on augmente la fréquence, la bobine réceptrice capte mieux le champ électromagnétique suivant la loi Lenz-Faraday.

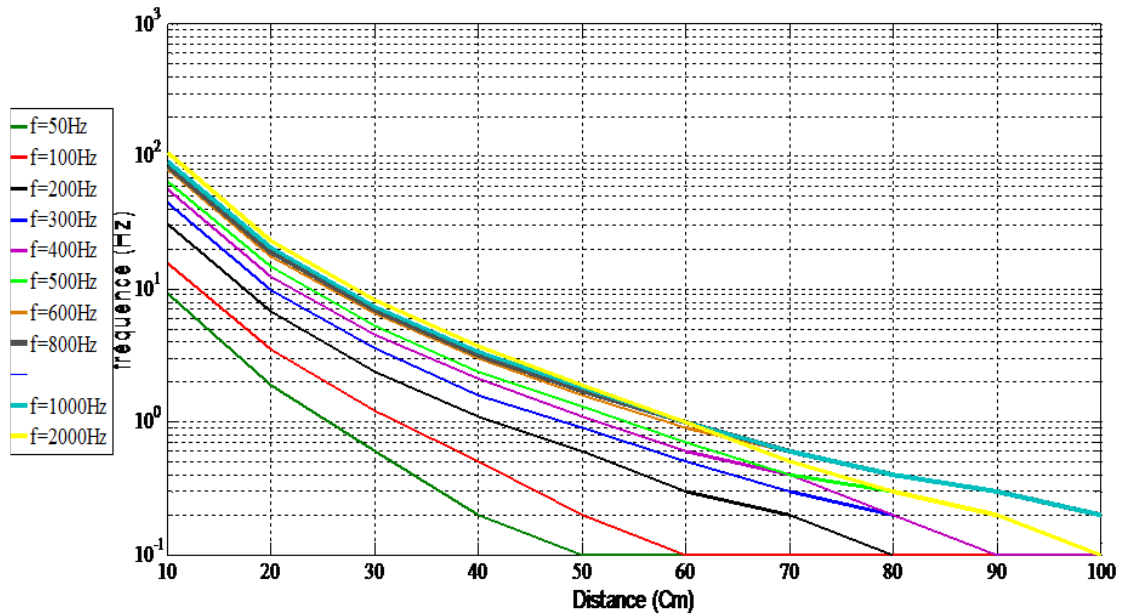


Fig 3.8: l'effet de la fréquence sur disposition bl21

### 3.4 Essais pour la détection du signal à fréquence variable

pour la distance 10cm et 20cm (disposition bl21)

Dans ces essais, nous avons fixe la distance pour 10cm et 20cm pour la paire de bobine bl2 qui joue le rôle de la bobine émettrice et bl1 qui joue le rôle de la bobine réceptrice pour une fréquence variable. Le tableau3.5 montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 10cm .Le tableau3.6 montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 20cm. La figure 3.9 montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 10cm et 20cm.

F(HZ)	50	100	200	300	400	500	600	700	800
tension (mv)	8.1	15.7	06.8	30.9	44.9	55.8	64.6	72.3	79.7
F(HZ)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
tension (mv)	84.4	91	102.9	105.6	106.7	107.4	108.4	109	109.8
F(HZ)	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	/
tension (mv)	110.6	127.3	174.4	94	83.1	1	0.1	0	/

Tableau 3.5: montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 10cm

F(HZ)	50	100	200	300	400	500	600	700	800
tension (mv)	1.6	3.5	06.8	09.8	12.4	14.6	16.2	17.7	18.8
F(HZ)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
tension (mv)	20.3	22.7	23.2	23.3	1.6	1.4	0.9	0.2	0
F(HZ)	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	/
tension (mv)	0	0	0	0	0	0	0	0	/

Tableau 3.6: montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 20cm.

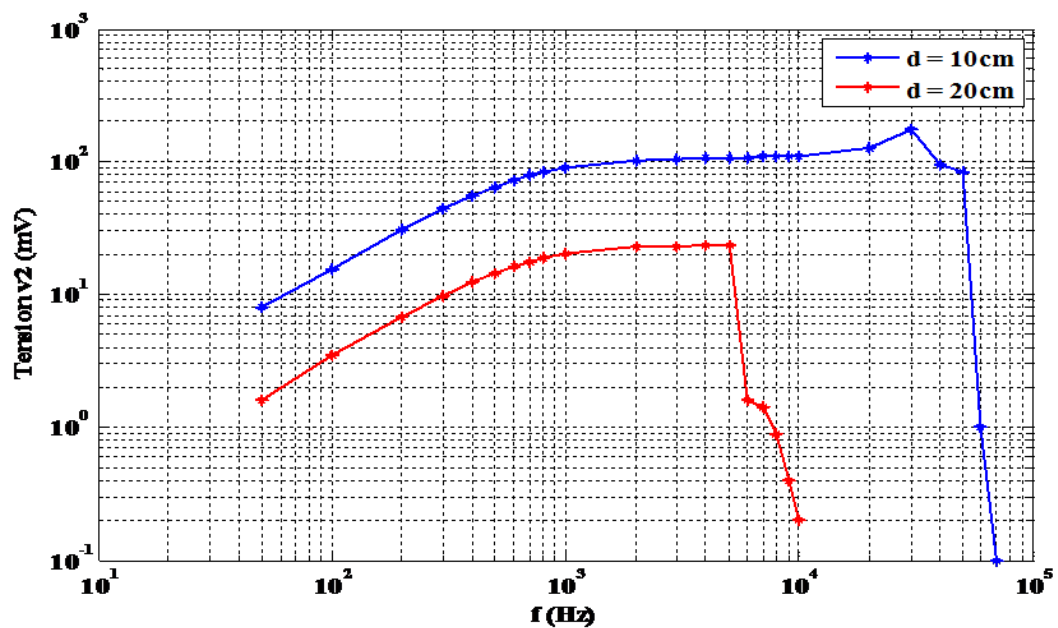


Fig 3.9: montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 10cm et 20cm.

On remarque que si on augmente la distance de 10cm à 20cm la tension détectée diminue. La détectée augment avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à 5 kHz pour 20cm et 50 kHz pour 10cm après la tension chute brusquement.

### 3.4.1 Essais pour la détection du signal

à fréquence variable pour la distance 10cm (disposition bl12)

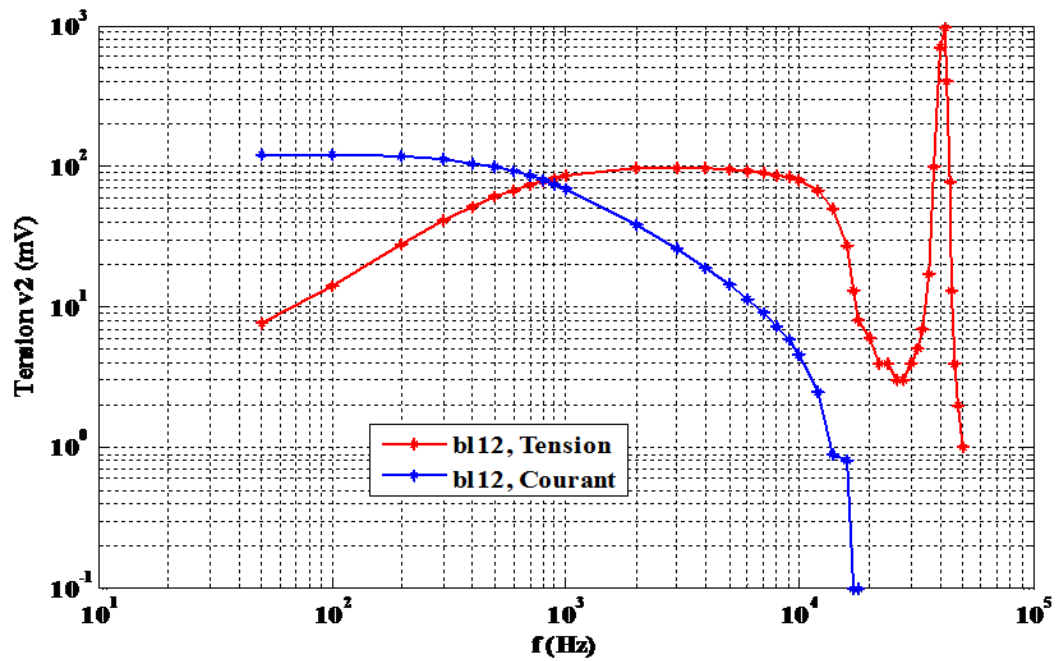
Dans cet essais, nous avons fixe la distance à 10cm pour la paire de bobine bl1 qui joue le rôle de la bobine émettrice et bl2 qui joue le rôle de la bobine réceptrice pour une fréquence variable. Le tableau 3.9 montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 10cm. La figure 3.10 montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 et le courant dans la bobine bl2 pour une distance de 10cm.

F(HZ)	50	100	200	300	400	500	600	700	800
tension (mv)	7.7	14	28	41	52	61	68	74	78
F(HZ)	900	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
tension (mv)	82	85	96	97	97	95	93	90	86
F(HZ)	9000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	22000	24000
tension (mv)	83	79	67	50	27	13	8	6	4
F(HZ)	26000	28000	30000	32000	34000	36000	38000	40000	42000
tension (mv)	4	3	3	4	5	7	17	100	704
F(HZ)	43000	44000	45000	46000	47000	48000	50000	/	/
tension (mv)	954	401	77	13	4	2	1	/	/

Tableau 3.7: montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 pour une distance de 10cm

F(HZ)	50	100	200	300	400	500	600	700	800
courant (mA)	121	121.8	117.9	112.2	105.6	98.6	91.6	85	78.9
F(HZ)	900	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
courant (mA)	73.3	68.3	38.5	25.8	18.9	14.5	11.5	9.1	7.3
F(HZ)	9000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	22000	24000
courant (mA)	5.8	4.6	2.5	0.9	0.8	0.1	0.1	0	0
F(HZ)	26000	28000	30000	32000	34000	36000	38000	40000	42000
courant (mA)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F(HZ)	43000	44000	45000	46000	47000	48000	50000	/	/
courant (mA)	0	0	0	0	0	0	0	/	/

Tableau 3.8: e la bobine réceptrice bl1 et le courant dans la bobine bl2 pour une distance de 10cm.





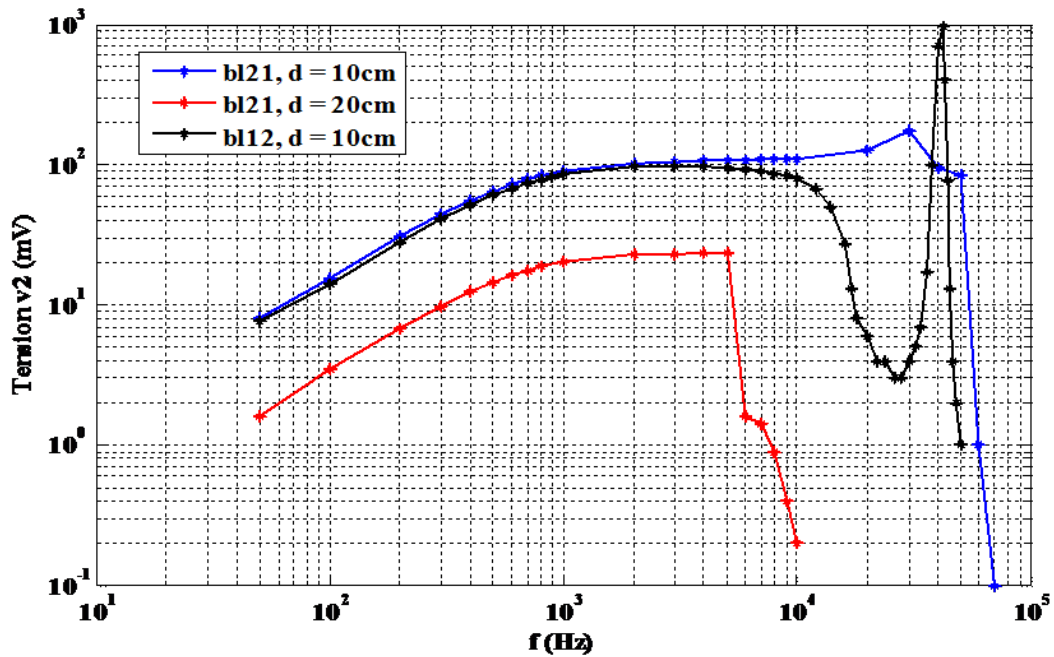


Fig 3.10: montre la tension détectée par la bobine réceptrice bl1 et le courant dans la bobine bl2 pour une distance de 10cm.

On remarque pour la distance 10 cm, la disposition bl12 présente une allure très différente de celle de bl21. La tension détectée diminue à la fréquence 10 kHz puis augmente et elle présente un max à 40 kHz puis après elle chute brusquement jusqu'à s'annuler.

### 3.5 Essais pour la détection de barreaux magnétiques

#### à fréquence variable pour la distance 10cm (disposition bl12)

Dans cet essai, nous avons essayé de détecter les corps ferromagnétiques. Pour cela nous avons utilisé un barreau magnétique (feuilleté antiparallèle) disposé au milieu des deux bobines (Figure 3.11). Le tableau 3.9 montre la tension  $v_2$  avec et sans barreau en fonction de la fréquence. La figure 3.12 montre la tension  $v_2$  avec et sans barreau en fonction de la fréquence.

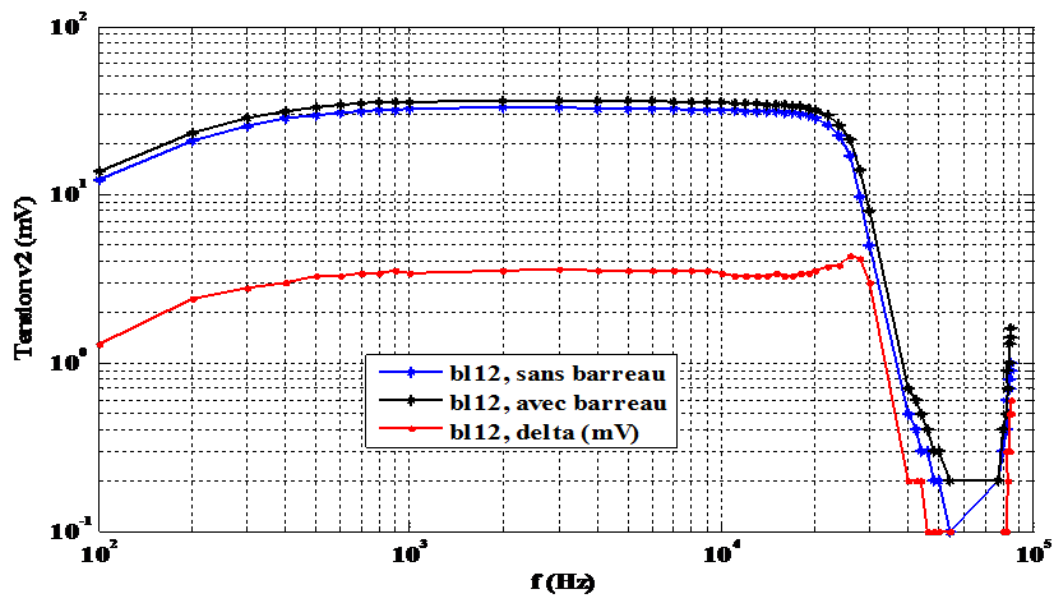


Fig 3.11: disposé au milieu des deux bobines

F(HZ)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
tension (mv)	12.3	20.8	25.6	28.3	29.8	30.8	31.4	31.8	32.1
F(HZ)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
tension (mv)	32.3	32.8	32.8	32.7	32.6	32.4	32.3	32.1	31.9
F(HZ)	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000
tension (mv)	31.8	31.6	31.4	31.3	31	30.8	30.5	30	31.2
F(HZ)	20000	22000	24000	26000	28000	30000	32000	40000	42000
tension (mv)	29.3	28.5	26	22.3	17.1	09.7	5	0.5	0.4
F(HZ)	44000	46000	48000	50000	54000	77000	80000	81750	82860
tension (mv)	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.4
F(HZ)	82390	83740	84440	84720	85050	/	/	/	/
tension (mv)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	/	/	/	/

F(HZ)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
tension (mv)	13.6	23.2	28.4	31.3	33.1	34.1	34.8	35.2	35.6
F(HZ)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
tension (mv)	35.7	36.3	36.4	36.2	36.1	35.9	35.8	35.6	35.4
F(HZ)	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000
tension (mv)	35.2	34.9	34.7	34.6	34.5	34.4	34.1	33.8	
F(HZ)	20000	22000	24000	26000	28000	30000	32000	40000	42000
tension (mv)	33.4	32.7	32	29.7	26.1	21.4	13.9	0.8	0.7
F(HZ)	44000	46000	48000	50000	54000	77000	80000	81750	82860
tension (mv)	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.5
F(HZ)	82390	83740	84440	84720	85050	/	/	/	/
tension (mv)	0.7	0.9	1	1.3	1.4	/	/	/	/

Tableau 3.9: montre la tension v2 avec et sans barreau en fonction de la fréquence.



On peut remarquer que suivant la différence entre les deux courbes (delta), la détection est possible à partir de 500 Hz jusqu'à 30 kHz. Elle est sensible pour la fréquence 26 kHz. Dans l'essai suivant, nous avons utilisé un barreau magnétique (feuilleté parallèle) disposé au milieu des deux bobines et un barreau non feuilleté. Le tableau 3.9 montre la tension v2 avec et sans barreau en fonction de la fréquence. La figure 3.12 montre la tension v2 avec et sans barreau en fonction de la fréquence.

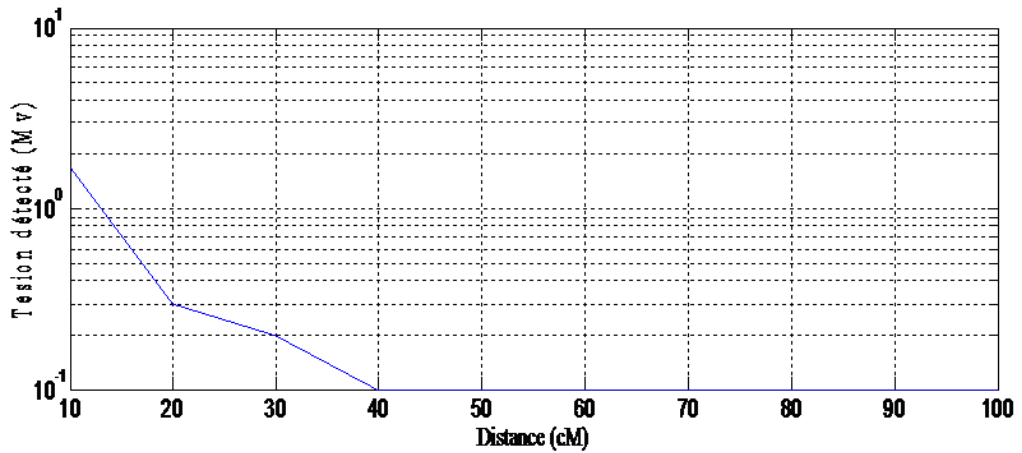


Fig 3.12: montre la tension  $v_2$  avec et sans barreau en fonction de la fréquence.

On peut remarquer que suivant la différence entre les deux courbes ( $\delta_1$ ) du barreau non feuilleté et ( $\delta_2$ ) du barreau feuilleté parallèle, la détection est possible entre 20 kHz et 40 kHz qui est très sensible pour la fréquence de 26 kHz qui atteint 10 mV de différence.

## 3.6 Conclusion

La stratégie de détection passe par deux étapes. La première est de s'assurer de la bonne réception du signal aux distances voulues et la deuxième étape est la recherche de la fréquence la plus sensible à la détection. On a fait une étude uniquement pour 10 cm et 20 cm puisque le système ne permet pas d'aller plus loin en distance. Le chapitre suivant donne une amélioration importante du système au delà de 0,5 m.

## CHAPITRE 4

# AMÉLIORATION D'UN SYSTÈME DE DÉTECTION DE MATÉRIAUX FERROMAGNÉTIQUES

### 4.1 Introduction

Le chapitre précédent était consacré pour la détection à courte distance. Cette courte distance ne permet pas le passage de personne ou gros objets entre les deux bobines. Pour augmenter l'intervalle qui sépare les deux bobines, on a procédé à une amélioration personnelle du dispositif de détection. L'inconvénient d'obtenir une tension détectable à une grande distance de 0.6m à 0.8m était la contrainte sur la valeur maximal de la tension d'alimentation puisque'on utilise un GBF dont la source ne dépasse pas la valeur de 10V.

#### 4.1.1 Utilisation des bobines pour une (disposition bl21) à une distance 0.6m et 0.8m

Nous avons utilisé la disposition des bobines bl21 pour une distance de 0.6m et 0.8m. On a remarqué qu'aucune tension n'est détectable à la fréquence 50Hz à partir d'une distance de 0.5m (**Figure 3.7** chapitre précédent). Nous utilisation toujours la tension délivré par le GBF égale à 10 V. On a voulu voir l'effet de la fréquence sur la détection à ces deux distances. Aucune tension n'est détectable dans la bobine réceptrice bl1 en variant la fréquence. la tension de sortie de la bobine émettrice bl2 est montré sur la (**figure 4. 1** )en fonction de la fréquence.

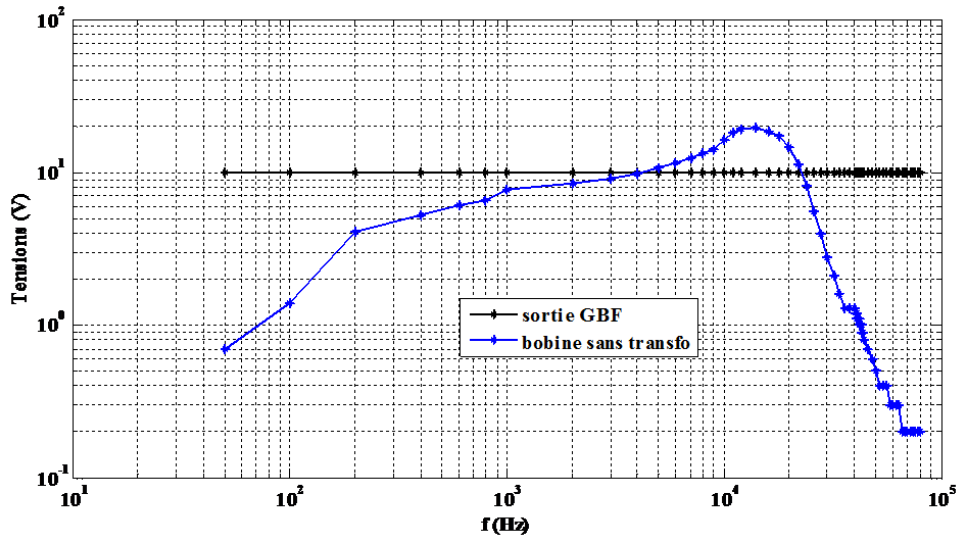


Fig 4.1: Tension de sortie de la bobine émettrice bl2 comparée à celle du GBF

A faible fréquence la réactance inductive ( $L\omega$ ) de la bobine émettrice bl2 est petite et seulement la résistance faible de la bobine bl2 qui intervient cela induit une faible tension au niveau de la bobine bl2 accompagné d'une grande chute de tension dans les fils de connexion (court circuit). La tension au niveau de bl2 augmente avec l'augmentation de la réactance inductive quant la fréquence augmente. Au moyenne fréquence un effet capacitif parallèle apparait ( $\frac{1}{c\omega}$ ) accompagné d'un phénomène de résonance à la fréquence 14 kHz, l'impédance de la bobine devient grande et la tension devient maximal. A très haute fréquence l'affect capacitif parallèle est prédominant induisant un court circuit de l'impédance et la tension bl2 chute considérablement. Même si la tension dépasse les 10V aucune tension n'est détectée au niveau de la bobine réceptrice.

## 4.2 Amélioration du dispositif

Pour améliorer le dispositif de détection, on a procédé par l'utilisation de trois techniques nouvelles :

- l'amélioration de la source d'alimentation par l'utilisation d'un transformateur élévateur.
- L'utilisation des barreaux magnétique spécialement en ferrite de provenance Angleterre.
- La recherche de la fréquence propice à la détection

### 4.2.1 Première technique

(L'amélioration de la source d'alimentation par l'utilisation d'un transformateur élévateur)

On a amélioré la valeur de la tension primaire par utilisation d'un transformateur élévateur. L'entrée de ce dernier est 150 spires et la sortie 600 spires. Les mesures sont prises par un multimètre. Le montage de cette expérience est le suivant :

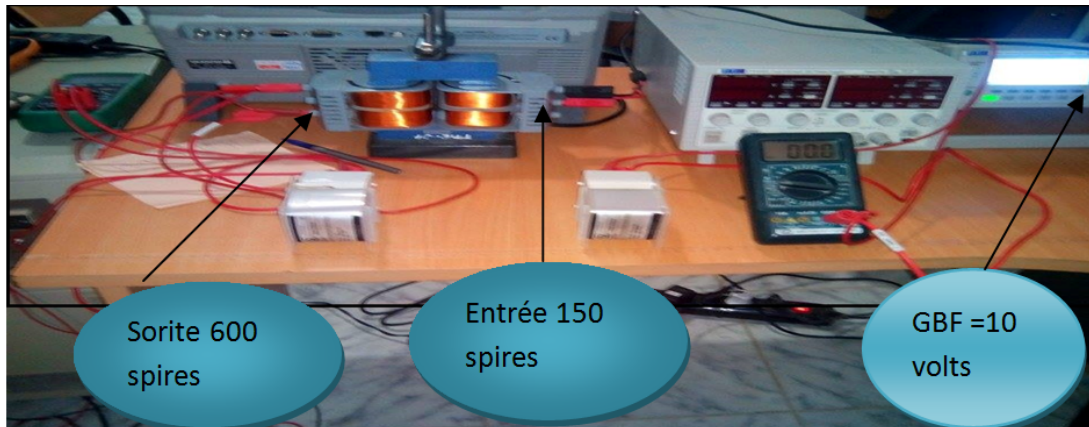


Fig 4.2: l'amélioration par transformateur élévateur

La tension au niveau du secondaire du transformateur à vide est augmentée (**voir figure 4. 3**). Puis on alimente la bobine émettrice bl1 par le biai du transformateur, on obtient la tension au niveau de bl2. On mesure aussi la tension au niveau de la bobine réceptrice bl2 à la distance 0.6m. Ce diapositive a permis la détection du signal au niveau de la bobine réceptrice (**Figure 4. 4**). La détection des corps ferromagnétique entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice a donné des résultats satisfaisants surtout à la fréquence 40 kHz.

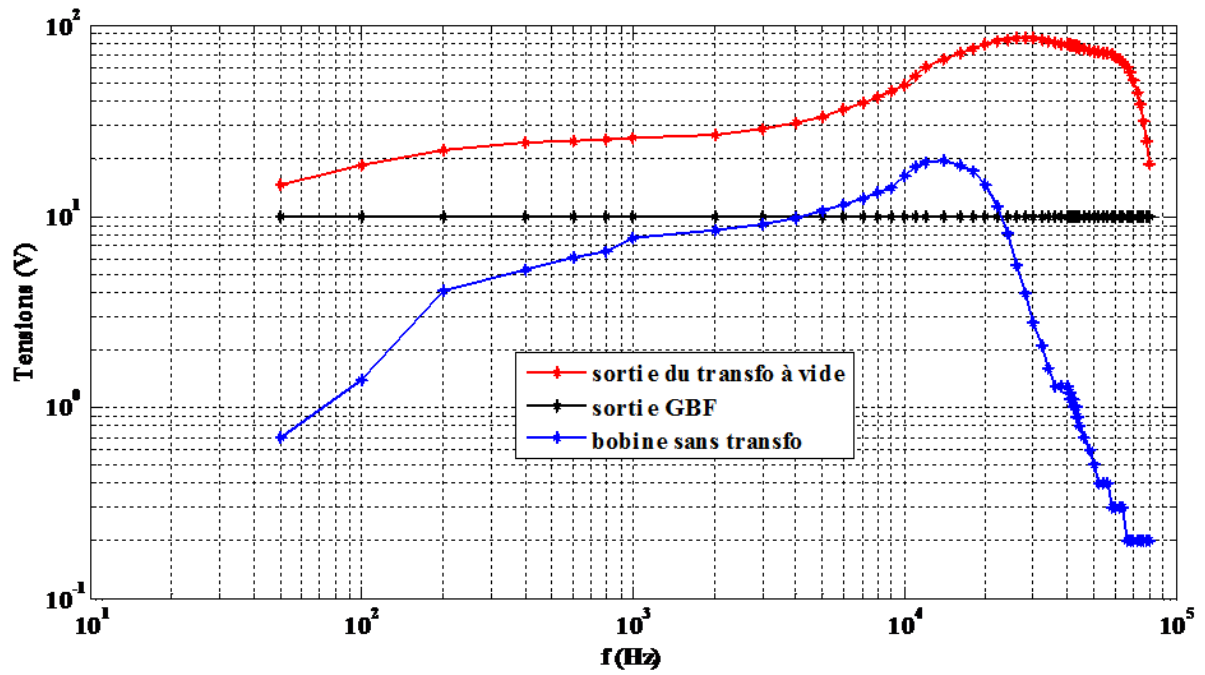


Fig 4.3: La tension à la sortie du transformateur

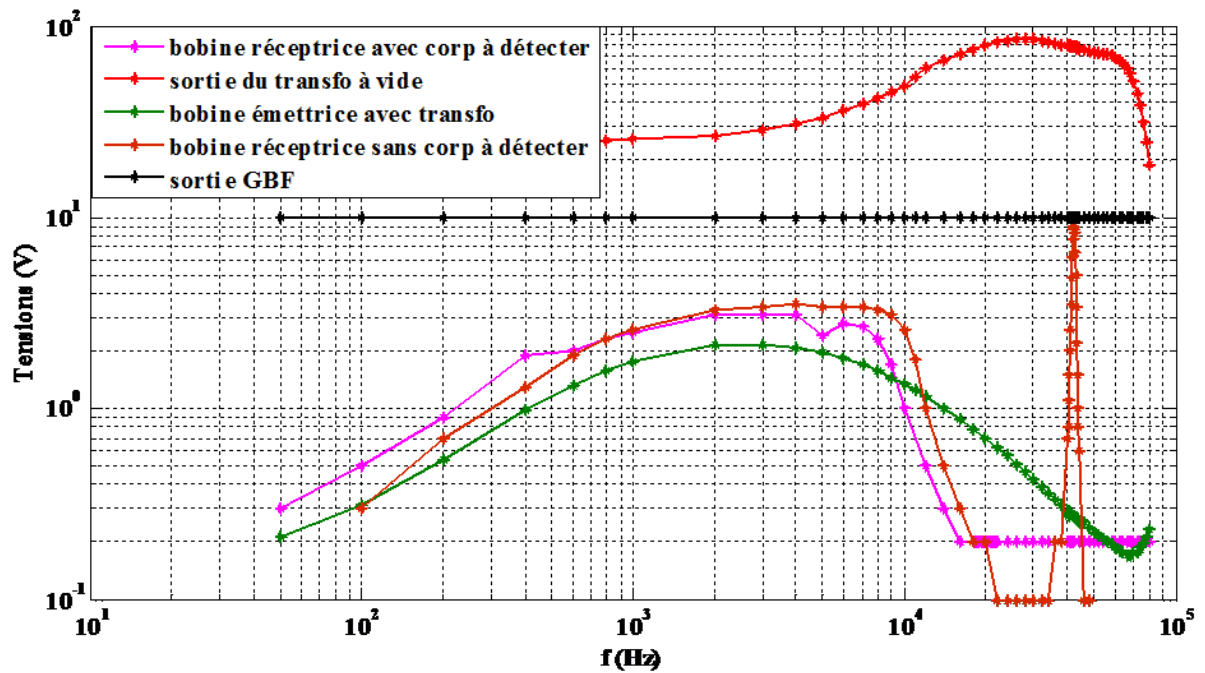


Fig 4.4: Les tensions au niveau des bobines émettrice et réceptrice

### 4.2.2 La deuxième technique

(L'utilisation des barreaux magnétique en ferrite de provenance Angleterre

)



Pour améliorer la détection des corps ferromagnétique, on a procédé à une technique nouvelle qui nous semble très intuitive et très intéressante par l'introduction d'un barreau en ferrite soit dans la bobine émettrice ou réceptrice. L'introduction du barreau dans la bobine émettrice (**figure 4. 5**) a donné des résultats intéressantes mais non significatifs uniquement si le corp ferromagnétique en en position droite (**Figure 4.6**). Le résultat de la tension détectée est montrée dans la (**figure 4.7**) pour la position du corp ferromagnétique position gauche PG, position centre PC et position droite PD.

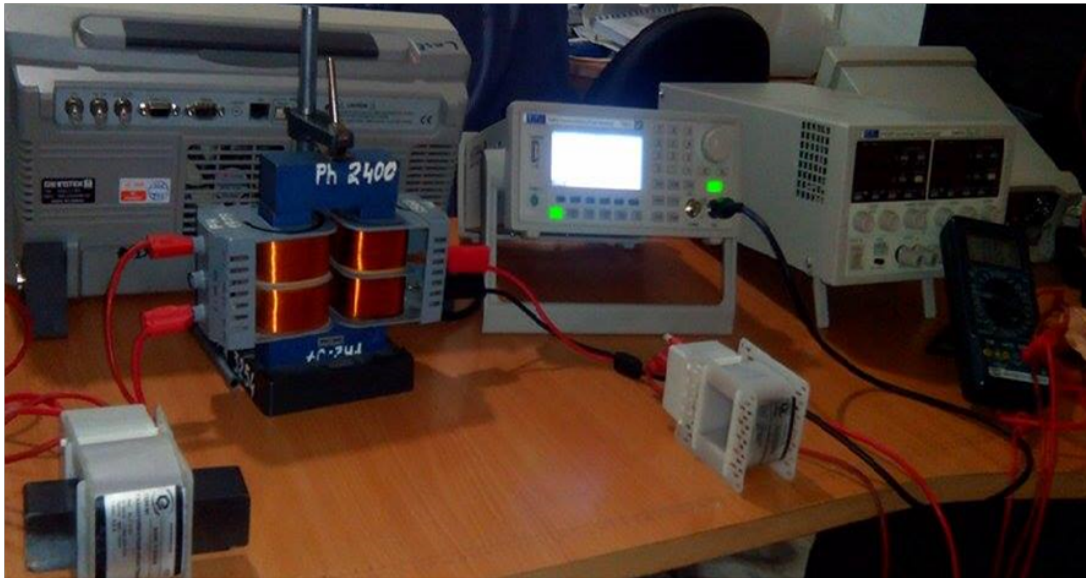


Fig 4.5: Barreau en ferrite dans la bobine émettrice



Fig 4.6: Barreau en ferrite dans la bobine émettrice avec corps ferromagnétique à détecter à position gauche (PG) en image gauche et à position droite (PD) en image droite

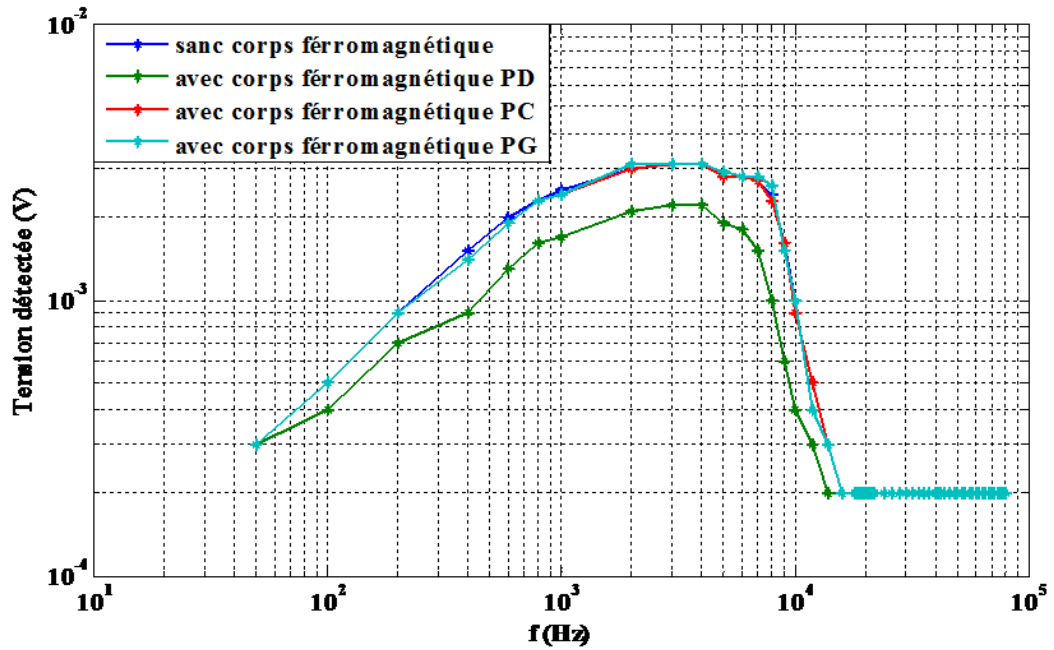


Fig 4.7: Tension détectée des corps ferromagnétique

Par contre l'introduction du barreau dans la bobine réceptrice (**Figure 4.8**) nous a donné des résultats significatifs et très intéressants. La figure (4. 9) montre une vue du montage avec corps ferromagnétique au centre. Les résultats sont donnés dans la figure 4.10 pour la position du corps ferromagnétique en position PG, PC et PD définies en haut.



Fig 4.8: Barreau en ferrite dans la bobine émettrice



Fig 4.9: Barreau en ferrite dans la bobine émettrice avec corps ferromagnétique au centre PC

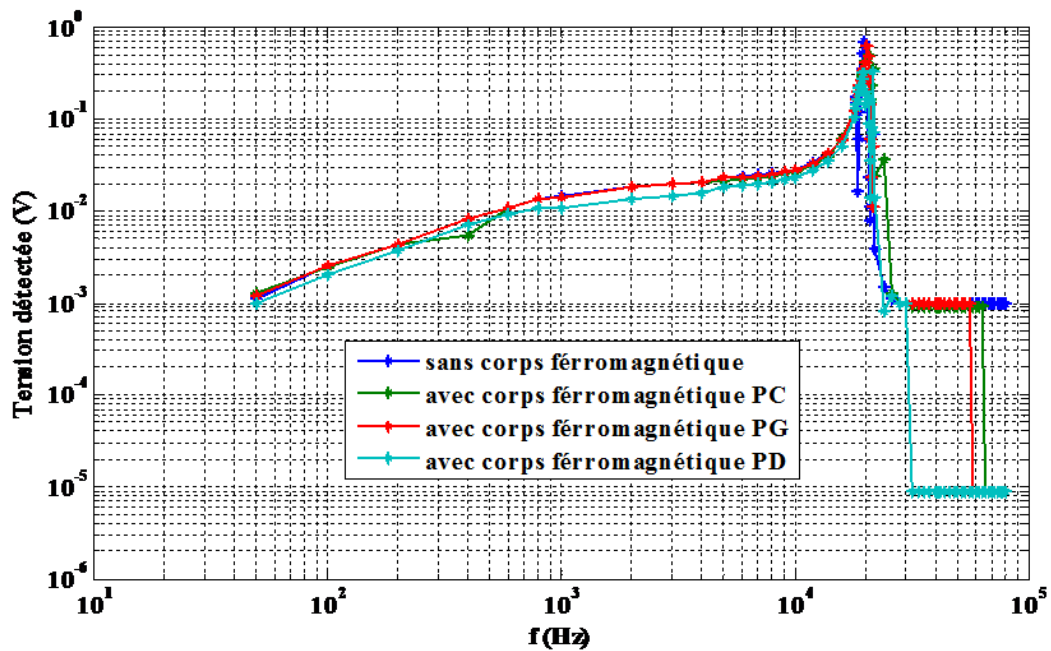


Fig 4.10: Tension réceptrice ac barreau en ferrite dans la bobine émettrice pour disposition du corps ferromagnétique PG, PC et PD

L'introduction du barreau en ferrite dans la bobine réceptrice a augmenté considérablement la tension détectée dans la bobine réceptrice par rapport si le barreau en ferrite était introduit dans la bobine émettrice (Figure 4.11). Une bonne détection a été remarquée pour la fréquence 22 kHz à la position PD.

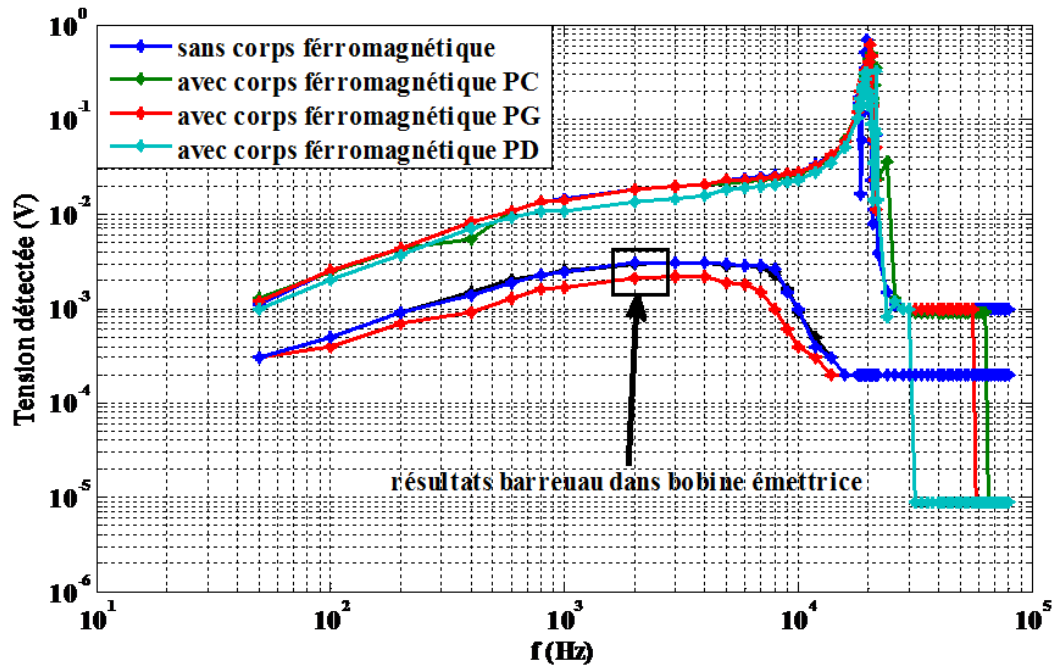


Fig 4.11: Comparaison des résultats Barreau en ferrite dans la bobine émettrice et réceptrice

Une autre amélioration très importante du système de détection était de renverser la bobine réceptrice avec le barreau en ferrite pour avoir une position verticale (Figure 4.12). Cela a permis de recueillir une tension dans la bobine réceptrice plus élevée qu'avant toujours à 0.6m (Figure 4.13) et une bonne détection du signal pour toutes les position PG, PC et PD jusqu'à 1V de différence à la fréquence 20 kHz (Figure 4.14).



Fig 4.12: Bobine réceptrice avec barreau en ferrite renversée en position verticale

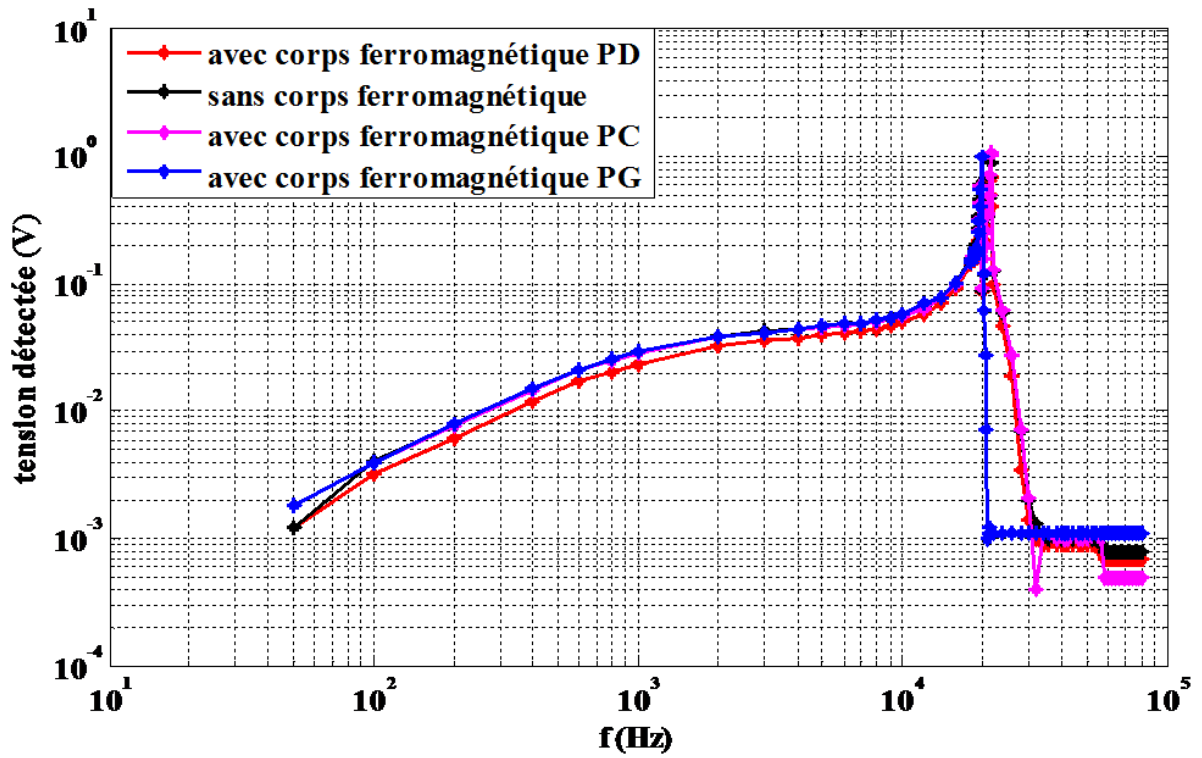


Fig 4.13: Tension détectée au niveau de la bobine réceptrice avec barreau en ferrite renversée en position verticale

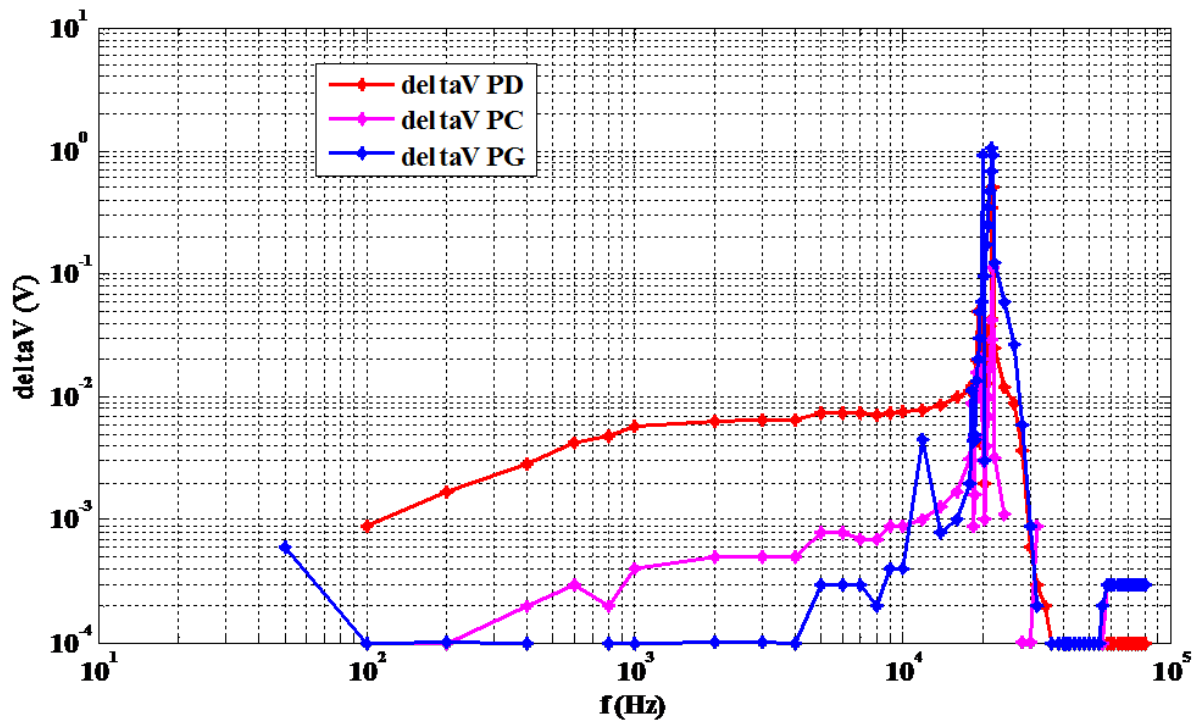


Fig 4.14: Différence de tension détectée au niveau de la bobine réceptrice avec barreau en ferrite renversée en position verticale

La figure 4.15 montre la comparaison entre les trois modes de détection. On peut voir que le renversement de la bobine réceptrice a amélioré d'une façon importante la réception du signal et la détection des corps ferromagnétique au niveau de la bobine réceptrice.

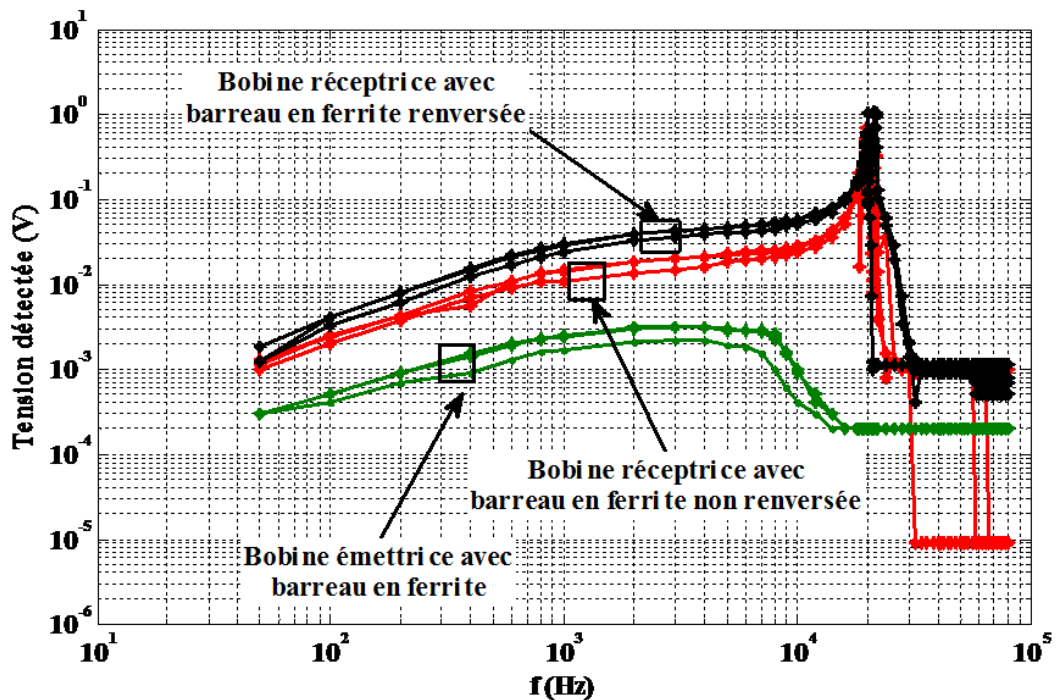


Fig 4.15: Comparaison entre les trois modes de détection

### 4.3 Conclusion

Nous avons présenté des techniques d'amélioration du système de détection pour augmenter l'intervalle qui sépare les deux bobines. Pour améliorer le dispositif de détection, on a recouru à l'utilisation de trois techniques nouvelles : L'amélioration de la source d'alimentation par l'utilisation d'un transformateur élévateur. L'utilisation des barreaux magnétique en ferrite de provenance Angleterre. La recherche de la fréquence propice à la détection. Le renversement de la bobine réceptrice a amélioré d'une façon importante la réception du signal et la détection des corps ferromagnétique au niveau de la bobine réceptrice.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

On a vu le principe de la technique du détecteur de métaux et les différents types de détecteurs électromagnétiques, les besoins industriels croissants qui ont provoqué le développement rapide de ce domaine de recherche. Nous avons présenté un petit rappel sur la production d'un champ électromagnétique. les matériaux magnétiques qui sont à la base des applications des dispositifs .

Nous avons rappelé que chaque atome dans la matière possède un moment magnétique qui résulte des moments de spin et du moment orbital des électrons. On peut trouver plusieurs formes de magnétisme selon la susceptibilité de chaque matériau. Parmi les matériaux magnétiques les plus utilisés dans le domaine des hyperfréquences on trouve les ferrites qui sont des métalliques.

On a vu les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques présents dans les dispositifs électrotechniques. Des modèles mathématiques ont été établis, dans leurs formes générales. Nous avons opté pour le modèle magnétostatique la formulation en potentiel vecteur magnétique. Dans ce qui suit nous passerons à la représentation des diverses méthodes ont été établis, dans leurs formes générales.

la stratégie de détection passe par deux étapes. La première est de s'assurer de la bonne réception du signal aux distances voulues et la deuxième étape est la recherche de la fréquence la plus sensible à la détection. On a fait une étude uniquement pour 10cm et 20cm puisque le système ne permet pas d'aller plus loin en distance. Le chapitre suivant donne une amélioration importante du système au delà de 0.5 m.

Nous avons présenté des techniques d'amélioration du système de détection pour augmenter l'intervalle qui sépare les deux bobines. Pour améliorer le dispositif de détection, on a recouru à l'utilisation de trois techniques nouvelles L'amélioration de la source d'alimentation par l'utilisation d'un transformateur élévateur. L'utilisation des barreaux magnétique en ferrite de provenance Angleterre. La recherche de la fréquence propice à la détection. Le renversement de la bobine réceptrice a amélioré d'une façon importante la réception du signal et la détection des corps ferromagnétique au niveau de la bobine réceptrice.