

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*

# Étude et réalisation d'un système électromagnétique pour la détecteur des métaux

Réalisé par: -Ben Lalmi Ilias

Soutenue publiquement le : 24/06/2018

Devant le jury composé de:

Tkouti Nacira	MAA	Université de Biskra	Président
<b>Mimoune souri Mohamed</b>	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Rezig Mohamed	MAA	Université de Biskra	Examineur

*Année Universitaire 2017/2018*

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***

***Étude et réalisation d'un système électromagnétique  
pour la détecteur des métaux***

Présenté par

**Ben Lalmi Ilias**

Avis favorable de l'encadreur:

*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 monsieur MIMOUNE souri mohamed . Leur disponibilité, soutien et surtout patience ont été des éléments déterminants dans la réussite de ma mémoire.

J'adresse mes respectueux remerciements aux membres du jury : monsieur , MIMOUNE souri mohamed Pr à l'université de Biskra, et REZIGE mohamed MAA et madameTkouti Nacira MAA à l'université de Biskra de m'avoir fait l'honneur de présider ma mémoire.

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

## DÉDICACE

 ma Chère Mère pour ses sacrifices et ses Efforts pendant toutes ces années,  
A mon Père Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines M'ont permis de vivre  
ce jour. A mon Frères et mes s?urs A tous les gens qui m'aiment Je supplie dieu de Leur  
donner le bonheur et la santé



**Résumé:**

**O**n a vu le principe de la technique du détecteur de métaux ,et nous avons présenté des technique d'amélioration du système de détection pour augmenté la distance et la tension détectée par la bobine réceptrice, et les différents types de détecteurs électromagnétiques,et Nous avons présenté un petit rappel sur la production d'un champ électromagnétique et les matériaux magnétiques qui sont à la base des applications des dispositifs

**Abstract:**

**W**e have seen the principle of the metal detector technique,and we have presented techniques for improving the detection system to increase the distance and the voltage detected by the receiving coil ,and the different types of electromagnetic detectors , and we have presented a small reminder on the production of an electromagnetic field and the magnetic materials that are the basis of the applications of the devices

Étude et réalisation d'un système électromagnétique  
pour la détecteur des métaux

Ben Lalmi Ilias

June 26, 2018

*TABLE DES MATIÈRES*

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

## NOMENCLATURE

**B300:** Bobine de 300 spires

**B600:**Bobine de 600 spires

**BD600:**Bobine de center de 600 spires

**BD1100 :** Bobine de center de 1100 spires

**AB50 :** Bobine réalisé de 50 spires

**AB100 :** Bobine réalisé de 100 spires

**SB22:**Bobine réalisé(section différent de AB)22 spires

**SB100:**Bobine réalisé(section différent de AB) de 100 spires

**GB:**grand bobine

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La détection d'un objet ou d'un phénomène est sa mise en évidence généralement à l'aide d'un détecteur [1]. La détection est devenue un moyen très important pour des applications spécifiques ou dans des zones stratégiques. Cette détection se base essentiellement sur des instruments de détection appelés détecteurs. Les détecteurs de métaux sont des dispositifs destinés à repérer les objets métalliques cachés sous d'autres objets de camouflage. Essentiellement utilisé dans le cadre d'un usage professionnel par les agents de sécurité et les forces de l'ordre, un détecteur de métal alerte son possesseur via un bip ou des systèmes de vibreur. [2] 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. Un détecteur de métaux fonctionne en exploitant un phénomène physique bien connu : l'induction électromagnétique.

L'objectif essentiel de ce travail de mémoire est de réaliser un détecteur de corps magnétiques. Ce détecteur est basé sur le principe de Faraday, l'induction électromagnétique. Ce dispositif de détection est constitué par des bobines émettrices et bobines réceptrices en utilisant la fréquence HF. La conception de ce dispositif a fait l'objet de plusieurs tests de plus sa fiabilité a été mise en évidence. Ce travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons défini des notions sur le magnétisme et spécialement le champ magnétique et la création d'un champ magnétique, les méthodes de mesure d'un champ magnétique, la physique du magnétisme, les matériaux magnétiques, les détecteurs de métaux. L'objectif de ce chapitre est de présenter la détection et les

notions de base du ferromagnétisme ainsi que les propriétés générales ferromagnétique. On a présenté ensuite les différentes classes de matériaux magnétiques, . A la fin nous avons exposé les modèles mathématiques et les équations de base de l'électromagnétisme.

Le deuxième chapitre décrit le système électromagnétique développé pour la détection des métaux magnétiques. Ce système est constitué par deux bobines : la première joue le rôle de bobine émettrice et la 2eme joue le rôle de bobine réceptrice. La bobine émettrice est alimentée par un générateur basse fréquence (GBF) avec une bande de fréquence variant entre 50Hz et 25 MHz. La bobine réceptrice détecte les métaux entre les deux bobines. La réalisation de ce système semble à première vue une chose simple mais en pratique cela pose de grands problèmes. Ce système doit assurer trois objectives : le premier est d'assurer une distance de 0.8 à 1m entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice permettant le passage des personnes ; le deuxième est d'avoir un signal au niveau de la bobine secondaire qui soit détectable ; le troisième est d'avoir une sensibilité acceptable au niveau de la bobine secondaire.

Dans le troisième chapitre, une alternative pour augmenter la distance entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice est l'augmentation de la section droite. Dans ce chapitre, l'effet de l'augmentation de la section droite des bobines (ou la longueur moyenne des bobines) est à étudier d'une manière profonde puisque l'augmentation de la perméabilité magnétique par l'introduction d'un barreau magnétique n'a pas donné de résultats important concernant l'augmentation de la distance entre bobine émettrice et bobine réceptrice.



# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈMES DE DÉTECTIONS

### 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons définir les notions du magnétisme et spécialement le champ magnétique et la création d'un champ magnétique, les méthodes de mesure d'un champ magnétique, la physique du magnétisme, les matériaux magnétiques, les détecteurs de métaux. L'objectif de ce chapitre est de présenter la détection et les notions de base du ferromagnétisme ainsi que les propriétés générales ferromagnétique. On présente ensuite les différentes classes de matériaux magnétiques, et nous allons définir le système de détection. A la fin nous exposons les modèles mathématiques et les équations de base de l'électromagnétisme.

### 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 rare , 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 constituant suivant une direction privilégiée

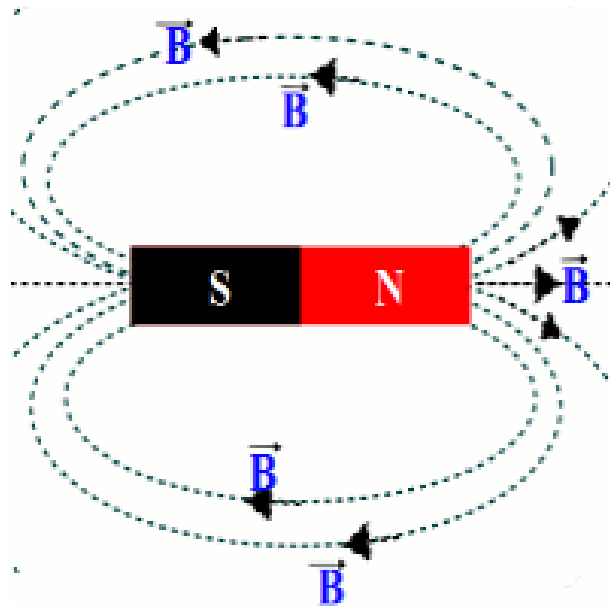


Fig 1.1: Champ d'excitation magnétique d'un aimant droit.

### 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.

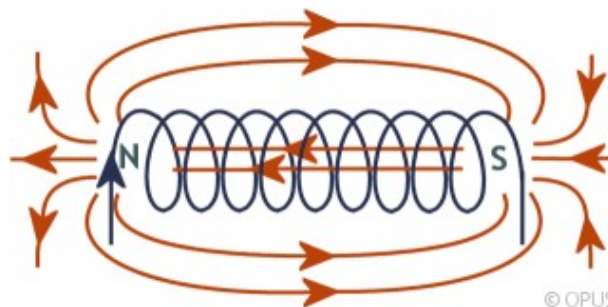


Fig 1.2: Champ d'excitation magnétique d'un solénoïde.

### 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].

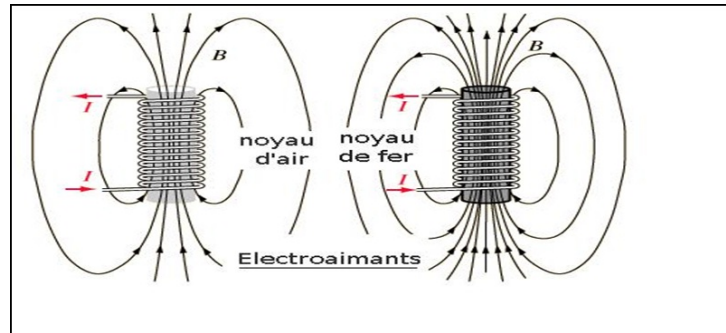


Fig 1.3: champ créée par un électroaimant.

## 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.

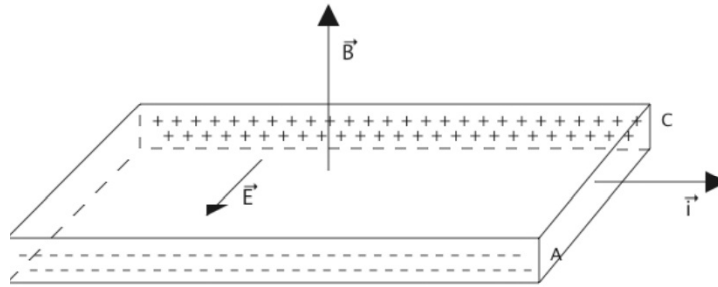


Fig 1.4: champ électrique transversal dans un conducteur.

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 (InAs) . 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  $v_h$  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  $V_h$  c'est la tension dite de Hall. La caractéristique principale d'un capteur à induction est s'étende la mesure de  $10^{-3}$  à  $10^5$  mT.

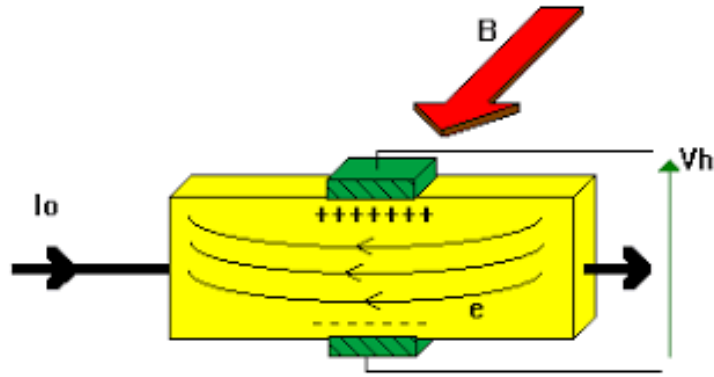


Fig 1.5: principe de l'effet Hall

$$Vh = Kh.I0.B \quad (1.1)$$

$Kh$  : constante de Hall fonction de matériau.

$B$ : Le champ magnétique appliqué en Gauss.

$I_0$ : Courant induit.

$Vh$  : tension de Hall. [4]

## 1.4 La physique du magnétisme

### 1.4.1 définition sur magnétisme

Le magnétisme représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires fondamentales sont à l'origine du champ magnétique qui engendre ces forces. Tous les matériaux sont influencés, de manière plus ou moins complexe, par la présence d'un champ magnétique, et l'état magnétique d'un matériau dépend de sa température (et d'autres variables telles que la pression et le champ magnétique extérieur) de sorte qu'un matériau peut présenter différentes formes de magnétisme selon sa température.

Les aimants permanents possèdent des moments magnétiques permanents à l'origine du ferromagnétisme. Cependant, la plupart des matériaux ne possèdent pas de moments permanents. Parmi ces derniers, certains sont attirés par la présence d'un champ magnétique (paramagnétisme); d'autres sont au contraire repoussés par celui-ci (diamagnétisme)

; d'autres encore ont une relation beaucoup plus complexe avec un champ magnétique appliqué (antiferromagnétisme).

Les substances qui sont affectées de façon négligeable par les champs magnétiques sont considérées comme étant des substances non-magnétiques, encore dites amagnétiques.

La force est: une cause, un effet. Il y a les forces de contact, les forces de distances[5].

### 1.4.2 Définition de l'aimantation

En physique, l'aimantation est une grandeur vectorielle qui caractérise à l'échelle macroscopique le comportement magnétique d'un échantillon de matière. Elle a comme origine le moment magnétique orbital et le moment magnétique de spin des électrons. Elle se mesure en ampères par mètre ou, parfois, en Teslas par  $\mu_0$  [6].

### 1.4.3 Moments magnétiques

En physique, le moment magnétique est une grandeur vectorielle qui permet de caractériser l'intensité d'une source magnétique. Cette source peut être un courant électrique, ou bien un objet aimanté. L'aimantation est la distribution spatiale du moment magnétique.

Le moment magnétique d'un corps se manifeste par la tendance qu'a ce corps à s'aligner dans le sens d'un champ magnétique, c'est par exemple le cas de l'aiguille d'une boussole : le moment que subit l'objet est égal au produit vectoriel de son moment magnétique par le champ magnétique dans lequel il est placé. Par ailleurs, tout système possédant un moment magnétique produit également un champ magnétique autour de lui[7].

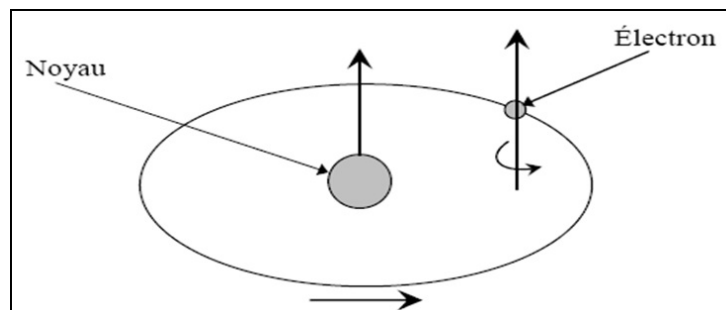


Fig 1.6: Mouvement d'électron

**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??[8]

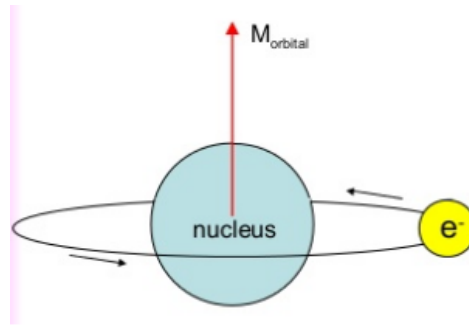


Fig 1.7: Moment orbital

**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 .

Enfin, le moment magnétique total de l'atome est la somme des moments orbitaux et des moments de spin de ses électrons.[9]

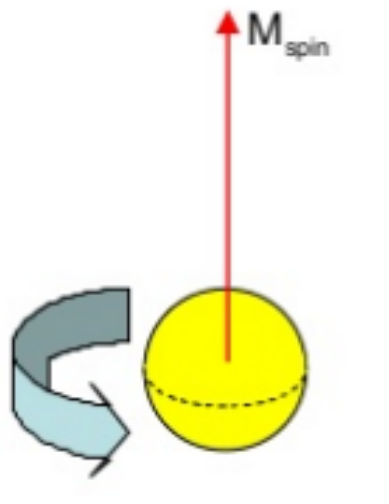


Fig 1.8: Moment de spin

## 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 [9]

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.2)$$

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 :

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (1.3)$$

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi) \cdot \vec{H} \quad (1.4)$$

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].



### 1.5.2.1 Diamagnétisme

Les matériaux diamagnétiques sont en général des substances qui ne comportent pas de moment dipolaire magnétique interne comme le cuivre et le silicium. Leur aimantation induite par un champ extérieur a le sens opposé à celui du champ inducteur. La susceptibilité due au diamagnétisme est indépendante du champ et de la température elle est donnée par :

$$\chi = \frac{\partial \mu}{\partial H} \quad (1.5)$$

Le diamagnétisme a pour origine les modifications du mouvement orbital des électrons sous l'effet du champ magnétique [10].

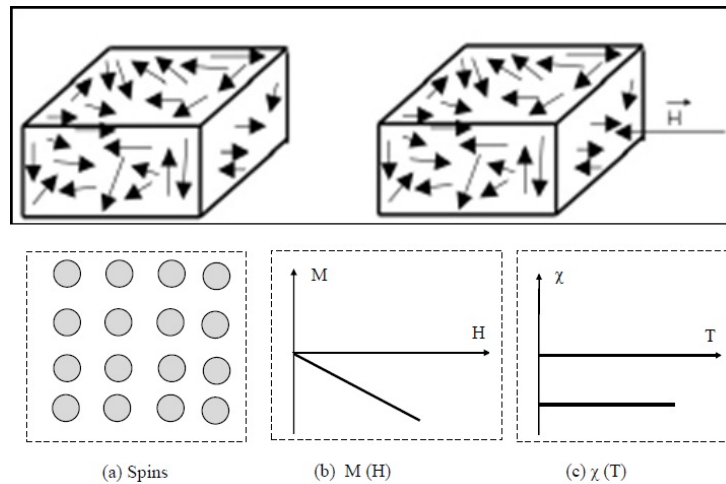


Fig 1.9: Diamagnétisme

### 1.5.2.2 Paramagnétisme

Le paramagnétisme est un processus d'aimantation par passage d'un état désordonné à un état ordonné. Considérons un milieu contenant  $N$  atomes par unité de volume, chaque atome ayant un moment magnétique  $\vec{P}_m$ . Si aucun champ appliqué ne vient aligner les moments ceux-ci seront dirigés au hasard figure ?? et leur résultante sera nulle. Par contre, si un champ magnétique est appliqué dans le milieu, il va tendre à orienter les moments parallèlement à lui-même [7]. L'augmentation de la température rend l'aimantation faible. A température élevée, l'aimantation devient linéaire en fonction du champ [11]. Dans le cas idéal, la susceptibilité due au paramagnétisme est dépendante de la température, elle est calculée par Langevin et Brillouin.

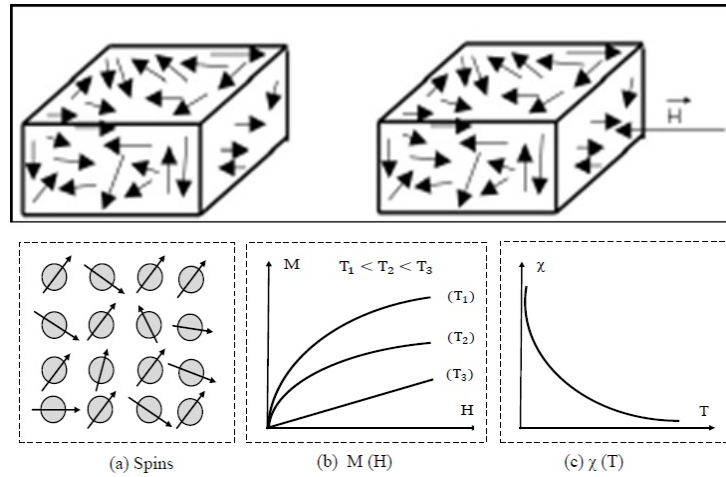


Fig 1.10: Paramagnétisme.

### 1.5.2.3 Ferromagnétisme :

Les matériaux ferromagnétiques (fer, cobalt et nickel) ont des moments magnétiques permanents dus principalement aux spins, comme les matériaux paramagnétiques, à la différence que les spins voisins présentent un couplage élevé. Dans un corps ferromagnétique, du fait de ce couplage, les moments de spin voisins s'alignent spontanément les uns avec les autres figure ?? L'interaction de deux atomes  $i, j$  portant les spins  $\vec{S}_j, \vec{S}_i$  induit une énergie dite énergie d'échange [10]

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

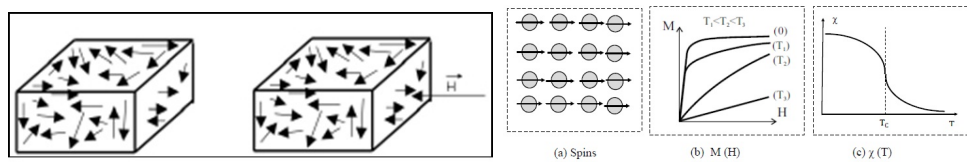


Fig 1.11: Ferromagnétisme.

### 1.5.2.4 Ferrimagnétisme

Néel a proposé ce terme pour désigner la construction magnétique d'un certain nombre des corps, en particulier celle des ferrites. donne un exemple extrêmement schématique d'un tel corps; bien qu'il existe à l'état ordonné des moments de direction opposé l'aimantation total n'est pas nulle car les différents moments magnétiques élémentaires ne présentent pas le même module. Les corps ferrimagnétiques se caractérisent par un réseau cristallin ou deux sites peuvent être occupés par deux ions possédant des moments magnétiques différents. En dessous de la température de Curie, l'un des sous réseaux est prépondérant devant l'autre et le comportement global est très proche du ferromagnétisme. Au dessus de la température de Curie, le comportement global est très proche du paramagnétisme .

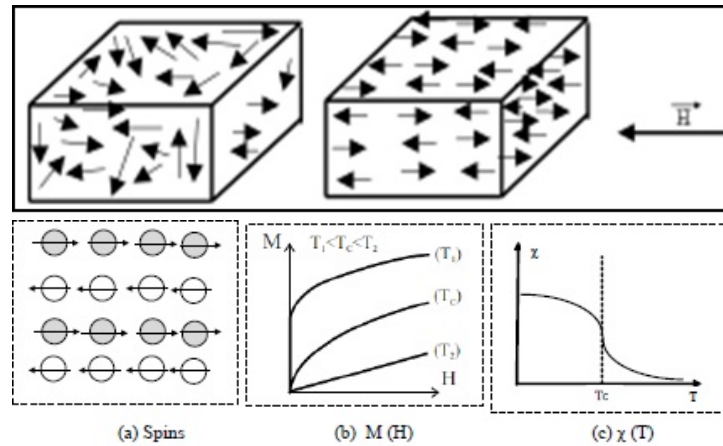


Fig 1.12: Ferrimagnétisme.

### 1.5.2.5 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 (TN). Au de là de cette température, l'agitation thermique perturbe l'ordre antiferromagnétique et l'on retrouve un comportement paramagnétique[11] [12] [13].

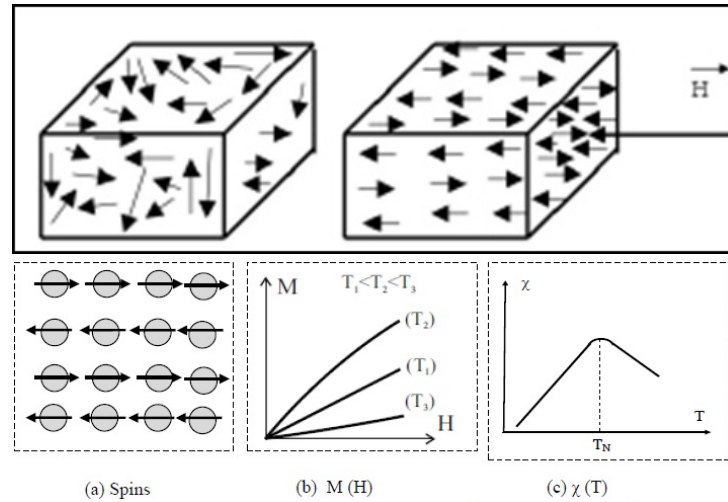


Fig 1.13: Antiferromagnétisme.

## 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 Détection

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.

## 1.6.4 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.

#### 1.6.4.1 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].

#### 1.6.4.2 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.

### 1.6.4.3 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.

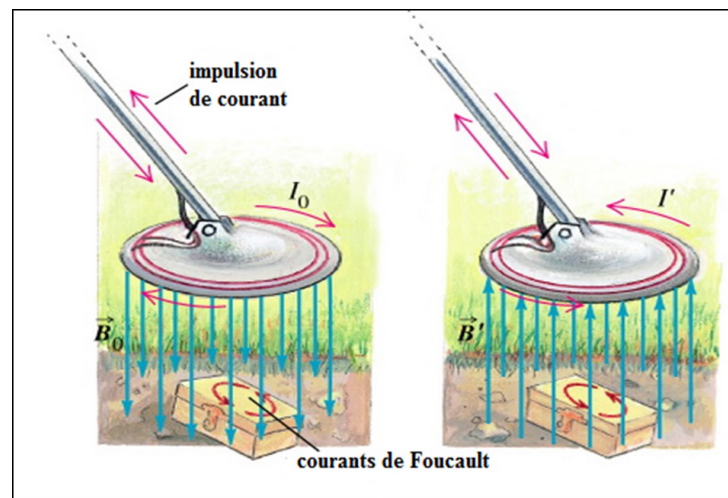


Fig 1.14: Détecteur à induction pulsée (détection souterraine)

### 1.6.4.4 Radar à pénétration de sol

Le radar à pénétration de sol, permettant également de détecter des métaux, se commercialise désormais en appareillage portatif pour la détection de loisirs, comme professionnelle. Le matériel reste toutefois très coûteux. Les profondeurs de détection peuvent atteindre 15 mètres. L'interprétation des résultats est très délicate et ces appareils ne doivent être utilisés que par des spécialistes

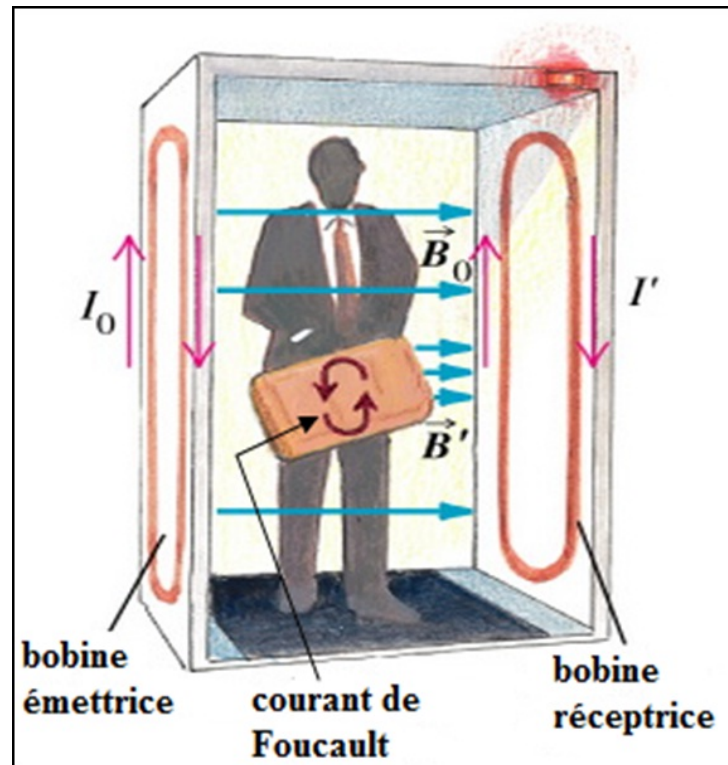


Fig 1.15: Détecteur à induction pulsée (pour la sécurité)

#### 1.6.4.5 Effets de sol (ground)

En détection, il existe sur les détecteurs milieu et haut de gamme un potentiomètre appelé "effet de sol" ou ground. Il existe également la mention "sensibilité" ou "sensitivity" en anglais. Celui-ci permet à l'utilisateur de régler manuellement le détecteur, en fonction de la minéralisation rencontrée sur différents sols composés d'une terre chargée en oxydes de minéraux, de façon à ce qu'il soit toujours calibré à un niveau de stabilité neutre. De cette manière, l'appareil n'est pas gêné par les faux signaux intempestifs que provoquent ces oxydes. Il est bon de savoir que ce genre de terre est chargé de particules métalliques naturelles ; la charge est positive et donc dite  $\acute{e}$  positive  $\grave{z}$ , contrairement à la plage qui elle est chargée en salinité. Le sel n'étant pas un métal, la charge sera donc négative. Donc l'utilité d'un tel réglage sur la plage en bord de mer n'aura aucun effet sur les faux signaux générés par le champ magnétique provoqué par la haute teneur en sel. Il ne servira donc à rien de posséder un tel réglage si ce n'est simplement à corriger les particules et oxydes métalliques contenus dans le sable.



## 1.7 Utilisation :

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

### 1.7.1 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: Équipe d'un détecteur de métaux

## 1.7.2 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].

## 1.7.3 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 [14].

## 1.7.4 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.[14]



Fig 1.17: Détecteur de métaux dans un aéroport

## 1.8 Équations de base de l'électromagnétisme

### 1.8.1 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 [15][16][17].

### 1.8.2 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:**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{D} = \rho \end{array} \right. \quad (1.6)$$

- **Lois constitutives des milieux**

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \mu(H) \cdot \vec{H} \\ \text{où} \\ \vec{H} = \nu(B) \vec{B} \\ \vec{D} = \xi \cdot \vec{E} \end{array} \right. \quad (1.7)$$

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<sup>2</sup>].

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

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

## 1.9 Interprétation physique des équations électromagnétique

### 1.9.1 équation de couplage électromagnétique

- Loi d'induction de Faraday

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

Cette équation exprime le couplage électrique- magnétique en régime dynamique et où la variation temporelle de  $\vec{B}$  détermine le  $\text{rot} \vec{E}$ , 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 [18], 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 Stokes (voir Annexe I), nous avons :

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_s \text{rot} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

On obtient :

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

Ainsi, nous aurons :

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

• **Théorème d'Ampère**

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

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 [19]. Soit :

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

(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 :

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{s}$$

$$\text{Donc } \int_C \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

$$D'où \text{rot} \vec{H} = \vec{J}$$

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

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

$$\begin{cases} I = \oint_C \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dQ}{dt} \\ dQ = \rho \cdot dV \end{cases} \quad (1.8)$$

Où :

dQ : élément de charge,

dV : élément de volume.

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

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'ostogradski - 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 :  $\text{rot} \vec{H} = (J_c)$  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 :

$$\text{div} \vec{J}_c = \text{div}(\text{rot} \vec{H}) - \text{div} \vec{J}_D$$

$$\begin{aligned}
 &= 0 - \operatorname{div} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\
 &= 0 - \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{div} \vec{D}) \\
 &= -\frac{\partial \rho}{\partial t}
 \end{aligned}$$

## 1.10 Les équations de conservation

### 1.10.1 Divergence de l'induction magnétique

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

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

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

## 1.11 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 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

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

$\mu_r$  : 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.



## 1.12 Formulation des équations électromagnétiques

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier aux sien des dispositifs électrotechniques sont régis par les 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[21].

### 1.12.1 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 régité par les équations suivantes[21] . :

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{E} = \vec{0}; \text{ car } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \\ \text{div}\vec{D} = \rho \\ \vec{D} = \xi \vec{E} \end{cases} \quad (1.9)$$

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 :

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

### 1.12.2 Le modelé électrocinetique

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 régité par les équations :

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{E} = \vec{0} \\ \text{div}\vec{J} = 0 \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (1.10)$$

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

Le modèle se ramène alors à :

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

### 1.12.3 Le modelé magnétostatique

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[21] .

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

#### 1.12.3.1 Le modelé magnétostatique 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 :

$$\begin{cases} \vec{rot}\vec{H} = \vec{0}; \text{courants nuls} \\ div\vec{B} = 0; \text{induction conservation} \end{cases} \quad (1.11)$$

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 :

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

#### 1.12.3.2 Le modelé magnétostatique vectoriel :

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

$$\begin{cases} \vec{rot}\vec{H} = \vec{0} \\ div\vec{B} = 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

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

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

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

D'où le système d'équations

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

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

$$\begin{aligned} \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) &= \text{grad}v.\text{rot} \vec{A} + \text{rot}v.\text{rot} \vec{A} \\ \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) &= \text{grad}v.\text{rot} \vec{A} + v(-\Delta \vec{A} + \text{grad} \text{div} \vec{A}) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) &= \text{grad}v.\text{rot} \vec{A} - v\Delta \vec{A} \\ &= \text{grad}v.\text{rot} \vec{A} - v(\text{div} \text{grad} \vec{A}) \end{aligned}$$

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

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

L'équation précédente devient :

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

### 1.13 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 :

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

En termes d'équations, nous avons :

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{H} = \vec{J} \\ \vec{B} = \text{rot} \vec{A} \end{cases} \quad (1.13)$$

A ces équations, nous ajoutons les lois caractéristiques au milieu

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \vec{D} = \xi . \vec{E} \end{cases} \quad (1.14)$$

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 répandue dans l'étude des machines électriques, des dispositifs du chauffage par induction, des transformateurs, etc.

## 1.14 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 :

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

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

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

A partir des équations et nous avons :

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

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

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

Le potentiel vecteur  $\vec{A}$  ne peut pas être défini par la seule condition ;  $\vec{B} = \vec{rot}\vec{A}$  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 ;  $div\vec{A} = 0$  appelée Jauge de Coulomb [23]. Nous obtenons ainsi :

$$\begin{cases} \Leftrightarrow \vec{rot}\left(\frac{1}{\mu}\vec{rot}\vec{A}\right) + \sigma\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma\vec{grad}V - \sigma(\vec{\vartheta} \wedge \vec{rot}\vec{A}) = \vec{J}_{ex} \\ div\vec{A} = 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

Les termes  $\sigma(\vec{\vartheta} \wedge \vec{rot}\vec{A})$  et  $\sigma(\vec{\vartheta} \wedge \vec{rot}\vec{A})$  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  $(-\sigma\vec{grad}V)$  décrit la densité du courant dépendante des conditions électriques imposées aux extrémités des conducteurs.

U peut être considéré comme nul[21]. 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 :

$$\begin{cases} \vec{rot}(v\vec{rot}\vec{A}) + \sigma\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ex}; v = \frac{1}{\mu} : \text{rélectivité magnétique} \\ div\vec{A} = 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

• **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'ou l'équation devient :

$$\begin{cases} \text{rot}(\text{vr}\vec{ot}\vec{A}) + i\omega\sigma\vec{A} = \vec{J}_{ex} \\ \text{div}\vec{A} = 0 \end{cases} \quad (1.17)$$

• **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 ( $\Delta t_i$ ).

## 1.15 conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé les matériaux magnétiques qui sont à la base des applications des dispositifs de détection. Nous avons rappelé les différentes classes de matériaux magnétiques, et nous avons défini le système de détection. A la fin nous avons exposé les modelés mathématiques et les équations de base de l'électromagnétisme. Par la suite nous allons réaliser un prototype préliminaire pour dégager les lacunes de la détection.

## CHAPITRE 2

# RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE DÉTECTION

## PRÉLIMINAIRE

### 2.1 Introduction:

Ce chapitre décrit le système électromagnétique développé pour la détection des métaux magnétiques. Ce système est constitué par deux bobines : la première joue le rôle de bobine émettrice et la deuxième joue le rôle de bobine réceptrice. La bobine émettrice est alimentée par un générateur basse fréquence (*GBF*) avec une bande de fréquence variant entre  $50Hz$  et  $25MHz$ . La bobine réceptrice détecte les métaux entre les deux bobines. La réalisation de ce système semble à première vue une chose simple mais en pratique cela pose de grands problèmes. Ce système doit assurer trois objectives : le premier est d'assurer une distance de  $0.8m$  à  $1m$  entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice permettant le passage des personnes ; le deuxième est d'avoir un signal au niveau de la bobine secondaire qui soit détectable ; le troisième est d'avoir une sensibilité acceptable au niveau de la bobine secondaire.

## 2.2 Les appareils utilisés

Les appareils utilisés dans ce système de détection sont: un **GBF**, **une bobine émettrice**, **une bobine réceptrice** et un **voltmètre**, la description de chaque appareil est donnée ci-dessous :

### 2.2.1 Générateur Basse Fréquence

Un Générateur Basse Fréquence ou *GBF* est un appareil permettant de générer des signaux de différentes formes, de différentes fréquences (de jusqu'à  $25MHz$ ), et de différentes amplitudes (jusqu'à  $10V$ ).

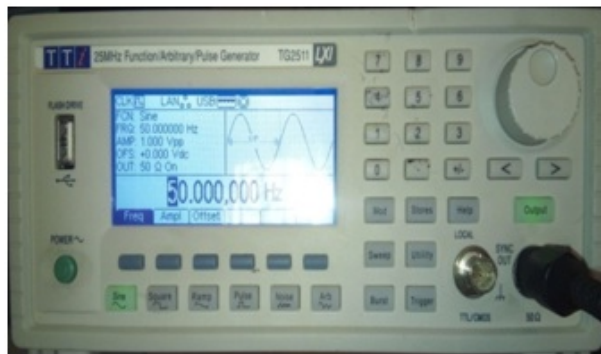


Fig 2.1: un générateur de basse fréquence

#### 2.2.1.1 Sorties d'un GBF

Un GBF possède deux sorties (de type BNC dont le blindage métallique est relié à la terre par sécurité) :

- la sortie Output ou Output  $50 \Omega$  : elle permet d'obtenir des signaux sinusoïdaux, créneaux, triangulaires ou continus.
- la sortie 'Output TTL' : elle délivre uniquement une tension créneaux entre 0 et  $10V$ .

#### 2.2.1.2 Forme des signaux

Le type de signal (sinusoïdal, créneau ou triangulaire) est déterminé en appuyant sur le bouton avec le pictogramme correspondant



### 2.2.1.3 Fréquence des signaux

La fréquence des signaux peut varier de  $1Hz$  (signal alternative) à  $25MHz$

### 2.2.1.4 Amplitude des signaux

Elle se règle par le bouton 'Level'. Elle peut varier généralement de quelques millivolts à une dizaine de volts. Pour obtenir des signaux de faible amplitude, on dispose de commandes qui permettent de diviser l'amplitude par 10 (touches ? 20dB en haut à droite)

## 2.2.2 multimètre

Qu'est-ce qu'un multimètre ?

Un multimètre est indispensable pour mesurer le courant électrique : ampères, volts, ohms. Il est particulièrement utile pour détecter tous les problèmes électriques dans la maison. 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



Fig 2.2: Un multimètre

### 2.2.2.1 L'utilisation d'un multimètre

Il faut savoir qu'un tel appareil remplace plusieurs appareils : ampèremètre, voltmètre, ohmmètre. Si vous devez en acheter un, 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.

### 2.2.2.2 A quoi sert un multimètre ?

Les appareils électriques fonctionnent avec différentes tensions : 12V, 24V, 220V, 380V. Plus généralement, le voltmètre sert à mesurer le courant électrique qui passe dans le circuit. En mode ampèremètre, on pourrait vérifier l'intensité électrique d'un appareil. Cela permet de calibrer les disjoncteurs du tableau électrique pour qu'ils soient en capacité d'absorber toute l'intensité des appareils qui y sont reliés. En mode ohmmètre, le multimètre sert à mesurer la résistance d'un circuit ou d'un composant. Ce mode permet de vérifier qu'il n'y a pas de court-circuit ou qu'un appareil n'a pas une fuite électrique à la masse. Le test de continuité se fait avec un bip qui indique le passage du courant

### 2.2.3 Bobines émettrices et bobine réceptrices

Pour ce système de détection, plusieurs bobines ont été utilisées pour l'émission et la réception des signaux. Ces bobines ont été utilisées soit comme bobines émettrices ou soit comme bobine réceptrices jusqu'à arriver à une combinaison optimale. Par la suite, on expose les caractéristiques des bobines utilisées.

### 2.2.3.1 Bobine B600

Marque : PHYWE

Nombre de spire :  $2 * 300spires$

Courant max :  $2A$

Résistance :  $2.5\Omega$

Inductance :  $9mH$

La résistance, l'inductance, la capacité et l'impédance de cette bobine est représenté dans les figures suivantes.

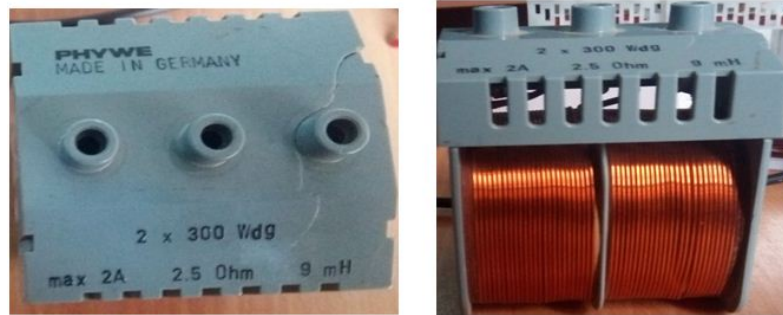


Fig 2.3: Bobine B600

### 2.2.3.2 Bobine B300

Marque PHYWE

Nombre de spire :  $2 * 150spires$

Courant max :  $4A$

Inductance :  $2mH$

Résistance :  $2.5\Omega$



Fig 2.4: Bobine B300

### 2.2.3.3 Bobine BD600

Marque : *ECODIME*

Nombre de spire : 600spires

Courant max : 0.8A

Inductance : 12mH

Resistance : 5.70hm



Fig 2.5: Bobine BD600

### 2.2.3.4 Bobine BD1100

Marque : *ECODIME*

Nombre de spire : 1100spires

Courant max :0.45A

Inductance :40mH

Resistance :17.90hm



Fig 2.6: Bobine BD1100

### 2.2.4 Le montage du système de détection

La bobine émettrice est alimentée directement par le *GBF*. Elle émit le champ magnétique à la bobine réceptrice où on récupère la mesure de la tension à l'aide d'un multimètre



Fig 2.7: Montage réalisé

## 2.3 Tests avec bobines PHYWE

Les testes avec bobines type *PHYWE* ont été effectués au premiers temps avec une distance de  $20cm$  en faisant varier la fréquence entre  $50Hz$  et  $25MHz$  pour les paires de bobines suivantes :  $B150 - B150, B150 - 300 \dots etc.$  La disposition adoptée des bobines est selon leur nombre de spires. Les bobines secondaires sont prises de telle sorte que leur nombre de spires soit égale ou supérieur au nombre de spire des bobines primaires. C'est le principe du transformateur élévateur où on peut capter plus de tension au niveau secondaire

Le tableau ?? montre les différents tests expérimentaux avec description des bobines émettrices et réceptrices.

Tableau 2.1: les différents tests expérimentaux .

Test	Bobine émettrice	Bobine réceptrice
Test 2	B150	B150
Test 1	B150	B300
Test 4	B300	B300
Test 5	B300	B600
Test 6	B600	B600

La figure ?? suivante représente la tension détectée au niveau des bobines réceptrices

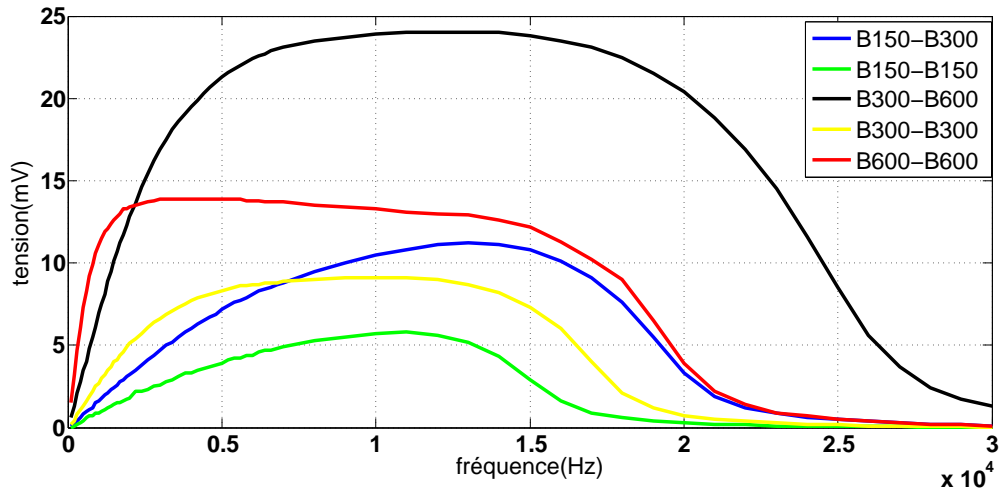


Fig 2.8: la tension détectée au niveau des bobines réceptrices.

On remarque que d'après ces tests, on obtient une famille de courbes avec différentes amplitudes de la tension détectée au niveau de la bobine réceptrice pour une distance de 20cm. On remarque que la meilleure tension détectée au niveau de la bobine réceptrice est dans le test 5 (B300 – B600). D'après cette figure, on peut dégager quelques résultats importants pour l'obtention des tensions meilleures au niveau des bobines réceptrices.

1. Le premier résultat important est que les meilleures tensions détectées sont obtenues pour le nombre de spires de la bobine réceptrice soit le double du nombre de spires des bobines émettrices tout en gardant le même nombre de spires pour la bobine émettrice : la disposition B150 – B300 est meilleure que la disposition B150 – B150 et la disposition B300 – B600 est meilleure que la disposition B300 – B300
2. Le deuxième résultat important est que l'utilisation d'un nombre de spires qui soit inférieur au niveau de bobine émettrice induisant un courant important et créant une chute de tension importante dans les fils et ainsi le flux généré par la bobine émettrice est moins important. Ainsi la tension détectée au niveau des bobines réceptrices sera inférieure : la disposition B600 – B600 est meilleure que la disposition B300 – B300 et la disposition B300 – B300 est meilleure que la disposition B150 – B150.

- Le troisième résultat important est que si on garde le même nombre de spires pour les bobines réceptrices, la bobine émettrice dont le nombre de spires est supérieur donne une meilleur détection cela veut dire que la deuxième remarque est applicable après une certaine fréquence appelé fréquence critique  $f_c$  le phénomène est renversé et constate que la première remarque sera applicable.

Pour le meilleur *test5* B300 – B600 (300 spires dans la bobine émettrice et 600 spires dans la bobine réceptrice) on a varié la distance entre les bobines de 20cm à 30cm, la tension détectée a diminuée considérablement

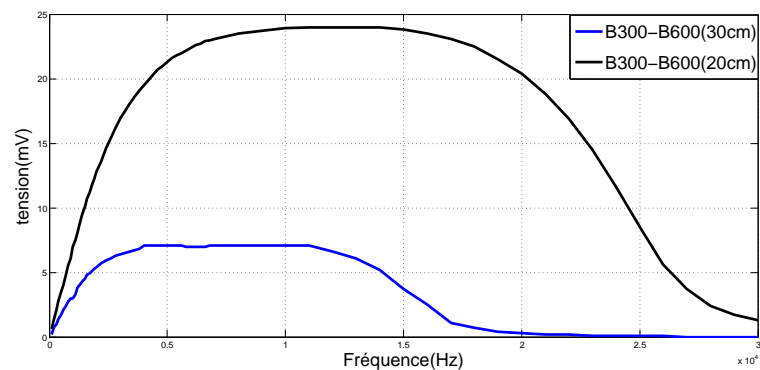


Fig 2.9: la variation de la tension détecté avec une distance  $d=20$  cm et  $d=30$ cm .

On remarque que la tension dans la bobine réceptrice va démunie de 25mV vers 7mV. Cela est dû à la distance croissante entre les deux bobines (bobine réceptrice et bobine émettrice)

## 2.4 Test avec bobines ECODIME

Les bobines ECODIME sont deux bobines qui contiennent 600 spires dans la bobine émettrice et 1100 spires dans la bobine réceptrice. Comme les tests précédents on a fixés la distance  $d = 20$  cm et après on a variés la fréquence de 50Hz jusqu'à 25MHz, les résultats obtenues sont présentés dans la figure??. La différence trouvée l'osque on a utilisé les bobines ECODIME est l'apparition d'une deuxièmes bande où la tension réceptrice est de loin très grande 900%ce qui est très considérable. On a essayé de comprendre pourquoi ce phénomène apparait mais jusqu'à maintenant on n'a pas pu trouver une explication formelle. Ce phénomène apparait au alentour d'une certaine fréquence qui est de 42kHz et d'amplitude qui peut atteindre 190 mV.

Comme l'objectif assigné est de détecter des tensions acceptables au niveau de la bobine réceptrice avec des distances allant jusqu'au 80 à 100 cm. On a augmenté la distance de 20cm jusqu'à 30cm et la tension détectée a diminué de 50%, qui implique une diminution dans le pique autour de la fréquence 42kHz ?? une augmentation de la distance plus que 30cm n'a rien donné au niveau de la bobine réceptrice .Pour augmenter la distance et avoir une tension détectée acceptable, on suivi la loi de l'induction qui stipule que la tension induite est :

$$U = w * \mu * H * S * n$$

Puisque la section des bobines est fixe ainsi que le champ magnétique l'une des manières d'augmenter la tension est d'augmenter la perméabilité magnétique  $\mu$ . Pour cela on a utilisé un barreau magnétique dans les bobines. La faisabilité de cette expérience est expliquée ci après.

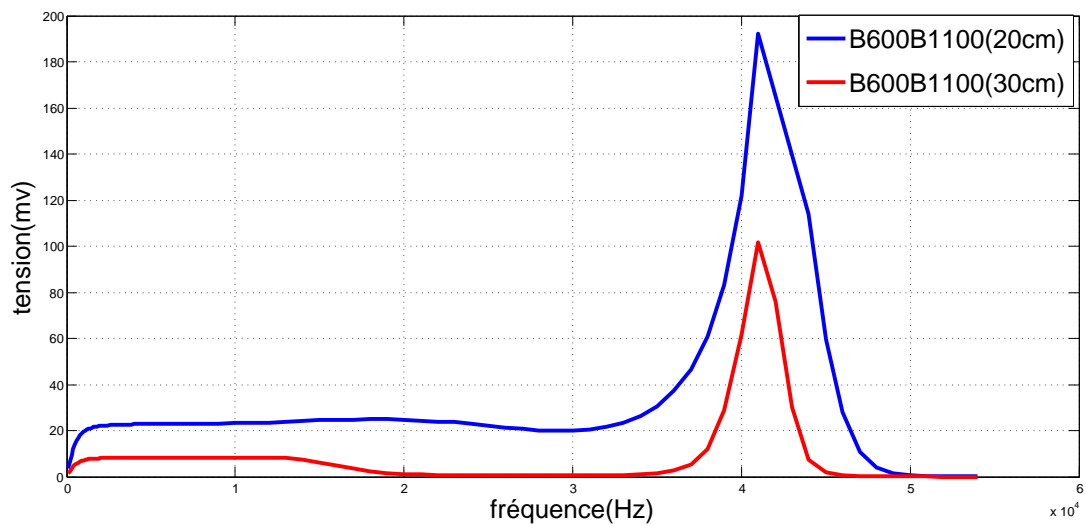


Fig 2.10: la tension détectée au niveau des bobines réceptrices(Bobines ECODIME) .



### 2.4.1 bobine ECODIME avec un barreau magnétique

Dans les mêmes conditions on a répété l'expérience mais avec un barreau magnétique dans la bobine émettrice fig??, on obtient des résultats meilleurs que sans barreau magnétique mais si on augmente la distance jusqu'à  $d = 40$  cm, la tension détectée diminue Figure??. L'objectif d'aboutir à une distance de  $80\text{cm}$  n'est pas atteint par l'introduction du barreau magnétique. L'utilisation du barreau magnétique dans la bobine réceptrice n'a pas donné des résultats significatifs.



Fig 2.11: montage réalisé avec barreau magnétique au niveau de la bobine émettrice .

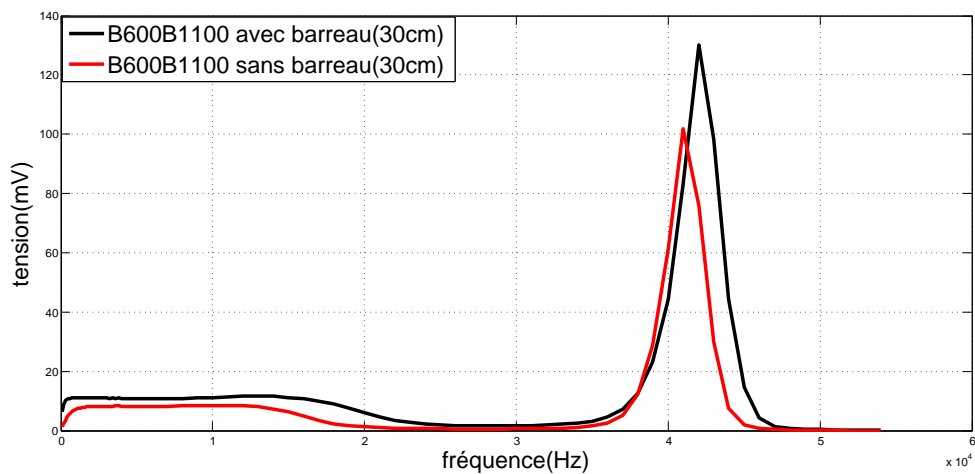


Fig 2.12: la tension détectée au niveau des bobines réceptrices(sans et avec barreau) .

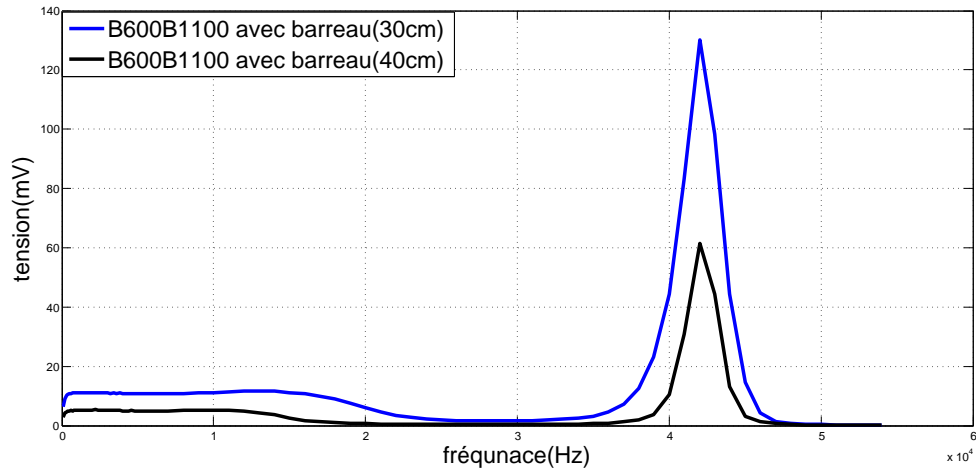


Fig 2.13: la tension détectée au niveau des bobines réceptrices(Bobines ECODIME) .

## 2.5 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expérimenté avec un ensemble de tests des bobines (PHYWE et ECODIME) par lequel nous avons changé la distance entre bobine émettrice et la bobine réceptrice et que dans le but d'augmenter la distance la plus possible, dans notre mesure on a utilisé un barreau magnétique qui nous a aidé à augmenter la distance , où nous avons atteint 40 cm, ce qui est un peu inadéquat à cet effet .Dans le prochain chapitre, nous allons essayer d'augmenter la distance afin que nous puissions améliorer le système de détection en utilisant d'autres types de bobines. Comme perspectives, Nous allons utiliser l'effet de la section droite des bobine pour augmenter la distance et la tension détectée par augmentation de la section droite des bobines.

## CHAPITRE 3

# AMÉLIORATION LE SYSTÈME DE DÉTECTION

### 3.1 Introduction:

La deuxième alternative pour augmenter la distance entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice est l'augmentation de la section droite. Dans ce chapitre, l'effet de l'augmentation de la section droite des bobines (ou la longueur moyenne des bobines) est à étudier d'une manière profonde puisque l'augmentation de la perméabilité magnétique par l'introduction d'un barreau magnétique n'a pas donné de résultats importants concernant l'augmentation de la distance entre bobine émettrice et bobine réceptrice. Les bobines *PHYWE* et *ECODIM* ont comme section droite  $4.8cm * 4.8cm = 23cm^2$ . Pour voir l'effet de l'augmentation de la section droite, les nouvelles bobines que nous avons réalisé sont 10 fois plus grande que les anciennes  $13.1cm * 17.5cm = 230cm^2$ .

. Le fil que nous disposant au sein du laboratoire a un diamètre qui est de  $0.5mm$  et  $0.8mm$  de diamètre proche de ceux de *ECODIME*. Du point de vue économique, nous n'avons pas dépassé le un quart de longueur de fil de la bobine *BD600*. Cela est un très grand avantage parce qu'il nous a permit de réduire le coût de plus de trois quart comme on va le constater dans les résultats qui suivent.

## 3.2 Réalisation des bobines

On a réalisé plusieurs types de bobines de même section droite mais avec un nombre de spires différents et de diamètres de fil différents. Pour réaliser ces bobines, on a utilisé un support adéquat de bobinage. Les bobines ainsi réalisées sont nommées est caractérisées comme suit :

### 3.2.1 AB50

Nombre de spire : 50spires

Résistance :  $1.024\Omega$

Inductance :  $0.945mH$

Longueur moyennes de la bobine :  $13.05cm * 17.65cm$

Diamètre de file:  $0.8mm$



Fig 3.1: Bobine AB50

### 3.2.2 AB100

Nombre de spire : 100*spires*

Résistance : 1.93 $\Omega$

Inductance : 2.79*mH*

Longueur moyennes de la bobine : 13.05*cm* \* 17.65*cm*

Diamètre de file: 0.8*mm*



Fig 3.2: Bobine AB100

### 3.2.3 SB22

Nombre de spire : 22*spires*

Résistance : 0.867 $\Omega$

Inductance : 0.137*mH*

Longueur moyennes de la bobine : 13.05*cm* \* 17.65*cm*

Diamètre du fil : 0.5*mm*



Fig 3.3: Bobine SB22

### 3.2.4 Bobine SB100

Nombre de spire : 100*spires*

Résistance : 1.93 $\Omega$

Inductance : 2.79*mH*

Longueur moyennes de la bobine : 12.55*cm* \* 17.85*cm*

Diamètre de file: 0.5*mm*



Fig 3.4: Bobine SB100

### 3.2.5 Support pour bobines

Les bobines émettrices et réceptrices sont fixées par des supports en bois. Ces supports évitent tout déséquilibre des bobines et aide à un bon transfert électromagnétique.



Fig 3.5: Support Bobines

### 3.3 Tests avec bobines réalisé

Pour vérifier la validité des hypothèses proposée un premier test a été réalisé avec bobines  $AB50 - AB100$  de section droite dix fois plus grande et de longueur deux fois plus petite que les bobines( $PHYWE$ )  $B300 - B600$ .

Les résultats obtenus sont impressionnants puisque on obtient plus que dix fois la valeur de la tension détectée dans la bobine réceptrice avec moins de coût (longueur de bobines réduit de deux fois).

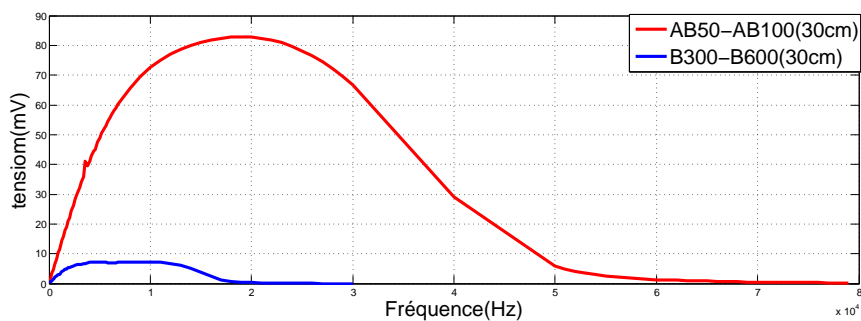


Fig 3.6: la tension détecté a niveau de bobine  $PHYWE$  et bobine réalisé

#### 3.3.1 Amélioration de la tension détectée avec les nouvelles bobines réalisées

Dans le but d'améliorer la tension détectée de la bobine réceptrice, une série de mesures a été effectuée avec différents nombres de spires et de diamètres tout en gardant la même section droite.

Les testes ont été effectués au premiers temps avec une distance de 30 cm en faisant varier pour les paires de bobines suivantes :  $AB50 - AB100$ ,  $AB50 - SB100$  ... etc. La disposition adoptée des bobines est selon leur nombre de spires. Les bobines secondaires sont prises de telle sorte que leur nombre de spires soit égale ou supérieur au nombre de spire des bobines primaires. C'est le principe du transformateur élévateur où on peut capter plus de tension au niveau secondaire.

Le tableau montre les différents tests expérimentaux avec description des bobines émettrices et réceptrices.

Tableau 3.1: les différents tests expérimentaux par les bobines réalisés.

Tests	Bobine émettrice	Bobine réceptrice
Test1	AB50	SB100
Test2	AB50	AB100
Test3	AB100	SB100
Test4	SB22	SB100

En suivant la première condition du chapitre précédent et pour une même disposition (*Test1etTest2*) avec le même nombre de spires pour la bobine émettrice (50spires) et le même nombre de spires pour bobine réceptrice (100spires). On remarque que si on garde le même diamètre pour la bobine émettrice, on voit que la tension détectée est augmentée pour un diamètre plus petit *SB100* (0.5mm)mieux que pour un diamètre plus grand *AB100* (0.8mm). Les résultats sont reportés sur la (figure) suivante et peut être considéré comme une quatrième condition.

D'autres testes ont été faits ais n'ont pas donné des résultats meilleurs.

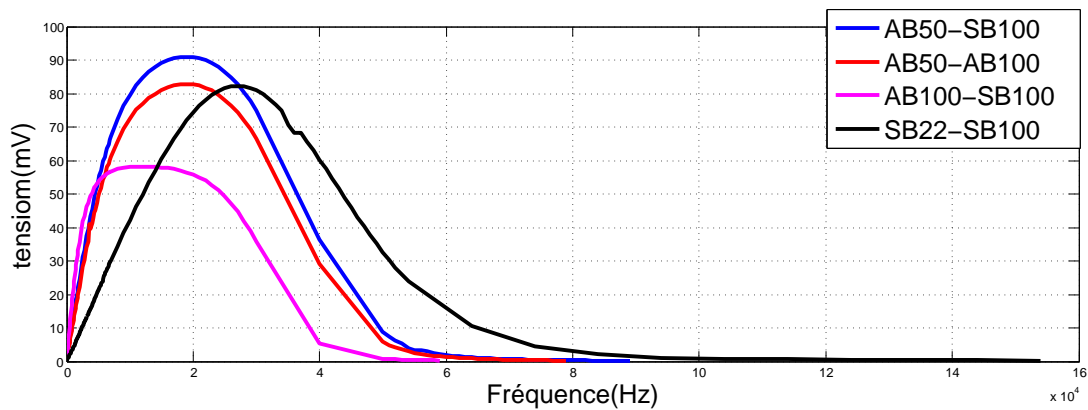


Fig 3.7: les tension détecte par les différants bobines réalisés



### 3.4 Amélioration de la tension détectée par l'augmentation de la section droite de la bobine secondaire

D'après les résultats du premier chapitre, les bobines *ECODINE* ont montré une deuxième zone où la tension détectée est importante. Les résultats n'ont pas montré une deuxième zone et on n'a pas pu expliquer l'apparition de cette deuxième zone dans les bobines *ECODIME*. On a remarqué que pour les bobines *ECODIME* que le nombre de spires important est préférable pour cela on a augmenté le nombre de spire de 100spires jusqu'à 180spires de plus on a augmenté plus la section de  $230\text{cm}^2$  jusqu'à  $653\text{cm}^2$ . Cela a donné par hasard la deuxième zone pour une disposition réceptrice. Cette bobine a montré des grandes performances au niveau des distances et on peut dépasser les 50cm aisément avec des tensions détectées très supérieurs. La bobine ainsi réalisée est nommée *GB* est caractérisée comme suit :

#### 3.4.1 grand bobine (GB)

Nombre de spire : 183spires

Résistance :  $6.29\Omega$

Inductance :  $5.46\text{mH}$

Longueur moyennes de la bobine :  $22.75\text{cm} * 28.7\text{cm}$

Diamètre de file :  $0.8\text{mm}$



Fig 3.8: la grand bobine

### 3.4.2 Effet de la distance pour différentes bobines

#### 3.4.2.1 Essai 1 (AB50-GB)

Dans cette expérience, nous mettons la bobine *AB50* comme une bobine émettrice, et la grande bobine *GB* comme bobine réceptrice, et nous avons changé la distance de *70cm* à *90cm*. La tension détectée est représenté sur la figure ???. En augmentant la distance, la tension détectée diminue.

Tableau 3.2: les différents tests expérimentaux par les bobines réalisé(AB50-GB).

Tests	Bobine émettrice	Bobine réceptrice	Distance (cm)
Test1	AB50	GB	70
Test2	AB50	GB	80
Test3	AB100	GB	90

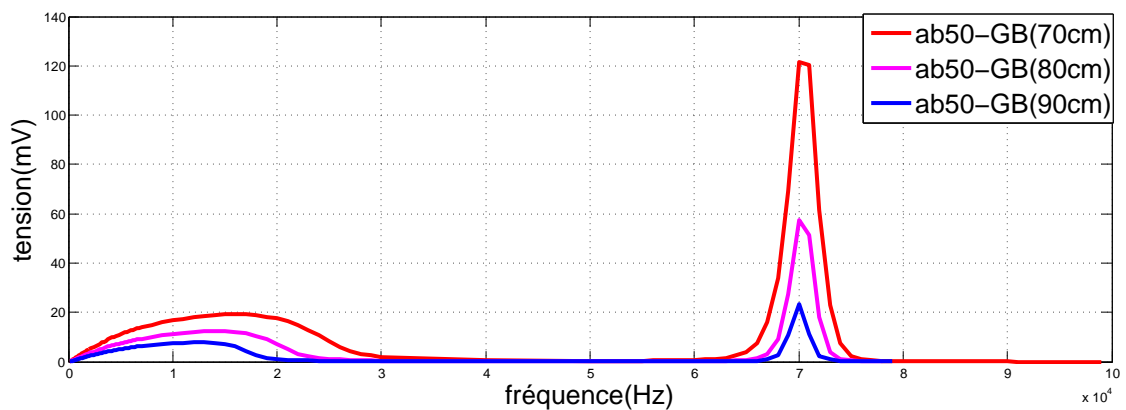


Fig 3.9: les tensions détectés par la grand bobine a différente distance(AB50-GB)

### 3.4.2.2 Essai 2 (AB100-GB)

Dans cette expérience, nous mettons la bobine *AB100* comme une bobine émettrice, et la grande bobine *GB* comme bobine réceptrice, et nous avons changé la distance de  $70\text{cm}$  à  $90\text{cm}$ . La tension détectée est représenté sur la figure ???. En augmentant la distance, la tension détectée diminue.

Tableau 3.3: les différents tests expérimentaux par les bobines réalisé(AB100-GB).

Tests	Bobine émettrice	Bobine réceptrice	Distance (cm)
Test1	AB100	GB	70
Test2	AB100	GB	80
Test3	AB100	GB	90

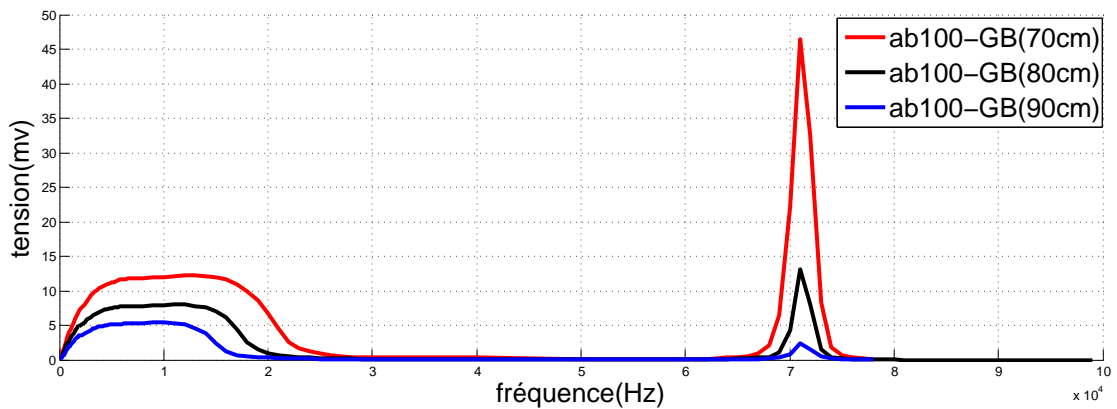


Fig 3.10: les tensions détectés par la grand bobine a différente distances (AB100-GB)

### 3.4.2.3 Essai 3 (SB22-GB)

Dans cette expérience, nous mettons la bobine *SB22* comme une bobine émettrice, et la grande bobine *GB* comme bobine réceptrice, et nous avons changé la distance de *70cm* à *90cm*. La tension détectée est représenté sur la figure ???. En augmentant la distance, la tension détectée diminue.

Tableau 3.4: les différents tests expérimentaux par les bobines réalisé(SB22-GB).

Tests	Bobine émettrice	Bobine réceptrice	Distance (cm)
Test1	SB22	GB	70
Test2	SB22	GB	80
Test3	SB22	GB	90

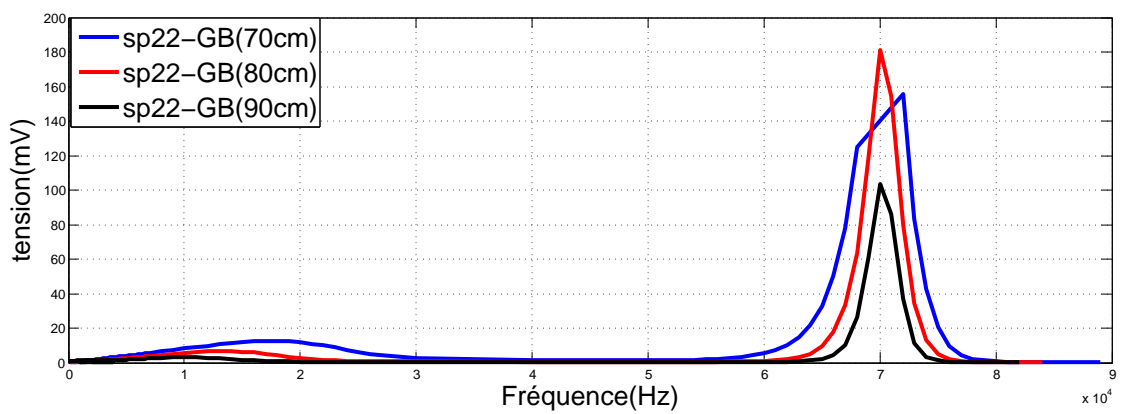


Fig 3.11: les tensions détectés par la grand bobine a différente distance(SB22-GB).

### 3.4.2.4 Essai 4 (SB100-GB)

Dans cette expérience, nous mettons la bobine *SB100* comme une bobine émettrice, et la grande bobine *GB* comme bobine réceptrice, et nous avons changé la distance de *70cm* à *90cm*. La tension détectée est représenté sur la figure ???. En augmentant la distance, la tension détectée diminue.

Tableau 3.5: les différents tests expérimentaux par les bobines réalisé(SB100-GB).

Tests	Bobine émettrice	Bobine réceptrice	Distance (cm)
Test1	SB100	GB	70
Test2	SB100	GB	80
Test3	SB100	GB	90

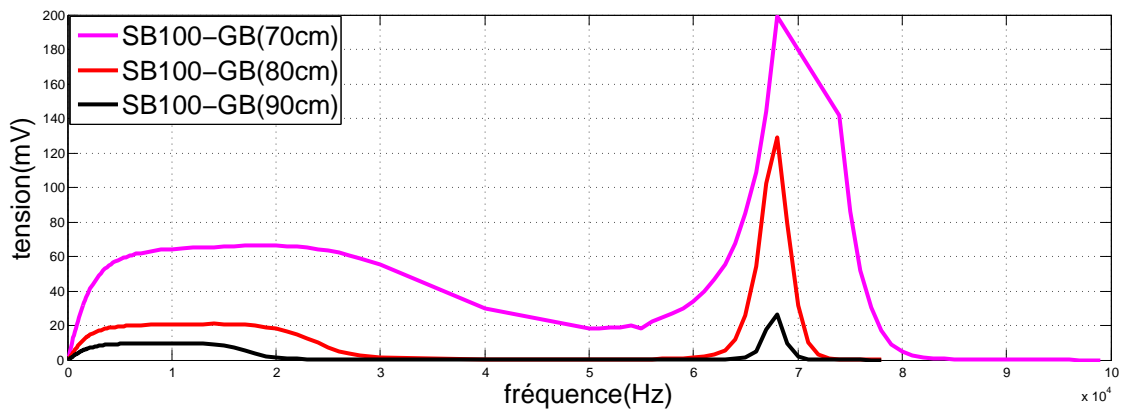


Fig 3.12: les tensions détectés par la grand bobine a différente distance(SB100-GB)

Cette figure représente les différent tension détectées par la bobine réceptrice ( $GB$ ) pour une distance égal  $d = 90cm$ ,

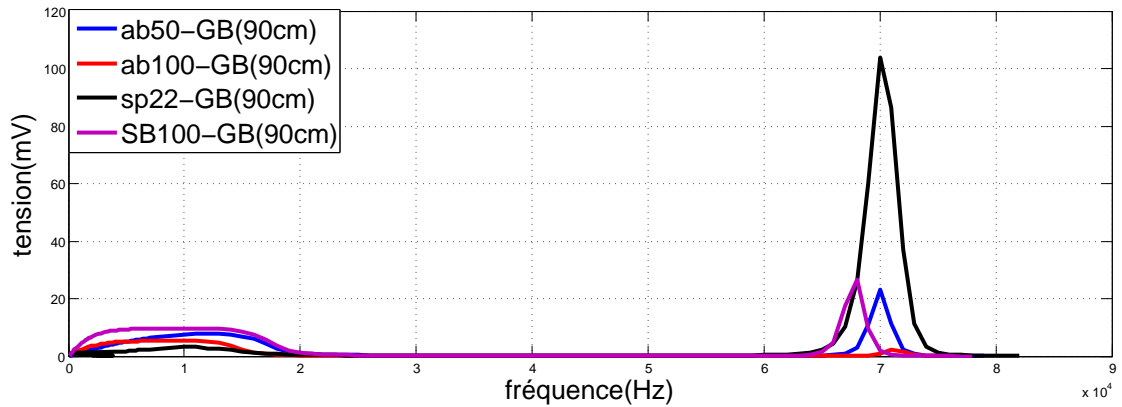


Fig 3.13: les tensions détectés par la grand bobine a distance de  $d=90cm$

On remarque que pour la plus grande distance 90 cm, la tension détectée est meilleur pour la disposition  $SB22 - GB$ . C'est-à-dire moins de spires au niveau de la bobine émettrice cela veut dire un courant plus grand puisque l'impédance a diminué. De plus la diminution du diamètre au niveau de la bobine émettrice joue en faveur de la bonne détection de tension.

### 3.4.3 Effet de l'introduction du barreau magnétique

Si on introduit un barreau magnétique dans la bobine émettrice figure??, cela joue en faveur de l'augmentation de la tension détectée de 40%.

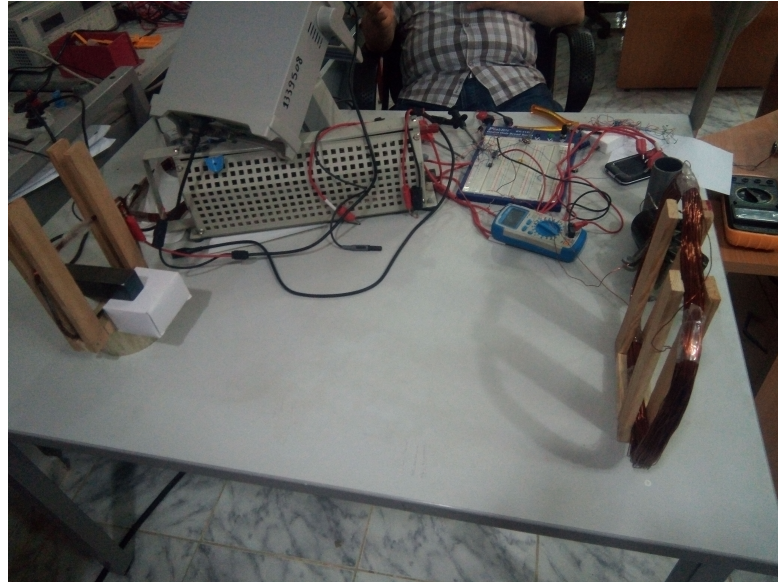


Fig 3.14: le montage réaliser avec le barreau

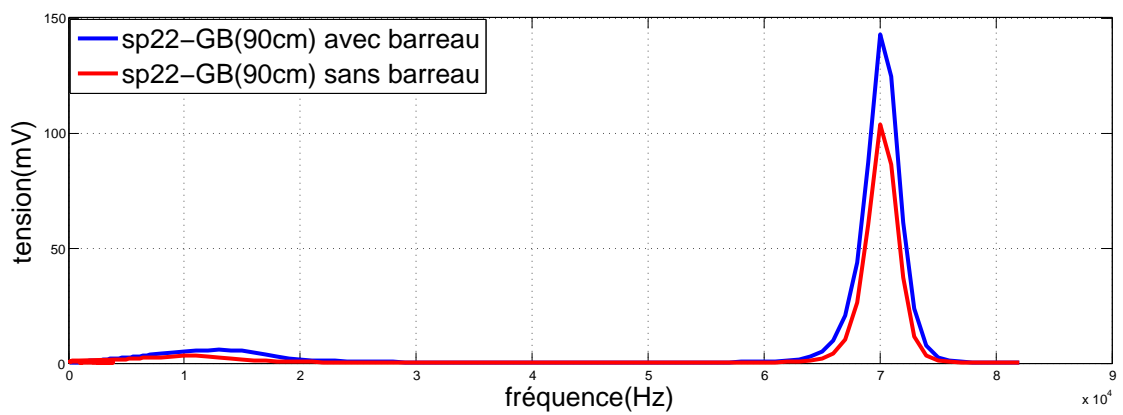


Fig 3.15: les tensions détectés par la grand bobine avec l'effet de barreau

### 3.4.4 Détection des matériaux magnétiques



Fig 3.16: le montage du system de détection

Après avoir surmonté tous les obstacles de détection, on a pu avoir une tension détecté de  $140mV$  avec une distance de  $90cm$  qui est une distance exigée par le cahier des charges. La détection des objets magnétiques est le vif de notre travail. On a introduit un corps magnétique figure??. La figure suivante montre la tension détectée avec et sans corps magnétique. La sensibilité de la détection est montrée dans la figure??

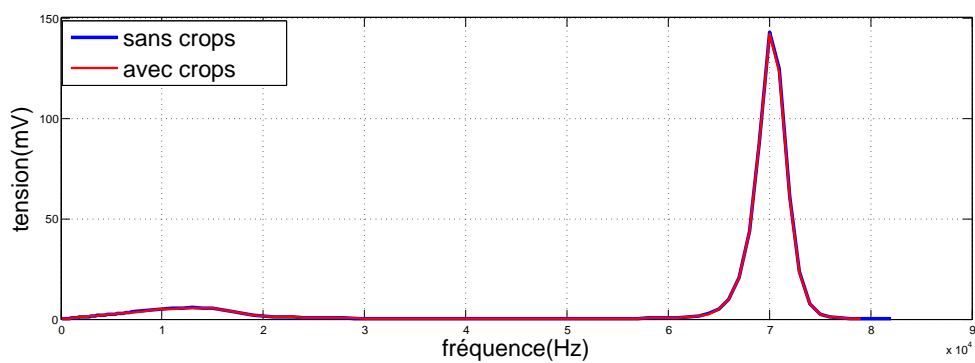


Fig 3.17: la tension détectée avec et sans corps magnétique.



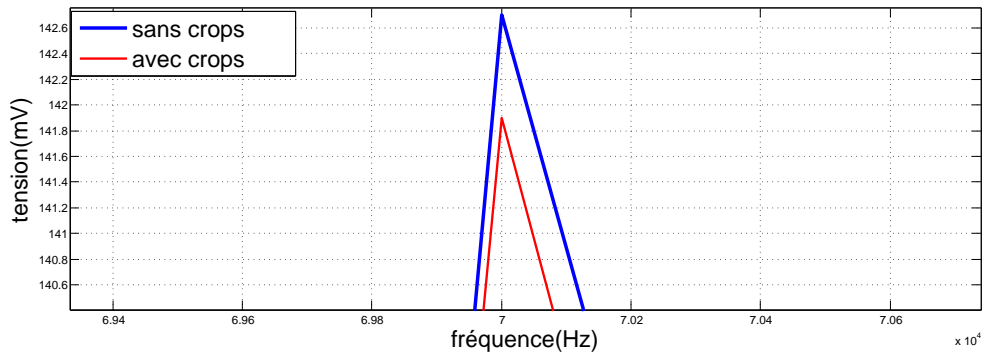


Fig 3.18: Zoom.

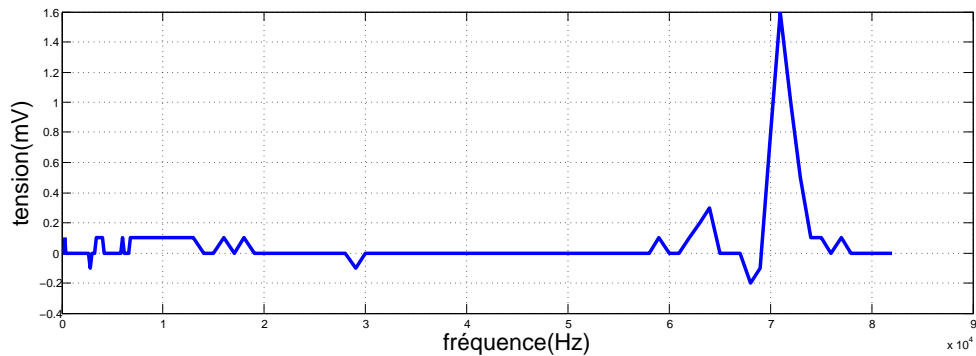


Fig 3.19: différence de tension détectées avec et sans corps magnétique.

on remarque qu'on a une bonne sensibilité de détecteur des corps magnétique pour la fréquence  $70KHz$

### 3.5 conclusion

L'objectif visé par ce travail est la réalisation d'un détecteur des métaux par variation de fréquence ou nous avons présenté des technique d'amélioration du système de détection pour augmenter la distance et la tension détectée par la bobine réceptrice. Pour améliorer le dispositif de détection, on a recouru à l'utilisation de barreau magnétique, ce dernier nous a aidés à améliorer la tension détecté de 40% on a obtenu une bonne sensibilité de détection à la fréquence  $70kH z$ , pour les corps magnétique.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les différents types de détecteurs électromagnétiques ont été exposés. Nous avons présenté un rappel sur la production du champ électromagnétique dans les matériaux magnétiques qui sont à la base de la détection. On peut trouver plusieurs formes du magnétisme selon la susceptibilité de chaque matériau. Parmi les matériaux magnétiques les plus utilisés dans le domaine des hautes fréquences, on trouve les ferrites ou fer silicium. On a exposé les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques présents dans les dispositifs électrotechniques. Des modèles mathématiques 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 pu étendre la détection aux distances exigées par le cahier des charges  $90cm$  puisque le système ne permet pas d'aller plus loin de certaines distances.

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 techniques nouvelles : l'amélioration des bobines émettrices et réceptrices par augmentation de la section droite et par utilisation des barreaux magnétique en ferrite. La recherche de la fréquence propice à la détection était l'objectif visé par ce travail qui a abouti à la réalisation d'un détecteur de métaux par variation de l'induction magnétique où nous avons pu améliorer la tension détectée de 40%

La sensibilité de détecteur a été trouvée pour la fréquence  $70KHz$  pour les corps magnétiques.

Comme perspective, nous allons améliorer la sensibilité du système et de réaliser le système de signalisation