

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Calcul de champ magnétique pour les
systèmes de détections**

Présenté par :
ABID Mohamed
Soutenu le : 07 Juin 2015

Devant le jury composé de :

Mr. REZIG Mohamed

MAA

Président

Mr. MIMOUNE Souri Mohamed

Pr

Encadreur

Mr. KHENE Mohamed Lotfi

MCB

Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine électrique

Thème :

Calcul de champ magnétique pour les systèmes de détections

Proposé par : Mr. MIMOUNE Souri Mohamed

Dirigé par : Mr. MIMOUNE Souri Mohamed

RESUMES (Français et Arabe)

On a fait dans ce travail de connaitre 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 connaitre la position des corps ferromagnétiques.

قمنا من خلال هذا العمل بمعرفة كيفية مبدأ عمل كاشف المعادن و أنواعه، الذي يعتمد على التقنيات الكهرومغناطيسية و الذي يسمح لنا بمعرفة موقع الأجسام المغناطيسية

Mots clés :

Ferromagnétique, MDF, Electromagnétique, Détecteur des métaux.

Dédicace

Avec l'aide et par la grâce de dieu, j'ai achevé mon ouvrage pour l'obtention du grade de diplôme Master en électrotechnique.

Je le dédie à ma mère et mon père que dieu me les garde.

Comme je dédie ce modeste travail à mes frères, mes sœurs qui sont très chères et à tout la famille, je le dédie également à tous mes amis.

ABID MOHAMED

Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord et avant tous 'Dieu tout grand'.

Un grand honneur, un grand remerciement à notre cher encadreur
Pr. Mimoune Sourî Mohamed, et nous a fait preuve de bon foi pour ses directives
Et ses remarques, sincèrement il nous a aidés achevé ce présent mémoire.

Enfin, nous remercions chaleureusement l'ensemble des amis et collègues
qui ont contribué à l'aboutissement de notre travail.

LISTE DES TABLEAUX

Tab IV.1 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 0$ cm.....	38
Tab IV.2 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 10$ cm.....	38
Tab IV.3 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 20$ cm.....	38
Tab IV.4 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 30$ cm.....	38
Tab IV.5 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = -10$ cm	39
Tab IV.6 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = -20$ cm	39
Tab IV.7 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = -30$ cm	39
Tab IV.8 : Les valeurs réelles et les valeurs localise	42
Tab IV.9 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 0$ cm.....	49
Tab IV.10 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 10$ cm	49
Tab IV.11 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 20$ cm	49
Tab IV.12 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = 30$ cm	49
Tab IV.13 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = -10$ cm	49
Tab IV.14 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = -20$ cm	50
Tab IV.15 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μr pour $d = -30$ cm	50
Tab IV.16 : Les valeurs réelles et les valeurs localise.....	53

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Champ d'excitation magnétique d'un aimant droit	4
Figure I.2 : Champ d'excitation magnétique d'un solénoïde	5
Figure I.3 : champ crée par un électroaimant	5
Figure I.4 : principe de l'effet Hall	7
Figure I.5 : Représentation atomique	8
Figure I.6 : Moment orbital.....	8
Figure I.7 : Moment de spin.....	9
Figure I.8 : Diamagnétisme.....	10
Figure I.9 : Paramagnétique	11
Figure I.10 : Ferromagnétisme.....	11
Figure I.11 : Ferrimagnétisme.....	12
Figure I.12 : Antiferromagnétisme.....	12
Figure I.14 : Détecteur à induction pulsée (pour la sécurité).....	16
Figure I.14 : Equipé d'un détecteur de métaux.....	17
Figure I.15 : Détecteur de métaux dans un aéroport	18

Chapitre III

Figure III.1 : Un domaine d'étude discrétisé en éléments finis.	25
Figure III.2 : Maillage du domaine d'étude en volume finis.....	26
Figure III.3 : illustration de la méthode de différence finies simple.	27
Figure III.4 : illustration de la méthode de différence finie améliorée.....	30

Chapitre IV

Figure IV.1 : Dimensions géométriques du système	34
Figure IV.2 : Maillage du domaine et condition aux limites.....	35
Figure IV.3 : Maillage du corps ferromagnétique (zoom)	36
Figure IV.4 : Répartition du module du potentiel vecteur magnétique A dans le plan (x,y)	36
Figure IV.5 : vecteurs de l'induction magnétique B dans le plan (x,y).....	37
Figure IV.6 : vecteurs de l'induction magnétique B créer par la premier bobine	37

Figure IV.7 : vecteurs de l'induction magnétique B à l'intérieur de corps ferromagnétique	38
Figure IV.8 : La valeur de B pour les différent valeur de Mur	38
Figure IV.9 : La variation de l'induction magnétique B par rapport Mur	41
Figure IV.10 : variation de l'induction magnétique B par rapport Mur	41
Figure IV.11: La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d	42
Figure IV.12: La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d	42
Figure IV.13 : Dimensions géométriques du système	44
Figure IV.14 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d	45
Figure IV.15 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d	45
Figure IV.16 : Dimensions géométriques du système	46
Figure IV.17 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d	47
Figure IV.18 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d	47
Figure IV.19 : Modèle géométrique à étudier.	48
Figure IV.20: Maillage du la premier bobine	49
Figure IV.21: Maillage du corps ferromagnétique	49
Figure IV.22 : vecteurs de l'induction magnétique B à l'intérieur de corps ferromagnétique	49
Figure IV.23 : variation de l'induction magnétique B par rapport Mur	51
Figure IV.24 : variation de l'induction magnétique B par rapport Mur	52
Figure IV.25 : La valeur de l'induction magnétique B par rapport à l'axe Y	52
Figure IV.26 : La valeur de l'induction magnétique B par rapport à l'axe Y	53

LISTE DES ABREVIATIONS

- B [T]** : induction magnétique.
- A [T.m]** : Potentiel vecteur magnétique
- E [V/m]** : champ électrique.
- H [A/m]** : champ magnétique.
- J [A/m²]** : densité de courant.
- μ [H/m]** perméabilité magnétique.
- μ_r** : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.
- μ₀ [H/m]** perméabilité magnétique du vide.
- σ [s. m⁻¹]**: Conductivité électrique .
- ε [F. m⁻¹]**: Permittivité électrique.
- ε₀[F. m⁻¹]**: Permittivité électrique du vide.
- ν [m. H⁻¹]** : Réductivité magnétique .
- D [c.m⁻²]** : Induction électrique.
- J_c [A.m⁻²]** : Densité de courant de conduction.
- ρ [c.m⁻³]** : Densité de charge électrique.
- MVF** : Méthode des Volumes finis.
- MEF** : Méthode des éléments finis.
- MDF** : Méthode des différences finies.
- EDP** : équations aux dérivées partielles.
- d** : décalage du corps ferromagnétique en [cm].

SOMMAIRE

DEDICACE

REMERCIEMENT

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....1

Chapitre I : Méthodes et outils des systèmes de détection électromagnétique

INTRODUCTION GENERALE..... 1

I.1. INTRODUCTION4

I.2. PRODUCTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE :.....4

I.3. METHODES DE MESURE D'UN CHAMP MAGNETIQUE.....5

I.3.1. L'effet Hall :6

I.3.2. Principe du capteur à effet hall :6

I.4. LES MATERIAUX MAGNETIQUES.....7

I.4.1. Moments magnétiques :7

I.4.2. Classification des substances magnétiques :.....9

I.4.2.1 Diamagnétisme..... 10

I.4.2.2 Paramagnétisme 10

I.4.2.3 Ferromagnétisme..... 11

I.4.2.4 Ferrimagnétisme..... 11

I.4.2.5 Antiferromagnétisme 12

I.5. LES DETECTEURS DE METAUX..... 12

I.5.1. Principe de fonctionnement d'un détecteur de métaux : 12

I.5.2. Discrimination : 13

I.5.3. Principes physiques :..... 13

I.5.4. Les types de détecteurs de métaux : 13

I.5.4.1 Détecteur à battement de fréquence : 14

I.5.4.2 Détecteur à très basse fréquence : 14

I.5.4.3 Détecteur à induction pulsée : 14

I.6. UTILISATION.....	16
I.6. 1. Déminage :	16
I.6.2. Archéologie :	17
I.6.3. Risques :	17
I.6.4. Détection sécuritaire :	18
I.7. CONCLUSION.....	18

Chapitre II : Formulation magnétique

I.1. INTRODUCTION	19
II.2. EQUATIONS DE BASE DE L'ELECTROMAGNETISME.....	19
II.2.1. Historique.....	19
II.2.2. Equations de Maxwell	19
II.2.3. Lois de comportement des milieux.....	20
II.2.4. Formulation des équations électromagnétiques	21
II.2.5. Modèle magnétostatique	21
II.3. CONCLUSION	23

Chapitre III : Méthode des différences finis

III.1. INTRODUCTION.....	24
III.1.1 Méthodes des différences finies	24
III.1.2 Méthodes des éléments finis	24
III.1.3 Méthodes des intégrales de frontière (MIF).....	25
III.1.4 Méthodes des volumes finis	25
III.2. L'APPLICATION DE LA METHODE DE DIFFERENCE FINIS :.....	27
III.2.1. Différences finies simple :	27
III.2.2. Différences finies améliorée :	29
III.3. CONCLUSION	32

Chapitre IV : Application d'un système de detection de matériaux magnétique

IV .1. INTRODUCTION.....	33
IV .2. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES DU SYSTEME	33

IV .2.1. La géométrie de premier cas :	33
IV. 2.2. Le Maillage utilisé et les conditions aux limities	34
IV. 3. RESULTATS ET INTERPRETATION.....	35
IV.4.1. LA GEOMETRIE DE DEUXIEME CAS :.....	47
IV.4.2. Le Maillage	47
IV.5. CONCLUSION	53
CONCLUTION GENERALE.....	54

INTRODUCTION GENERALE

Les plus anciens objets magnétiques (perles tubulaires) ont été retrouvés dans des tombes sumériennes et égyptiennes au quatrième millénaire avant Jésus-Christ. Les chinois et les grecs de l'antiquité ont été les premiers à constater les propriétés que possèdent certaines pierres à attirer des objets contenant du fer. Ces objets en fer une fois mis en contact avec ces pierres acquéraient à leur tour le pouvoir d'attirer d'autres objets en fer.

Ces pierres appelées « magnétite » sont constituées d'oxyde de fer. Vers le 2^{ème} 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.

Les techniques électromagnétiques sont les plus utilisées pour la détection et la localisation des corps ferromagnétiques aux plusieurs domaines (détection sécuritaire, déminage,), leur principe est relativement simple. A l'intérieur du portique règne un champ électromagnétique important, c'est à dire un champ électrique couplé à un champ magnétique. Le premier est produit par des variations dans la tension, plus la tension est élevée, plus le champ qui en résulte est intense. Le second apparaît lorsque le courant circule, il est d'autant plus intense que le courant est élevé.

Ce 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.

Dans un détecteur de métaux, il suffira donc de savoir capter ces perturbations et de les analyser pour pouvoir identifier 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.

Vu la complexité des caractéristiques géométriques et physiques des systèmes électromagnétiques réels, les méthodes disponibles sont des méthodes numériques ou semi-analytiques. Les phénomènes électromagnétiques sont représentés par des équations aux dérivées partielles. En général, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes numériques qui font appel à des techniques de discrétisation qui transforment les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques dans le domaine d'étude compte tenu des conditions aux limites. Parmi ces méthodes on trouve la méthode des différences finies qui a pris une grande place par sa simplicité à concevoir et l'interprétation physique des phénomènes.

Cette mémoire est structurée sous forme de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, Nous entament un rappel sur la production d'un champ magnétique et les différentes méthodes pour le mesurer, Egalement nous définissons les matériaux magnétiques influencés par le champ magnétique. En suite nous parlerons du principe de fonctionnement des détecteurs des matériaux ferromagnétiques et les différents types de ces détecteurs.

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons les methods mathématiques des équations électromagnétique en rappellons les équations de Maxwell, ainsi que les différentes formulations magnétostatiques les concernens . Ces formulations aboutisse à des équations aux dérivés partielles auxquelles il faut ajouter des conditions aux limites et des conditions d'interfaces.

Dans le troisième chapitre, En raison de la complexité des équations décrites au deuxième chapitre ils sont résolus à l'aide des méthodes numériques. Plusieurs méthodes numériques sont élaborer. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des intégrales de frontière (MIF).

-
- Méthodes des volumes finis (MVF).

Dans le chapitre IV, nous avons présenté tous les résultats obtenus en utilisant le code de calcul par la méthode de différences finies améliorée. Nous avons calculé le champ magnétique créé par deux bobines qui nous a permis de détecter et connaître la position du corps ferromagnétique. Cette étude permet de conclure que ce système permet de détecter les matériaux ferromagnétiques de grande perméabilité et de taille grande.

I.1. INTRODUCTION

Nous commençons ce chapitre par un rappel sur la production d'un champ magnétique et les méthodes de mesures de ce champ magnétique. Egalement nous présentons les matériaux magnétiques qui sont influencés par le champ magnétique, ainsi que le principe de fonctionnement des détecteurs des matériaux ferromagnétiques et les différents types de ces détecteurs .

I.2. PRODUCTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE :

Le champ magnétique est créé par les conducteurs parcourus par un courant, par les corps aimantés ainsi que par tout champ électrique variable.

♦ 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 ou 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.

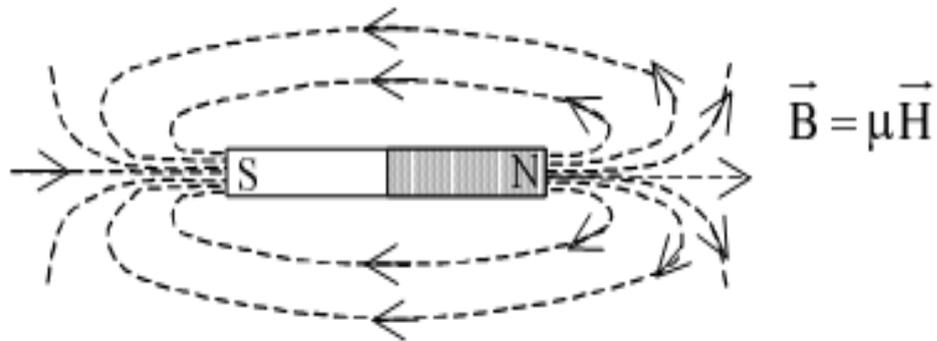


Figure I.1 : Champ d'excitation magnétique d'un aimant droit.

♦ 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.

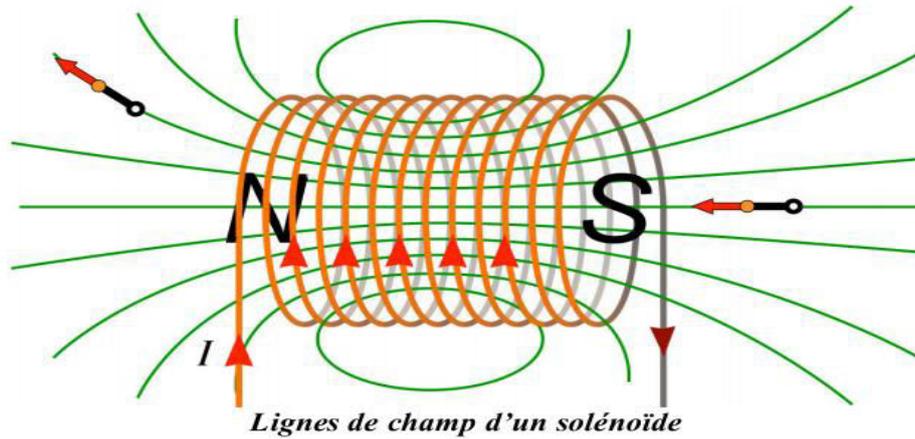


Figure I.2 : Champ d'excitation magnétique d'un solénoïde

◆ 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 [1].

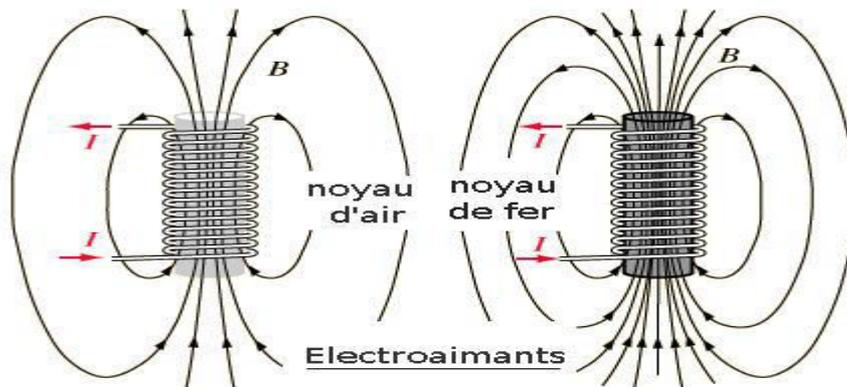


Figure I.3 : champ crée par un électroaimant

I.3. METHODES DE MESURE D'UN CHAMP MAGNETIQUE

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 [2].

I.3.1. L'effet Hall :

En 1879, E. H. Hall a observé qu'une faible tension était engendrée à travers un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique externe. Cette tension était très faible avec des conducteurs classiques et cet effet fut peu utilisé.

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 .

I.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'étendue la mesure de 10^{-3} à 10^5 [mT].

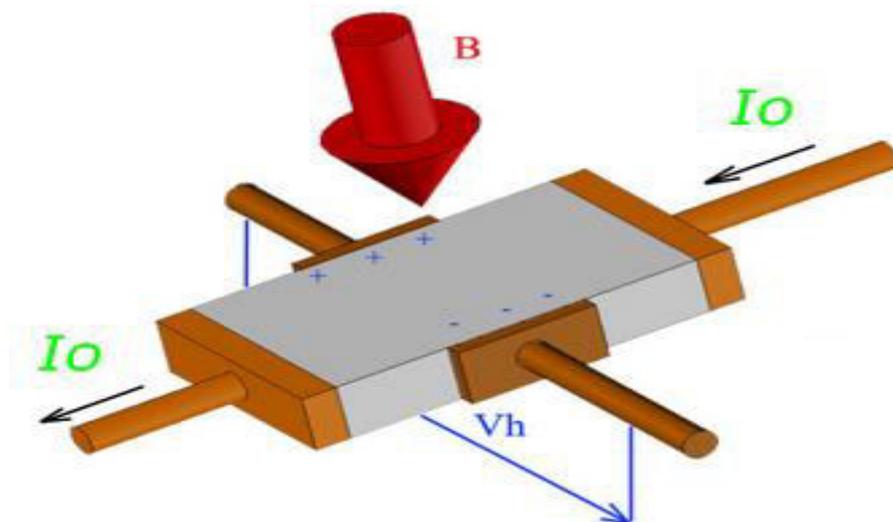


Figure I.4 : principe de l'effet Hall

$$V_h = K_h \times I_0 \times B$$

K_h : constante de Hall fonction de matériau.

B : Le champ magnétique appliqué en Gauss.

I_0 : Courant induit.

V_h : Champ Electro Magnétique en volts

I.4. LES MATERIAUX MAGNETIQUES

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 [3].

I.4.1. 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 1.1 La rotation des électrons autour du noyau de l'atome donne naissance à un courant électrique [4]. On définit deux notions élémentaires qui sont : le moment orbital et le moment de spin.

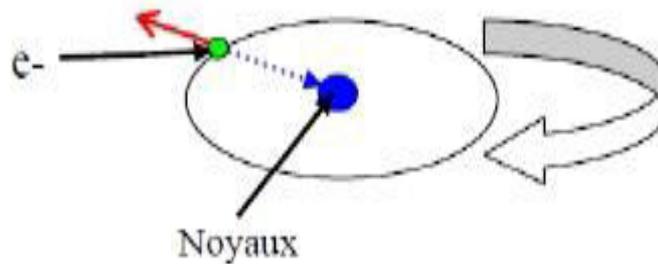


Figure I.5 : Représentation atomique

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 1.2

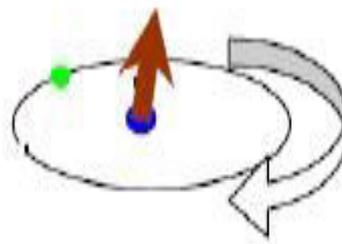


Figure I.6 : Moment orbital

Moment de spin

La rotation de l'électron tourne sur lui-même engendre un moment de spin (figure 1.3), c'est une propriété purement quantique des électrons

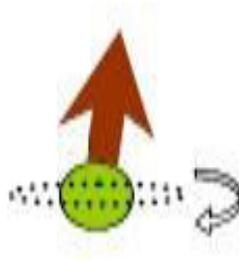


Figure I.7 : Moment de spin

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

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.1)$$

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 :

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \chi \cdot \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu_0 (1 + \chi) \cdot \vec{H} \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

Où

\vec{B} : Induction magnétique

μ_0 : Perméabilité du vide

\vec{H} : Champ magnétique

\vec{M} : Moment magnétique

χ : Susceptibilité magnétique

I.4.2. 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'aimanter par un champ magnétique, c'est-à-dire de créer un champ magnétique propre [5].

I.4.2.1 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 χ est négative et est définie par la pente pratiquement constante de la courbe d'aimantation $M(H)$:

$$\chi = \frac{\partial \mu}{\partial H} \quad (1.3)$$

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

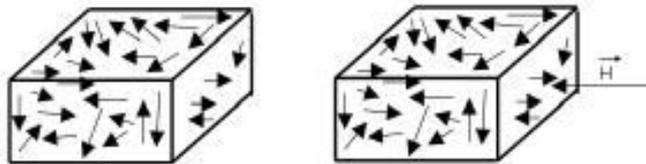


Figure I.8 : Diamagnétisme

I.4.2.2 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.

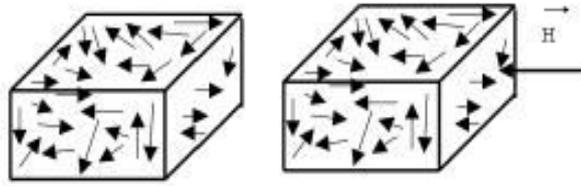


Figure I.9 : Paramagnétique

I.4.2.3 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 a 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 [6].

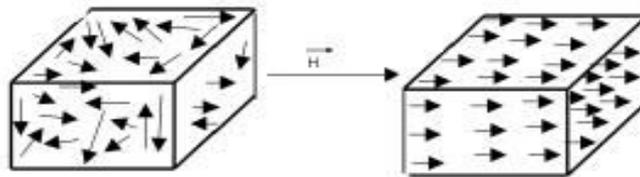


Figure I.10 : Ferromagnétisme

I.4.2.4 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. Toutefois ces moments ne sont plus indépendants les uns des autres mais au contraire fortement liés. De cette interaction, qui porte le nom de couplage antiferromagnétique, résulte un arrangement antiparallèle des moments.

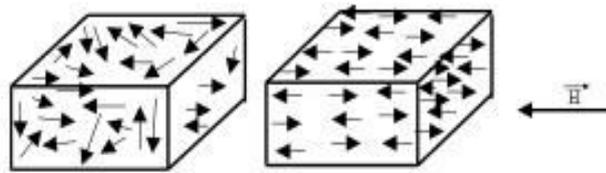


Figure I.11 : Ferrimagnétisme

I.4.2.5 Antiferromagnétisme

Les moments magnétiques des atomes, en absence de tout champ extérieur, peuvent s'orienter deux à deux en sens inverse l'un de l'autre et de même module. L'aimantation spontanée est donc nulle et l'effet d'un champ extérieur est une aimantation très faible.

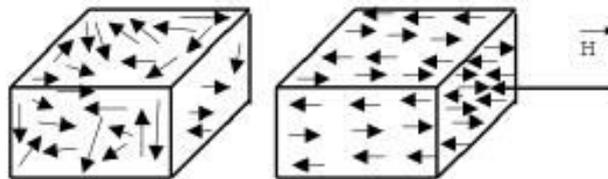


Figure I.12 : Antiferromagnétisme

I.5. LES DETECTEURS DE METAUX

Certains pourraient penser que l'utilisation du dispositif de détection de métal limité aux professionnels et aux amateurs qui veulent se enterré 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.

I.5.1. 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.

I.5.2. 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 discriminer 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 [7].

I.5.3. 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.

I.5.4. 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.

I.5.4.1 Détecteur à battement de fréquence :

Les détecteurs à battement de fréquence furent les premiers à apparaître car ils sont simples à mettre en œuvre 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 [8].

I.5.4.2 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.

I.5.4.3 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

Chapitre I : Méthodes et outils des systèmes de détection électromagnétique

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.

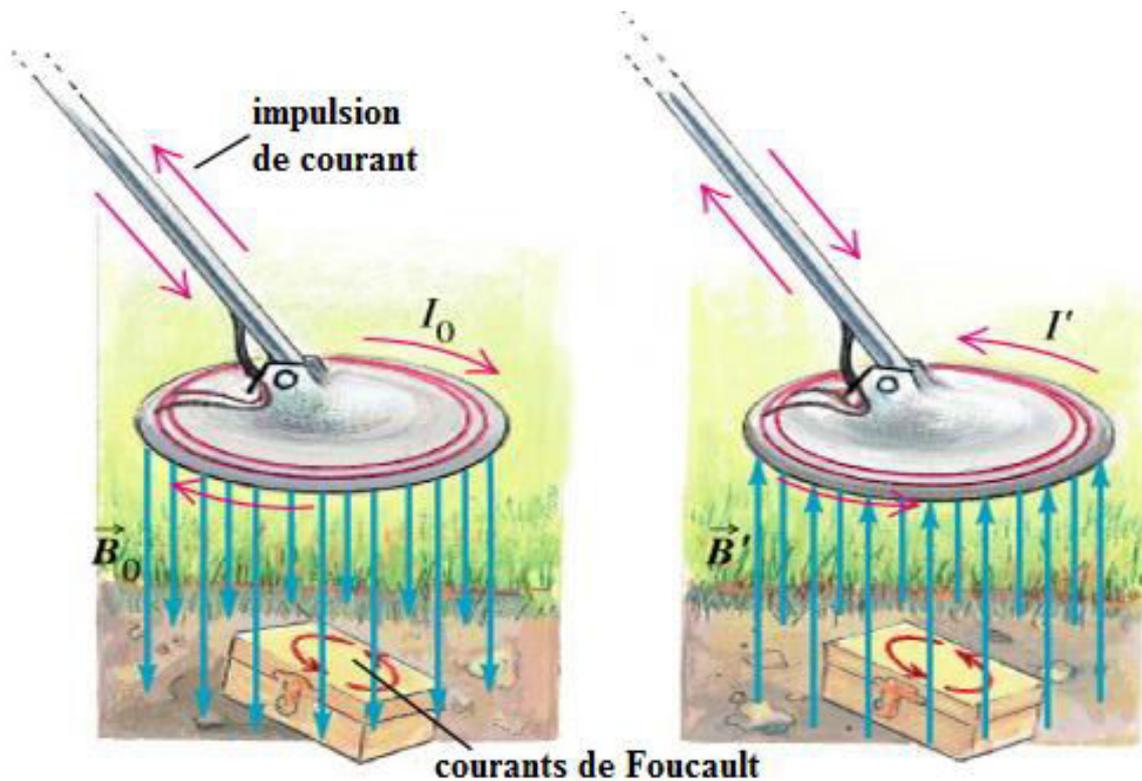


Figure I.13 : Détecteur à induction pulsée (détection souterraine)

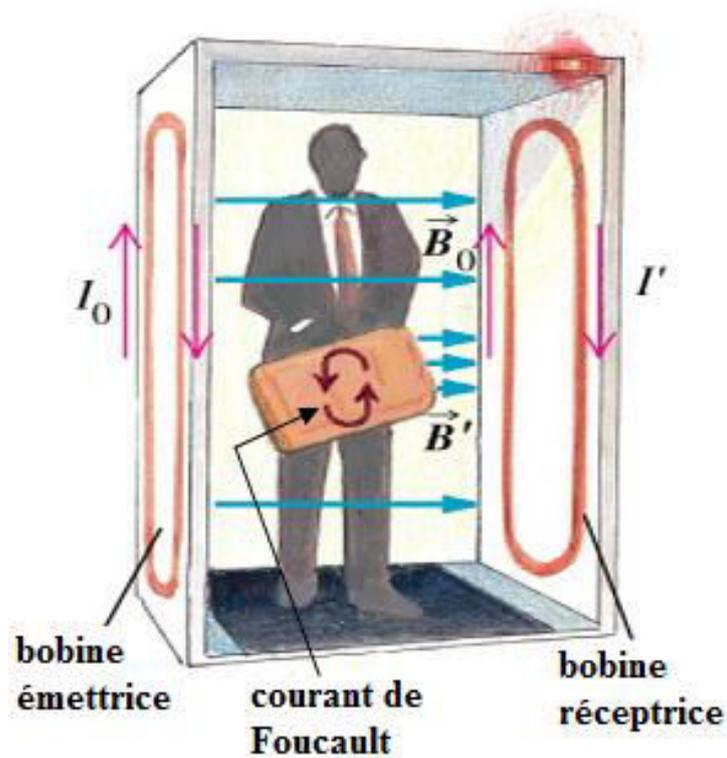


Figure I.14 : Détecteur à induction pulsée (pour la sécurité)

I.6. UTILISATION

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

I.6. 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.



Figure I.14 : Equipé d'un détecteur de métaux

I.6.2. 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 [9].

I.6.3. 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 [9].

I.6.4. 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.



Figure I.15 : Détecteur de métaux dans un aéroport

I.7. CONCLUSION

Ce chapitre a concerné 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 et comment calculé la valeur de l'induction magnétique qui est la base de cette technique.

I.1. INTRODUCTION

Nous présentons dans ce deuxième chapitre, les bases mathématiques des équations électromagnétique. à travers le rappel des équations de Maxwell, ainsi que les différentes formulations magnétostatiques. Ces formulations conduisent à des équations aux dérivés partielles auxquelles, il faut associer des conditions aux limites et des conditions d'interfaces.

II.2. EQUATIONS DE BASE DE L'ELECTROMAGNETISME

II.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 «Electromagnétisme », 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 [10][11][12].

II.2.2. Equations 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 :

Maxwell-Gauss:
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.1})$$

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

$$\text{Conservation du flux:} \quad \overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Maxwell-Ampère:} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

\vec{E} [V/m] et \vec{H} [A/m] : Champ électrique et magnétique.

\vec{D} [C/m²] et \vec{B} [T] : Induction électrique et magnétique.

\vec{J}_c [A/m²] et ρ [C/m³] : Densité de courants de conduction et de charge électrique.

L'équation (II.4) est une généralisation du théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

L'équation (II.2) correspond à la loi d'induction de Faraday, qui établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

Ces deux équations (II.4) et (II.2) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

Les équations (II.1) et (II.3) traduisent respectivement la conservation de la charge électrique et du champ magnétique.

II.2.3. Lois de comportement des milieux

Les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. Ainsi, pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu :

♦ Relations du milieu

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

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

Dans le cas linéaire nous avons :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = C^{te} \quad (\text{II.7})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = C^{te} \quad (\text{II.8})$$

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$: Perméabilité magnétique du vide [H/m].

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

ε : Permittivité électrique [F/m].

ε_0 : Permittivité électrique du vide $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$ [F/m].

II.2.4. Formulation des équations électromagnétiques

Les modèles de J.C.Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables.

Les équations se découpent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique .

II.2.5. Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ de l'équation (II.2) est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent :

- *Modèle magnétostatique scalaire*

Dans ce cas, les courants électrique sont nuls, il vient alors que les champs ne dépendent

pas du temps. D'après les équations (II.3) et (II.4), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{0}$$

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

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

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

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{div} (\mu \overrightarrow{\text{grad}} \Phi) = 0$$

- *Modèle magnétostatique vectorielle*

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

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

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

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

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

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \tag{II.9}$$

D'où le système d'équation :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{j} \tag{II.10}$$

En tenant compte des relations de l'analyse vectorielle, l'équation (II. 10) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}} v \times \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} + v \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}} v \times \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} + v (-\Delta \vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}} \text{div} \vec{A})$$

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

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

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

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

L'équation précédente devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = -(\text{div}(v \overrightarrow{\text{grad}})) \vec{A} = \vec{J} \quad (\text{II.11})$$

II.3. 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.

Dans notre travail, 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 de discrétisation des équations aux dérivées partielles par la méthode des différences finies.

III.1. INTRODUCTION

Les équations décrites au deuxième chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des intégrales de frontière (MIF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

III.1.1 Méthodes des différences finies

La variable inconnue ϕ est décrite par plusieurs valeurs dans les points d'un maillage. Le développement de l'inconnue en séries Taylor tronquées est utilisé pour approximer les dérivées de l'inconnue, dans chaque point du maillage, par différences finies en utilisant les inconnues voisines. En remplaçant les dérivées dans les équations différentielles par différences finies on obtient un système d'équations algébriques pour les valeurs de l'inconnue dans chaque point du maillage.

III.1.2 Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) sur tout dans les géométries complexes et quelques soient les conditions physiques de fonctionnements.

A la différence avec la MDF, la MEF consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue pour transformer les EDP en équations algébriques.

Toutefois, cette méthode ne s'applique pas directement aux EDP, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes :

-La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement, l'énergie du système étudié. Cette méthode n'est donc applicable que si on connaît une fonctionnelle équivalente au problème différentiel que l'on veut résoudre.

-La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.

A l'une ou à l'autre des deux méthodes, on associe une subdivision du domaine d'étude, en

éléments simples, appelés éléments finis, comme il est indiqué sur la figure (III.2), et à approximer la fonction inconnue sur chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de degré un, ou deux.

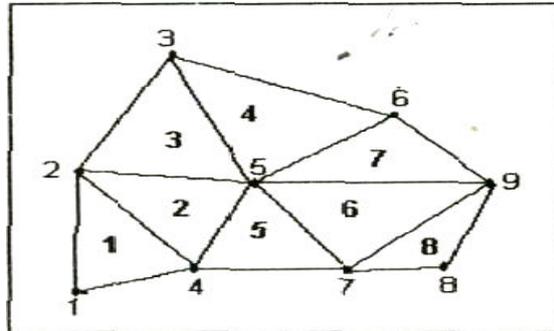


Figure III.1 : Un domaine d'étude discrétisé en éléments finis.

III.1.3 Méthodes des intégrales de frontière (MIF)

Elle est très utile lorsque le matériau est homogène et linéaire. Elle ramène le traitement de l'EDP dans l'ensemble du matériau à celui limité à la frontière du domaine. Ne nécessitant pas un maillage volumique ni matériau ni espace, elle est économique en taille mémoire et temps de calcul. Elle est souvent couplée à la méthode des éléments finis.

III.1.4 Méthodes des volumes finis

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. Cette méthode, même si elle ne fournit qu'une précision du premier ordre, possède des qualités qui en font l'une des plus adaptées à l'étude des écoulements turbulents. En effet, celle-ci est très robuste et permet de traiter des équations comportant des termes sources complexes et non-linéaires. De plus, elle a l'avantage de satisfaire la conservation de la masse sur chaque volume de contrôle. Enfin, elle peut être utilisée avec des maillages relativement grossiers, ce qui permet la mise en œuvre de code pour un coût raisonnable.

Comme la plupart des codes commercialisés tels que : FLUX EXPERT, FLUX 2D, FLUX 3D, ANSYS, ...etc. Le code FLUENT utilise la méthode des volumes finis pour la modélisation numérique.

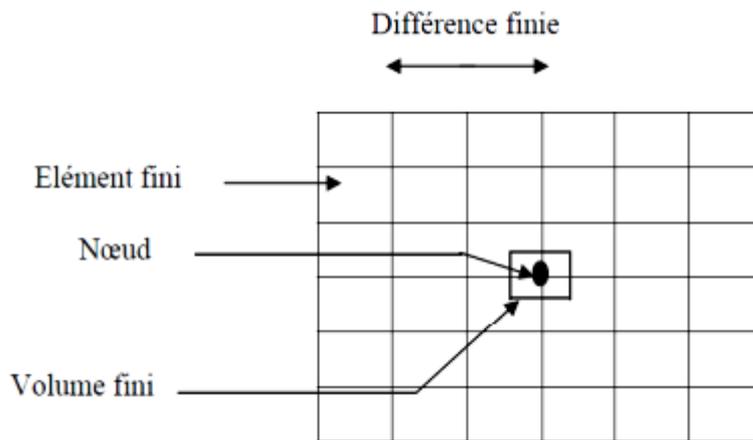


Figure III.2 : Maillage du domaine d'étude en volume finis.

III.1.5. Modèle mathématique

$$\begin{cases} \overline{Rot} \vec{H} = \vec{J} \dots (1) \\ Div \vec{B} = 0 \dots (2) \\ \overline{Rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots (3) \\ Div \vec{D} = \rho \dots (4) \end{cases} \quad \begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \dots (5) \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \dots (6) \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \dots (7) \end{cases}$$

De (5) on a $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$, on le remplace dans (1), on obtient $\overline{Rot} \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} \dots (8)$

De (2) on a $\vec{B} = \overline{Rot} \vec{A}$, on le remplace dans (8), on obtient $\overline{Rot} \left(\frac{\overline{Rot} \vec{A}}{\mu} \right) = \vec{J} \dots (9)$

L'équation (8) c'est l'équation magnétostatique tel que la source \vec{J} est indépendante du temps

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A \end{pmatrix}; \vec{J} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ J \end{pmatrix}$$

$$\overline{Rot} \vec{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial A}{\partial y} \\ -\frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \overline{Rot} \vec{A} = \frac{\partial A}{\partial y} \vec{i} - \frac{\partial A}{\partial x} \vec{j} = \vec{B} \dots (10)$$

$$\overrightarrow{Rot} \left(\frac{\overrightarrow{Rot} \vec{A}}{\mu} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \\ -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) \end{pmatrix} = \vec{J}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \dots (11)$$

C'est équivalent à l'équation : $div \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{grad} A \right) = -J$

Donc finalement on a deux équations aux dérivés partielles en 2D (11) et (10) à résoudre pour calculer B dans un plan en 2D

III.2. L'APPLICATION DE LA METHODE DE DIFFERENCE FINIS :

III.2.1. Différences finies simple :

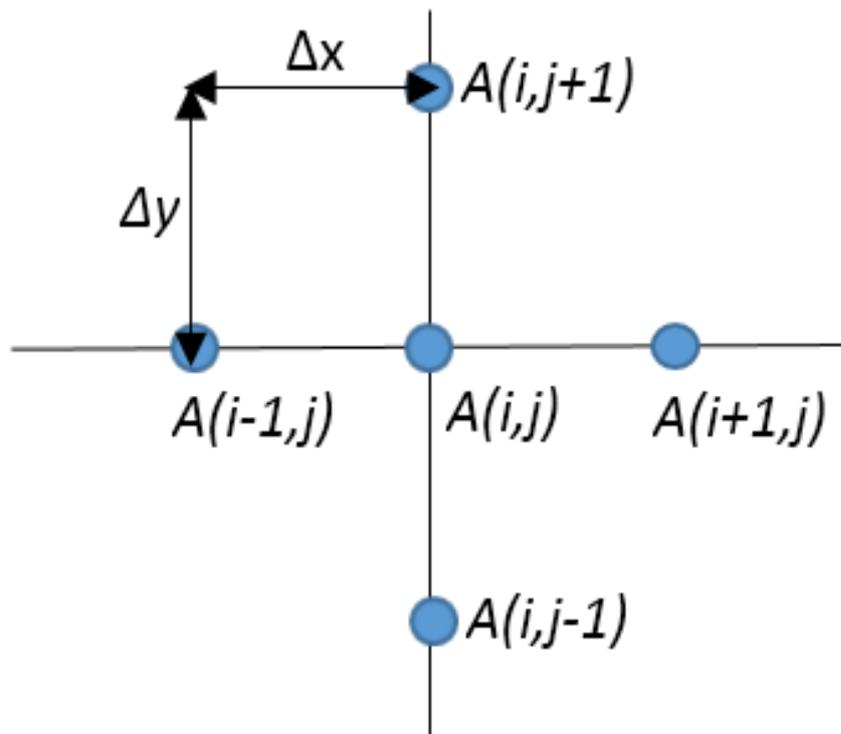


Figure III.3 : illustration de la méthode de différence finies simple.

Chapitre III : Méthode des différences finis

La méthode des différences finies basée sur le calcul de la dérivée dans un point (nœud)

On a les formules de dérivée suivantes :

1^{ière} dérivée

$$\frac{dA}{dx} \Big|_{(i,j)} = \frac{A(i+1,j) - A(i-1,j)}{2 \Delta x} \quad ; \quad \frac{dA}{dy} \Big|_{(i,j)} = \frac{A(i,j+1) - A(i,j-1)}{2 \Delta y}$$

2^{ème} dérivée

$$\frac{d^2 A}{dx^2} \Big|_{(i,j)} = \frac{A(i+1,j) - 2A(i,j) + A(i-1,j)}{\Delta x^2}$$

$$\frac{d^2 A}{dy^2} \Big|_{(i,j)} = \frac{A(i,j+1) - 2A(i,j) + A(i,j-1)}{\Delta y^2}$$

On veut appliquer cette méthode pour résoudre cette équation

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \dots (11)$$

Si on suppose que $\mu = cte$ (fausse hypothèse dans notre travail)

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu J \dots \dots \dots (12)$$

$$\frac{A(i+1,j) - 2A(i,j) + A(i-1,j)}{\Delta x^2} + \frac{A(i,j+1) - 2A(i,j) + A(i,j-1)}{\Delta y^2} = -\mu(i,j) J(i,j)$$

$$A(i,j) = \frac{1}{2 \Delta x^2 + 2 \Delta y^2} \times [\Delta y^2 A(i+1,j) + \dots$$

$$\Delta y^2 A(i-1,j) + \dots$$

$$\Delta x^2 A(i,j+1) + \dots$$

$$\Delta x^2 A(i,j-1) + \dots$$

$$\mu(i,j) J(i,j) \Delta x^2 \Delta y^2] \dots (13)$$

Finalement on obtient un algorithme de calcul

On peut programmer cet algorithme sous Matlab pour calculer A, puis à partir des valeurs de A on calcule B tel que :

$$\frac{\partial A}{\partial y} \vec{i} - \frac{\partial A}{\partial x} \vec{j} = \vec{B} \dots (10)$$

$\frac{A(i, j + 1) - A(i, j - 1)}{2 \Delta y} - \frac{A(i + 1, j) - A(i - 1, j)}{2 \Delta x} = B(i, j)$

III.2.2. Différences finies améliorée :

Dans cette méthode on ne suppose jamais que la perméabilité μ est constante, donc on a l'équation 11:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \dots (11)$$

$$\frac{\frac{1}{\mu(i+1,j)} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{(i+1,j)} - \frac{1}{\mu(i-1,j)} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{(i-1,j)}}{2 \Delta x} + \frac{\frac{1}{\mu(i,j+1)} \frac{\partial A}{\partial y} \Big|_{(i,j+1)} - \frac{1}{\mu(i,j-1)} \frac{\partial A}{\partial y} \Big|_{(i,j-1)}}{2 \Delta y} = -J(i, j)$$

$$\frac{\frac{1}{\mu(i+1,j)} \left[\frac{A(i+2,j) - A(i,j)}{2 \Delta x} \right] - \frac{1}{\mu(i-1,j)} \left[\frac{A(i,j) - A(i-2,j)}{2 \Delta x} \right]}{2 \Delta x} + \frac{\frac{1}{\mu(i,j+1)} \left[\frac{A(i,j+2) - A(i,j)}{2 \Delta y} \right] - \frac{1}{\mu(i,j-1)} \left[\frac{A(i,j) - A(i,j-2)}{2 \Delta y} \right]}{2 \Delta y} = -J(i, j)$$

On remarque que le calcul de A dépend des indices i+2, i-2, j+2 et j-2, donc cette équation n'est pas pratique à résoudre.

Donc on améliore la méthode de différences finies et on la rend ressembler à la méthode des volumes finis.

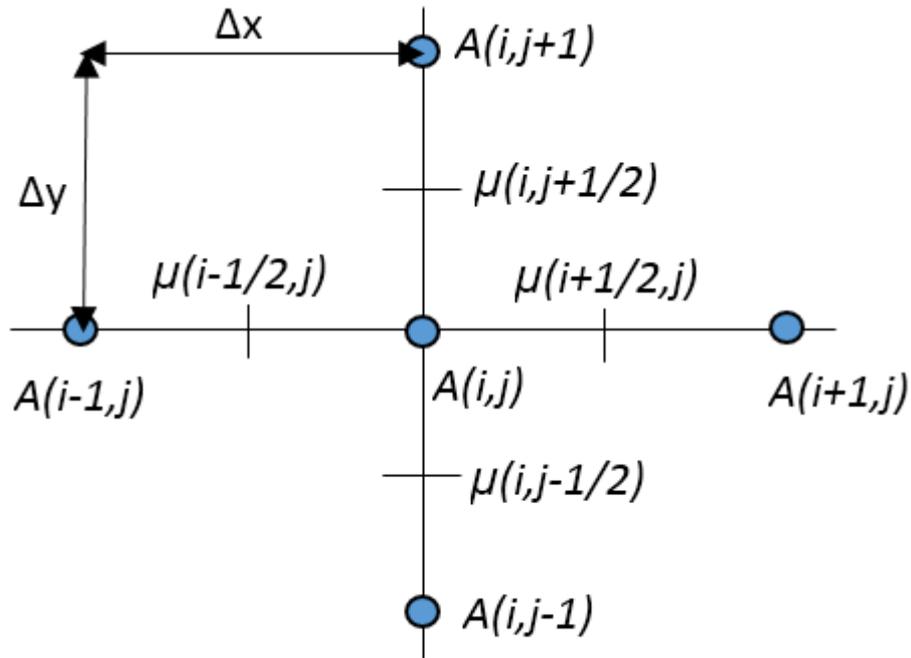


Figure III.4 : illustration de la méthode de différence finie améliorée.

$$\frac{1}{\mu(i+1/2,j)} \left[\frac{A(i+1,j) - A(i,j)}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\mu(i-1/2,j)} \left[\frac{A(i,j) - A(i-1,j)}{\Delta x} \right]$$

$$+ \frac{1}{\mu(i,j+1/2)} \left[\frac{A(i,j+1) - A(i,j)}{\Delta y} \right] - \frac{1}{\mu(i,j-1/2)} \left[\frac{A(i,j) - A(i,j-1)}{\Delta y} \right]$$

$$= -J(i,j)$$

$$\frac{1}{\mu(i+\frac{1}{2},j)} [A(i+1,j) - A(i,j)] - \frac{1}{\mu(i-\frac{1}{2},j)} [A(i,j) - A(i-1,j)]$$

$$+ \frac{1}{\mu(i,j+\frac{1}{2})} [A(i,j+1) - A(i,j)] - \frac{1}{\mu(i,j-\frac{1}{2})} [A(i,j) - A(i,j-1)] = -J(i,j)$$

$$\frac{\Delta y^2}{\mu(i+\frac{1}{2},j)} [A(i+1,j) - A(i,j)] - \frac{\Delta y^2}{\mu(i-\frac{1}{2},j)} [A(i,j) - A(i-1,j)]$$

$$+ \frac{\Delta x^2}{\mu(i,j+\frac{1}{2})} [A(i,j+1) - A(i,j)] - \frac{\Delta x^2}{\mu(i,j-\frac{1}{2})} [A(i,j) - A(i,j-1)]$$

$$= -J(i,j) \Delta x^2 \Delta y^2$$

$$\left[\frac{\Delta y^2}{\mu\left(i+\frac{1}{2},j\right)} + \frac{\Delta y^2}{\mu\left(i-\frac{1}{2},j\right)} + \frac{\Delta x^2}{\mu\left(i,j+\frac{1}{2}\right)} + \frac{\Delta x^2}{\mu\left(i,j-\frac{1}{2}\right)} \right] A(i,j) = \frac{\Delta y^2}{\mu\left(i+\frac{1}{2},j\right)} A(i+1,j) + \frac{\Delta y^2}{\mu\left(i-\frac{1}{2},j\right)} A(i-1,j) + \frac{\Delta x^2}{\mu\left(i,j+\frac{1}{2}\right)} A(i,j+1) + \frac{\Delta x^2}{\mu\left(i,j-\frac{1}{2}\right)} A(i,j-1) + J(i,j) \Delta x^2 \Delta y^2$$

$$\left[\frac{\Delta y^2}{\mu_e(i,j)} + \frac{\Delta y^2}{\mu_w(i-1,j)} + \frac{\Delta x^2}{\mu_n(i,j)} + \frac{\Delta x^2}{\mu_s(i,j+1)} \right] A(i,j) = \frac{\Delta y^2}{\mu_e(i,j)} A(i+1,j) + \dots + \frac{\Delta y^2}{\mu_w(i-1,j)} A(i-1,j) + \dots + \frac{\Delta x^2}{\mu_n(i,j)} A(i,j+1) + \dots + \frac{\Delta x^2}{\mu_s(i,j-1)} A(i,j-1) + \dots + J(i,j) \Delta x^2 \Delta y^2$$

$$[a_e + a_w + a_n + a_s]A(i,j) = a_e A(i+1,j) + a_w A(i-1,j) + a_n A(i,j+1) + a_s A(i,j-1) + s_p$$

$$a_p A(i,j) = a_e A(i+1,j) + a_w A(i-1,j) + a_n A(i,j+1) + a_s A(i,j-1) + s_p$$

Finalement on obtient l'algorithme de calcul

$$A(i,j) = \frac{1}{a_p} [a_e A(i+1,j) + a_w A(i-1,j) + a_n A(i,j+1) + a_s A(i,j-1) + s_p] \dots (14)$$

$$\text{Tels que: } a_e = \frac{\Delta y^2}{\mu_e(i,j)} ; a_w = \frac{\Delta y^2}{\mu_w(i-1,j)} ; a_n = \frac{\Delta x^2}{\mu_n(i,j)} ; a_s = \frac{\Delta x^2}{\mu_s(i,j-1)} ;$$

$$s_p = J(i,j) \Delta x^2 \Delta y^2$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s$$

A partir des valeurs de A on calcule B tel que:

$$\frac{\partial A}{\partial y} \vec{i} - \frac{\partial A}{\partial x} \vec{j} = \vec{B} \dots (10)$$

$$B(i, j) = \frac{A(i, j + 1) - A(i, j - 1)}{2 \Delta y} - \frac{A(i + 1, j) - A(i - 1, j)}{2 \Delta x}$$

III.3. CONCLUSION

Les méthodes de résolutions des équations électromagnétiques ont été présentées au cours de ce chapitre. La méthode des différences finies améliorée ayant été retenue pour notre travail, elle a été vue dans le détail. Dans ce chapitre nous avons implanté ces formulations dans un code de calcul développé sous Matlab.

IV .1. INTRODUCTION

Nous présentons dans tous ce qui suit la validation et l'application de notre modèle présenté au chapitre précédent.

L'objectif de cette section est d'évaluer le modèle de calcul de champ magnétique pour les système de détection basé sur les équations de Maxwell.

Un code de calcul différece finies améliorée a été élaboré sous l'environnement Matlab.

IV .2. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES DU SYSTEME

Notre application est constituée par deux bobines inductrices et un corps ferromagnétique. Ces bobines ont une largeur $L=10$ cm et un hauteur $H=40$ cm et elle est parcourue par une densité de courant $J= 10^6 A/m^2$. Dans cette application, nous avons deux cas le premier cas le corps ferromagnétique a une largeur $L=10$ cm et un hauteur $H =10$ cm, et dans le deuxieme cas le corps ferromagnétique a une largeur $L=1$ cm et un hauteur $H=10$ cm, la perméabilité magnétique du vide est $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [H/m]$. et la Perméabilité magnétique $\mu = \mu_0 \mu_r [H/m]$, μ_r : Perméabilité magnétique relative du corps ferromagnétique .

IV .2.1. La géométrie de premier cas :

La figure IV.1 représente la géométre de dispositif étudié :

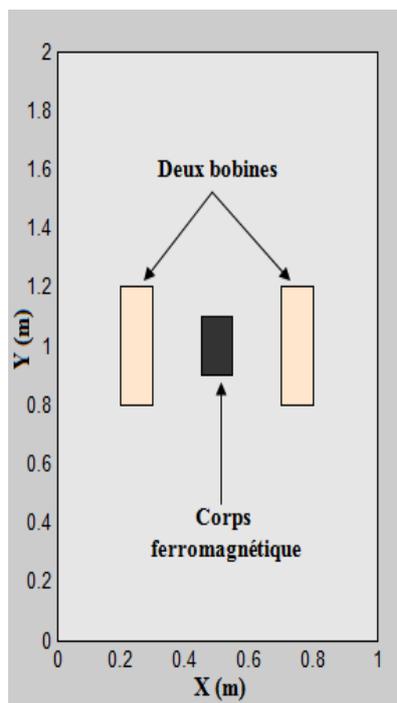


Figure IV.1 : Dimensions géométriques du système

IV. 2.2. Le Maillage utilisé et les conditions aux limites

Dans la figure IV.2 nous avons représenté le maillage utilisé et les conditions aux limites de domaine d'étude par les méthodes des différences finies améliorées.

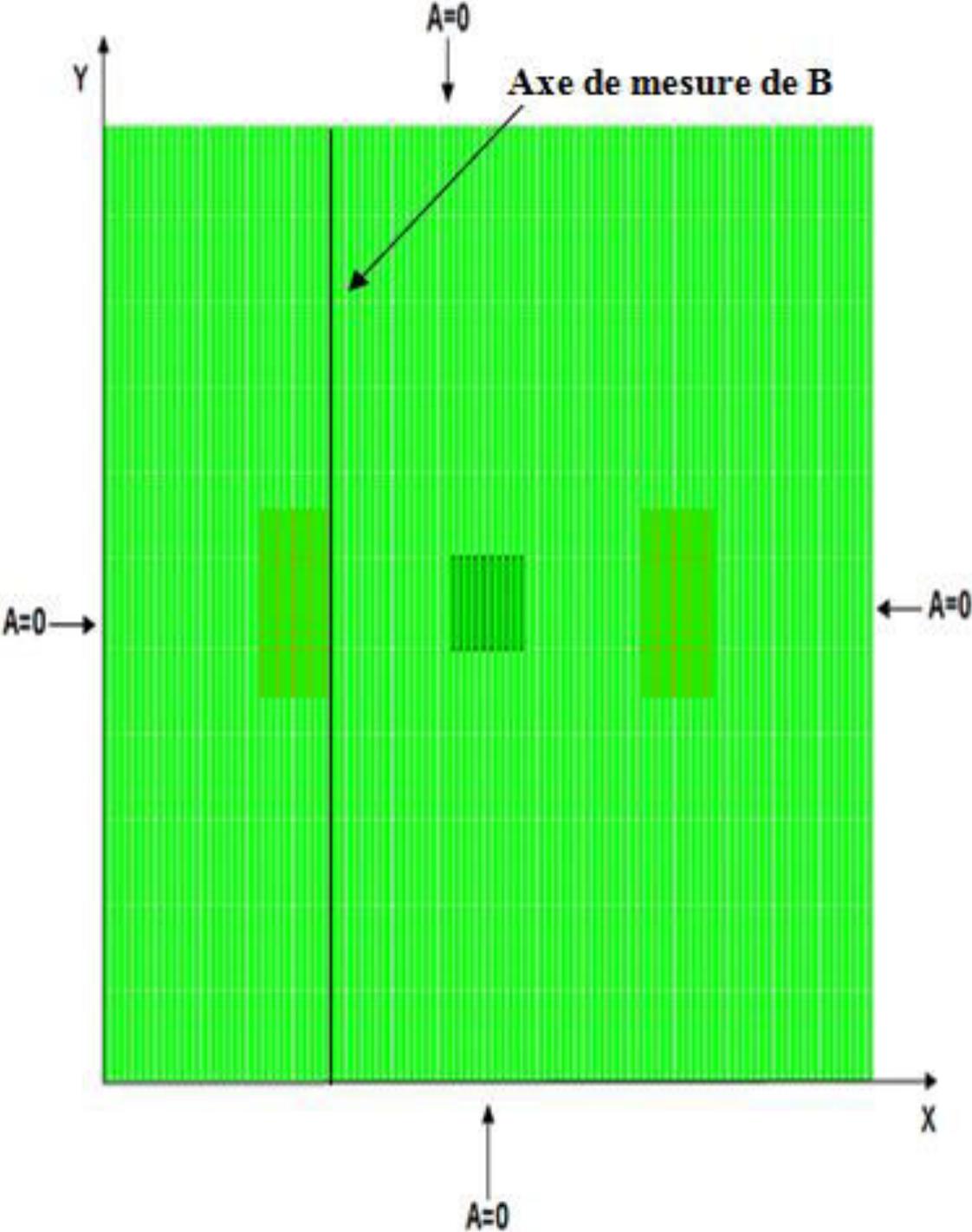


Figure IV.2 : Maillage du domaine et condition aux limites

La figure IV.3 représente le maillage utilisé dans le corps ferromagnétique.

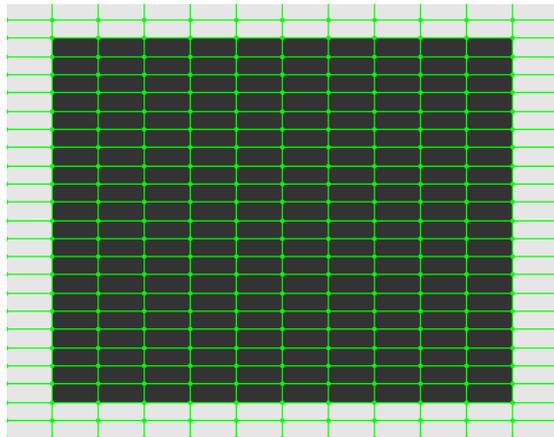


Figure IV.3 : Maillage du corps ferromagnétique (zoom)

IV.3. RESULTATS ET INTERPRETATION

La figure IV.4 représente la répartition de l'amplitude du potentiel vecteur magnétique dans le plan (x, y).

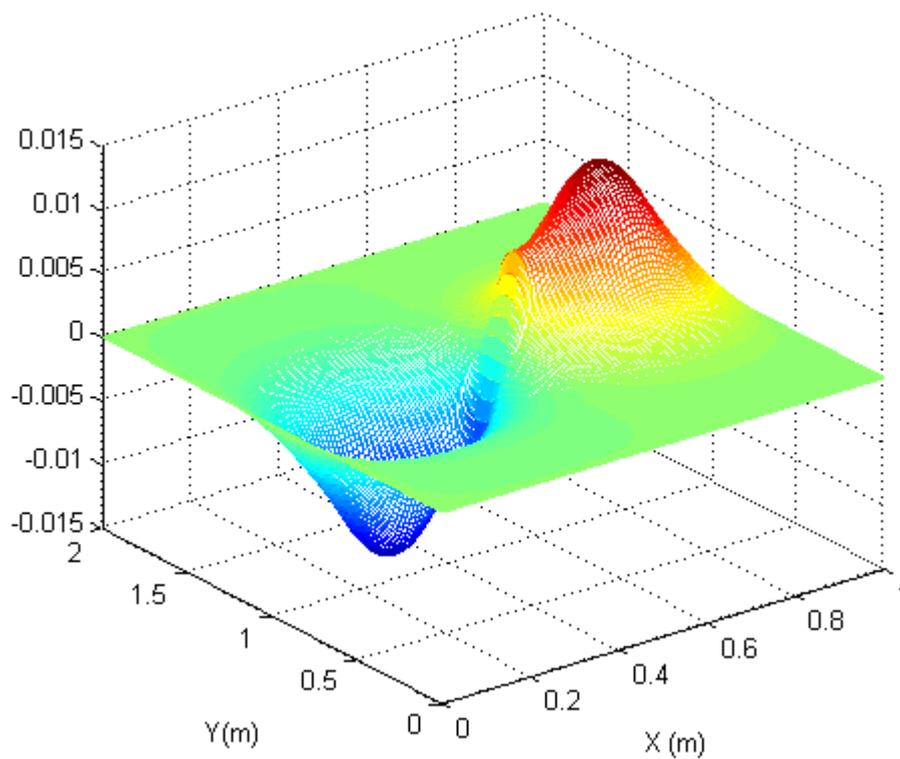


Figure IV.4 : Répartition du module du potentiel vecteur magnétique A dans le plan (x;y)

La figure IV.5 représenté les vecteurs de l'induction magnétique B dans le plan (x,y).

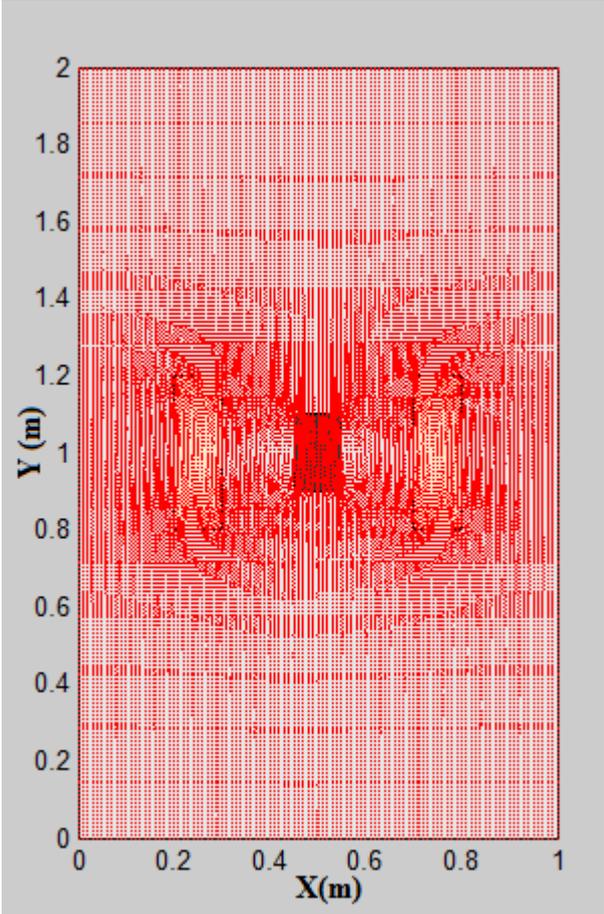


Figure IV.5 : vecteurs de l'induction magnétique B dans le plan (x,y).

La figure IV.6 représenté les vecteurs de l'induction magnétique B créer par la premier bobine.

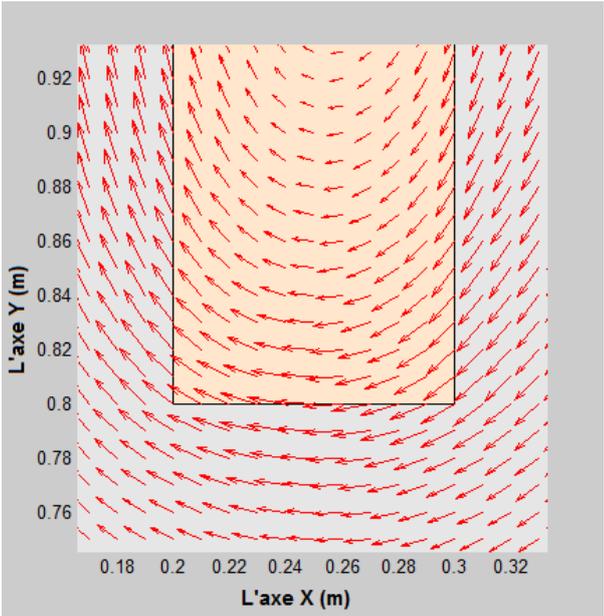


Figure IV.6 : vecteurs de l'induction magnétique B créer par la premier bobine

La figure IV.7 représente les vecteurs de l'induction magnétique B à l'intérieur de corps ferromagnétique.

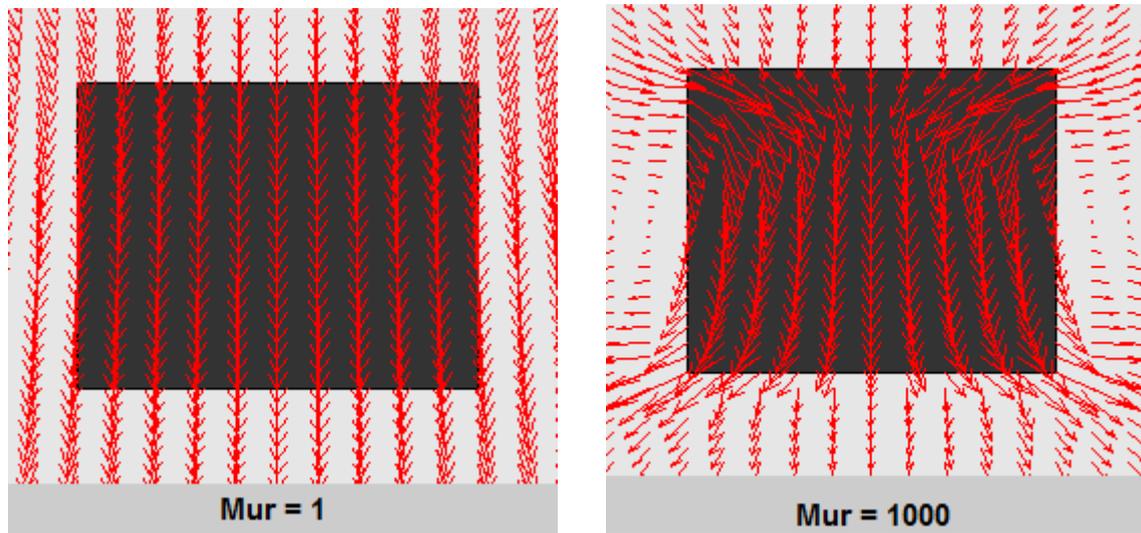


Figure IV.7 : vecteurs de l'induction magnétique B à l'intérieur de corps ferromagnétique

Mur : La perméabilité magnétique relative .

La figure IV.8 représente la valeur de l'induction magnétique B au niveau de la surface interne de l'inducteur gauche pour les différent valeurs de perméabilité magnétique relative du corps ferromagnétique .

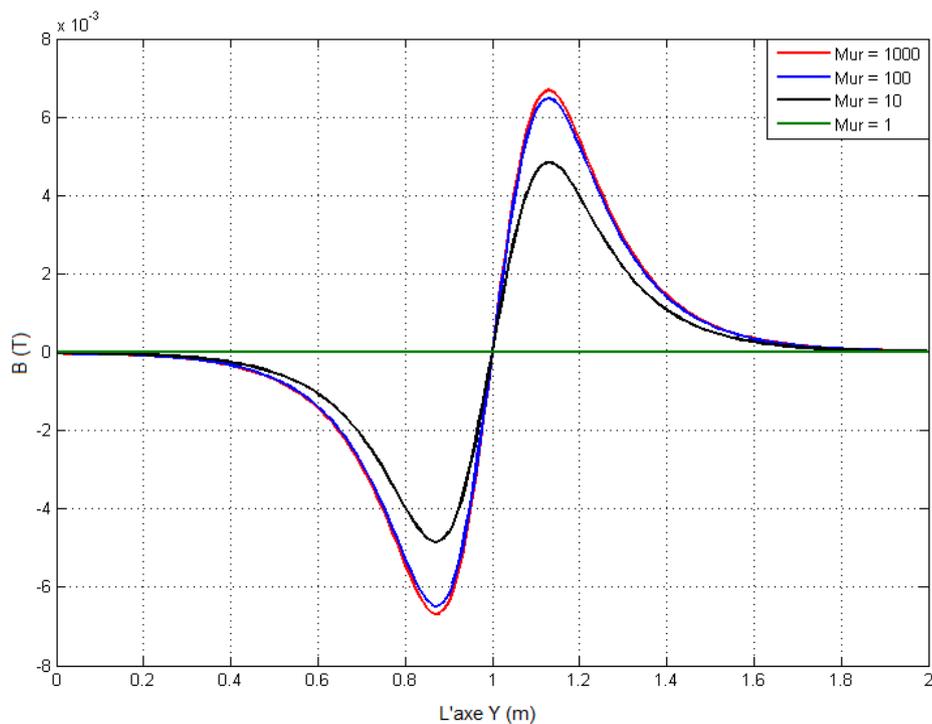


Figure IV.8 : La valeur de B pour les différent valeur de Mur

Chapitre IV : Application d'un système de détection de matériaux magnétique

Les tableaux IV.1 , IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5 , IV.6, IV.7 représentent les valeurs de l'induction magnétique B par rapport aux valeurs de la perméabilité magnétique relative μ_r sur une valeur donné du décalage vertical entre le centre des deux bobines et l'enplacement du corps ferromagnétique

d : décalage du corps ferromagnétique en cm par rapport au centre de la bobine.

Mur : la perméabilité magnétique relative.

Pour: $J_0 = 1e^6$; d = 0 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	4.84	5.66	5.98	6.15	6.25	6.33	6.38	6.42	6.45
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
6.476	6.49	6.51	6.52	6.54	6.55	6.55	6.56	6.57	6.58	6.58

Tab IV.1 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 0 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = 10 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	4.42	5.18	5.47	5.62	5.72	5.78	5.83	5.87	5.89
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
5.921	5.94	5.95	5.96	5.98	5.99	5.99	6.00	6.01	6.01	6.02

Tab IV.2 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 10 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = 20 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	3.36	3.93	4.15	4.26	4.34	4.39	4.42	4.45	4.47
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
4.491	4.50	4.51	4.52	4.53	4.54	4.54	4.55	4.56	4.56	4.56

Tab IV.3 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 20 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = 30 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	2.12	2.48	2.61	2.69	2.73	2.76	2.78	2.80	2.81
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
2.829	2.83	2.84	2.85	2.85	2.86	2.86	2.86	2.87	2.87	2.87

Tab IV.4 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 30 cm

Pour: $J_0 = 1e^6$; $d = -10$ cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	4.44	5.19	5.49	5.64	5.74	5.80	5.85	5.89	5.91
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
5.941	5.96	5.97	5.98	6.00	6.01	6.01	6.02	6.03	6.03	6.04

Tab IV.5 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour $d = -10$ cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; $d = -20$ cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	3.39	3.96	4.18	4.30	4.37	4.42	4.46	4.48	4.50
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
4.525	4.53	4.55	4.56	4.56	4.57	4.58	4.58	4.59	4.59	4.60

Tab IV.6 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour $d = -20$ cm

Pour: $J_0 = 1e^6$; $d = -30$ cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻³	0	2.15	2.50	2.64	2.71	2.76	2.79	2.81	2.83	2.84
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
2.856	2.86	2.87	2.87	2.88	2.88	2.89	2.89	2.89	2.90	2.90

Tab IV.7 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour $d = -30$ cm

Ces tableaux permettent de tracer les figures IV.9 et IV.10 .

Les figures IV.9 et IV.10 représentent la variation de l'induction magnétique B par rapport à la perméabilité magnétique relative μ_r tout on fait varier le décalage entre les bobines et le corps ferromagnétique . On remarque que la valeur de B augmente à chaque fois que la valeur de la perméabilité magnétique relative μ_r augmente .On remarque également que lors qu'on éloigne le corps ferromagnétique par rapport aux centre des bobines l'induction magnétique va diminuer .

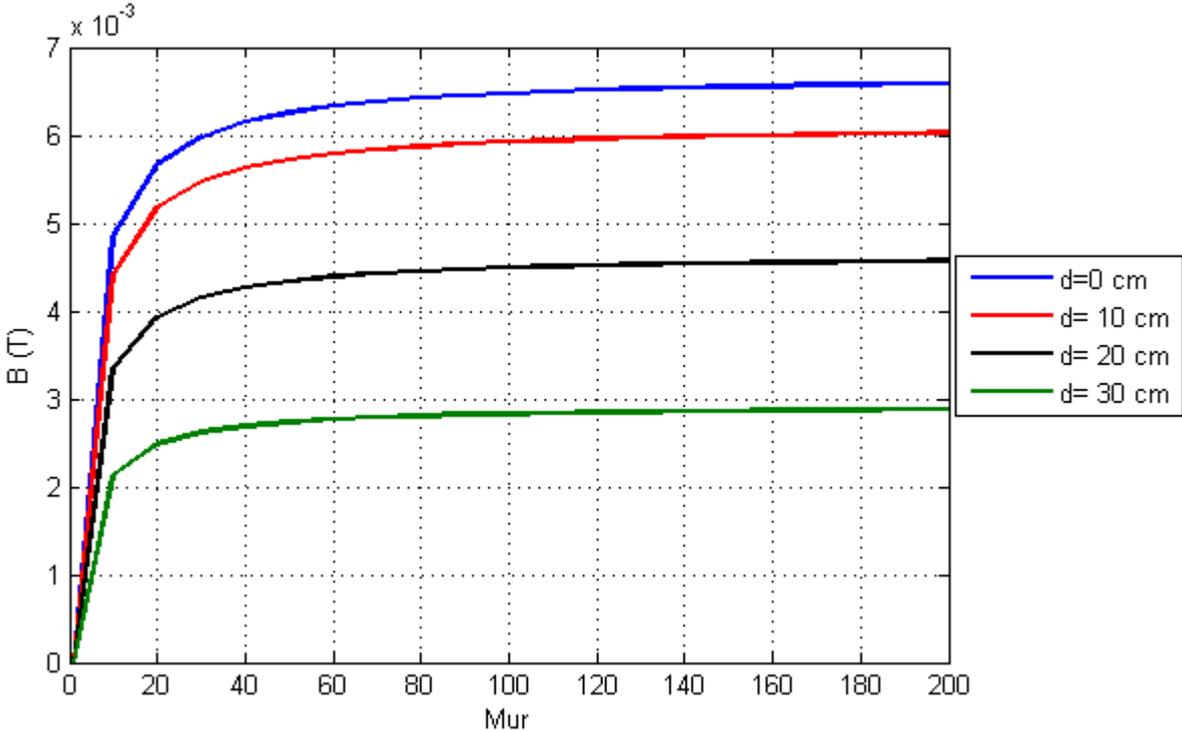


Figure IV.9 : La variation de l'induction magnétique B par rapport Mur

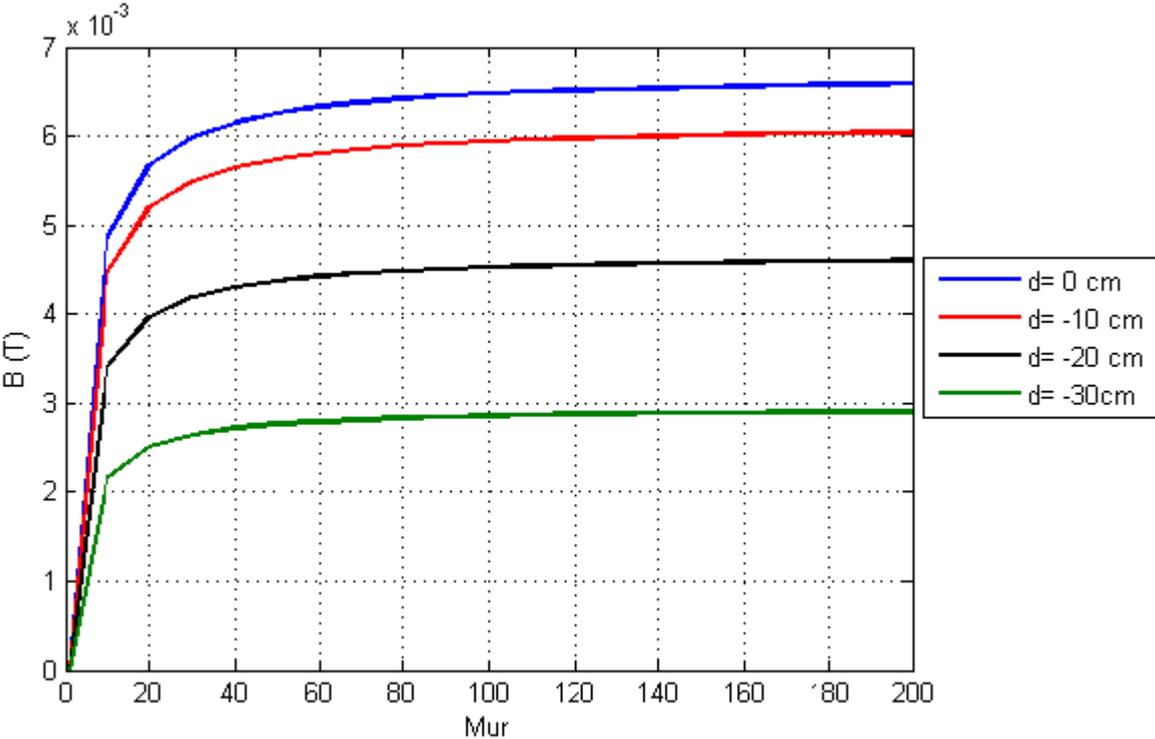


Figure IV.10 : variation de l'induction magnétique B par rapport Mur

Les figures IV.10 et IV.11 représentent la valeur maximale et la valeur minimale de l'induction magnétique B par rapport à l'axe Y. Ces valeurs nous permettent de connaître la position du corps ferromagnétique.

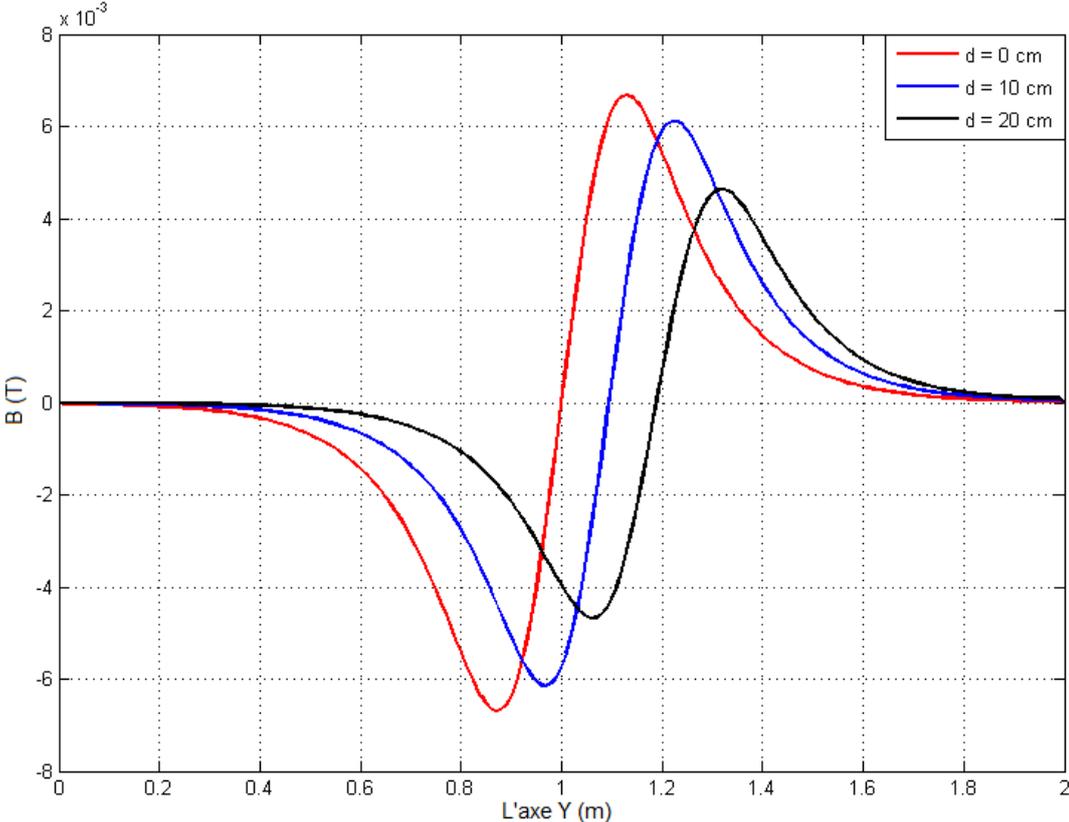


Figure IV.11: La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différentes valeurs de d

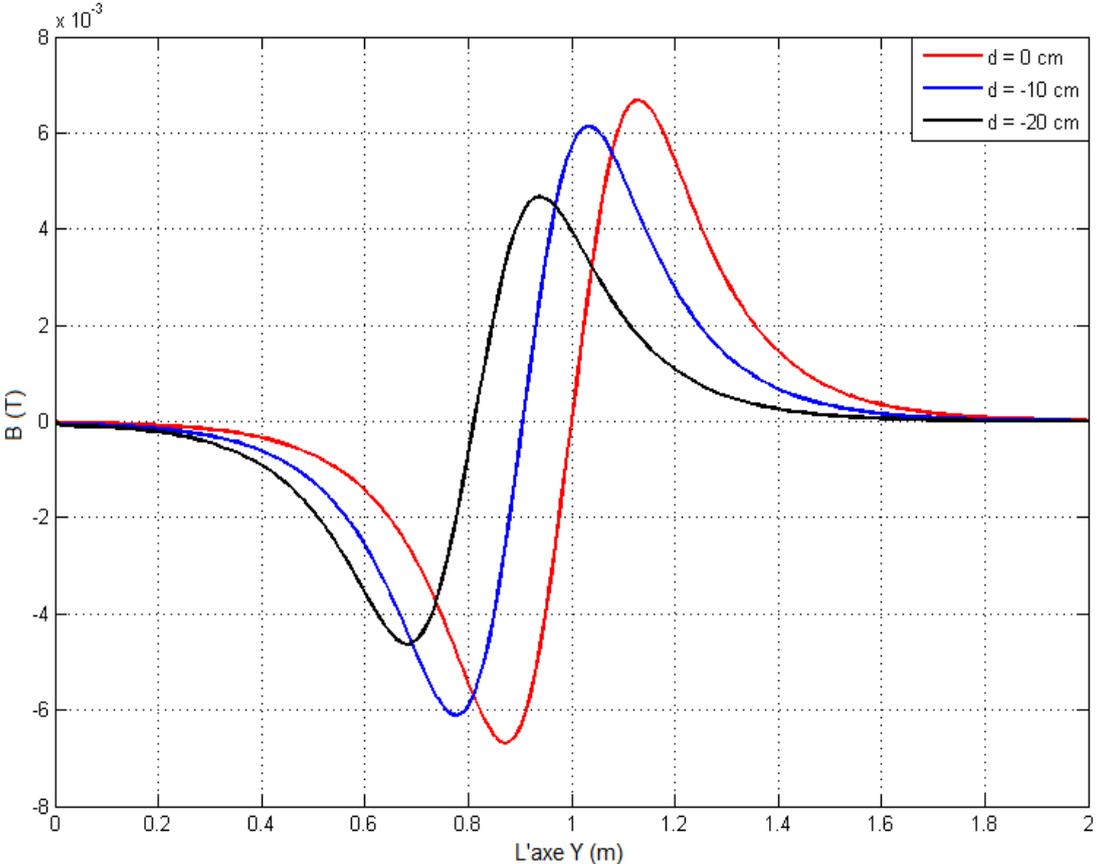


Figure IV.12: La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différentes valeurs de d

Dans le cas où il n'y a pas de corps ferromagnétique à l'intérieur, l'induction appliquée par les deux bobines à une valeur définie. Quand on introduit le corps ferromagnétique comme il est illustré dans la figure IV.1, l'induction magnétique B augmente. La détection de la position du corps magnétique se fait par la soustraction de ces deux valeurs.

La comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs localisées permet de détecter le corps magnétique : Nous avons représenté cette comparaison dans le tableau IV.8.

◆ Erreur relative

$$\epsilon_{r \max} = \left| \frac{Y_R - Y_L}{Y_R} \right| \cdot 100$$

$J_0 = 1e^6$, $\mu_r = 200$, $d = 0$ cm (pas de décalage).

		Réel	Localisé	$\epsilon_{r \max}$
d = 0 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	0.9	0.87	3.33%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1.1	1.13	2.72%
d = 10 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	1	0.96	4%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1.2	1.23	2.5%
d = 20 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	1.1	1.06	3.64%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1.3	1.32	1.54%
d = -10 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	0.8	0.78	2.5%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1	1.03	3%
d = -20 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	0.7	0.68	2.86%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	0.9	0.94	4.44%

Tab IV.8 : Les valeurs réelles et les valeurs localisées

Avec :

$\epsilon_{r\ max}$: Erreur relative maximale.

Y_R : La valeur réel de Y_{\min} .

Y_L : La valeur localisé de Y_{\min} .

D'après cette erreur, on peut dire que le code de calcul utilisé pour la résolution de l'équation du modèle magnéto-statique donne de bons résultats.

Nous avons changé la position du corps ferromagnétique horizontalement vers la première bobine comme il est illustré dans la figure IV.13 .

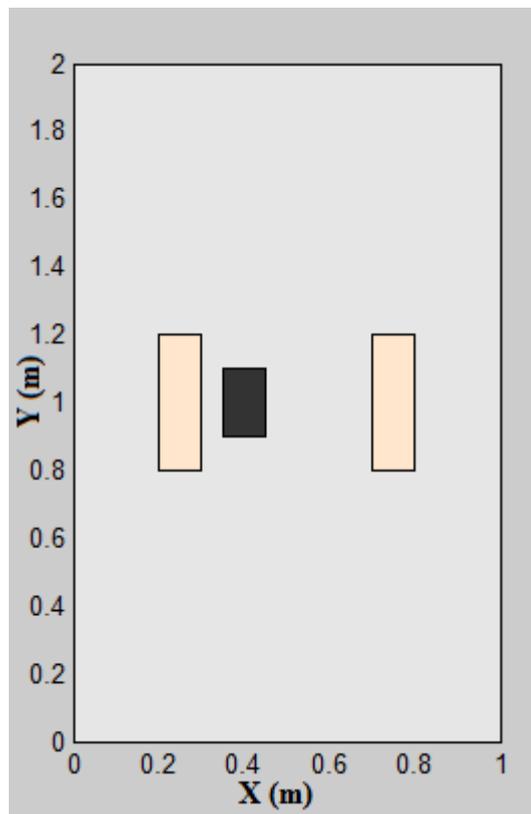


Figure IV.13 : Dimensions géométriques du système

Après avoir changé la position du corps ferromagnétique nous avons trouvé les résultats suivants comme il est illustré dans les figures IV.14 et IV.15

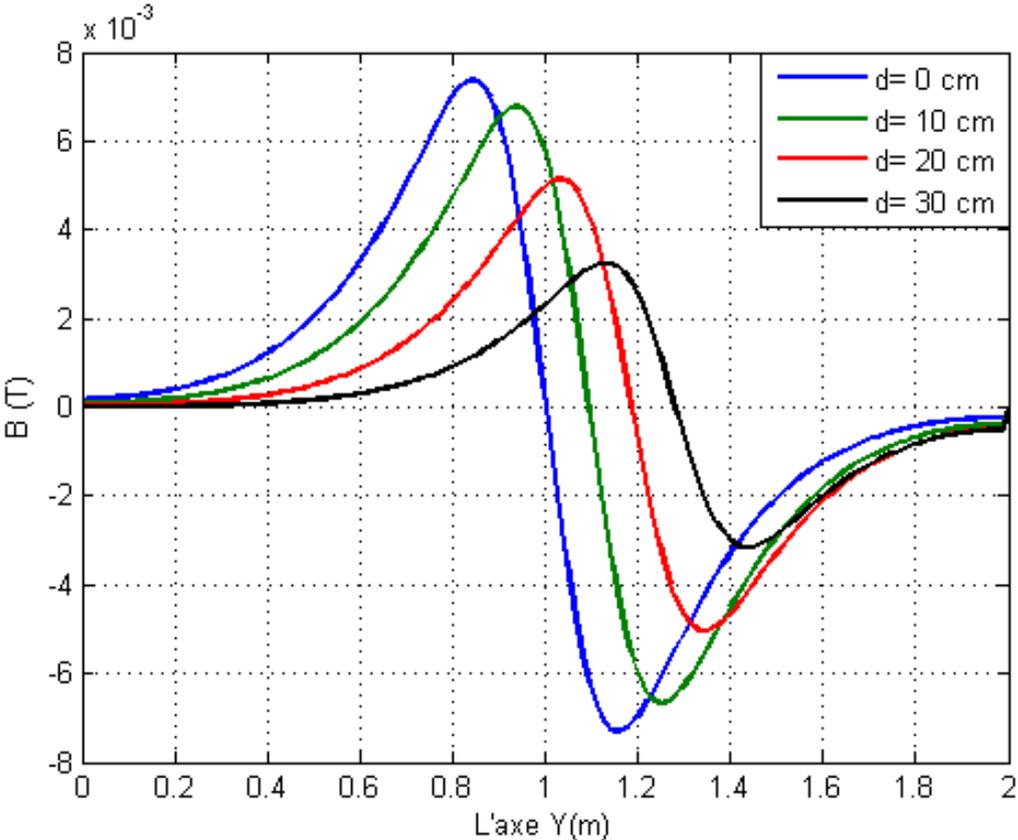


Figure IV.14 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d

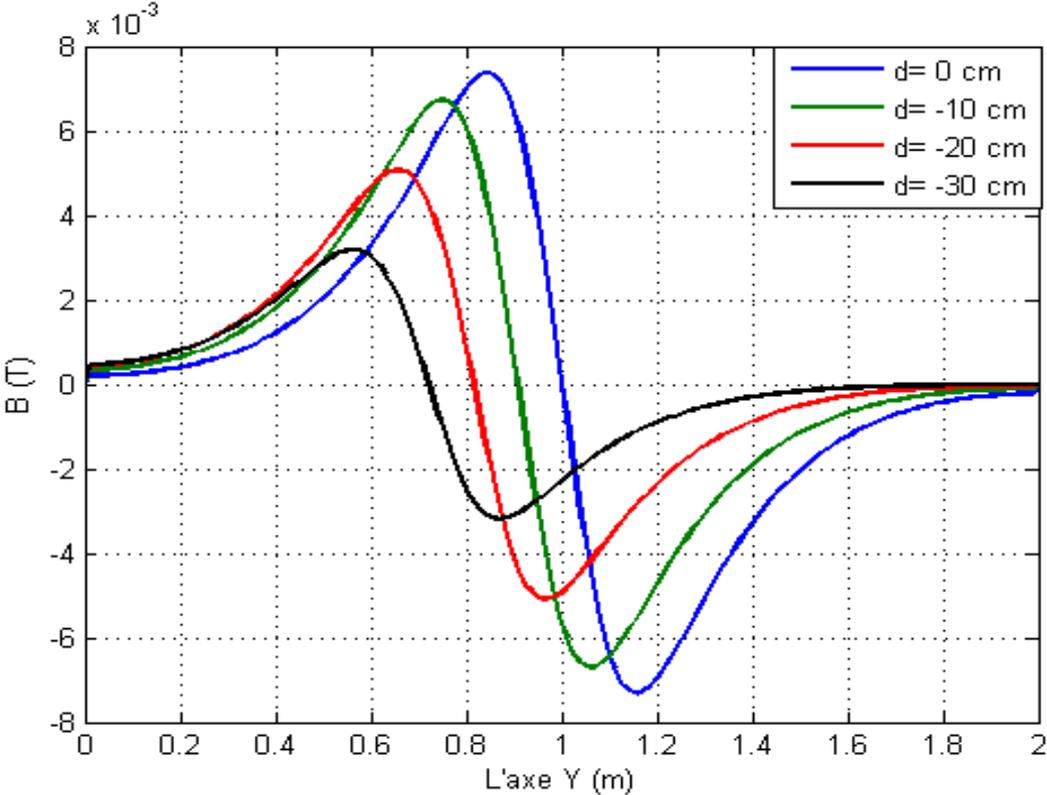


Figure IV.15 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d

Nous avons changé la position du corps ferromagnétique horizontalement vers la deuxième bobine comme il est illustré dans la figure IV.16 .

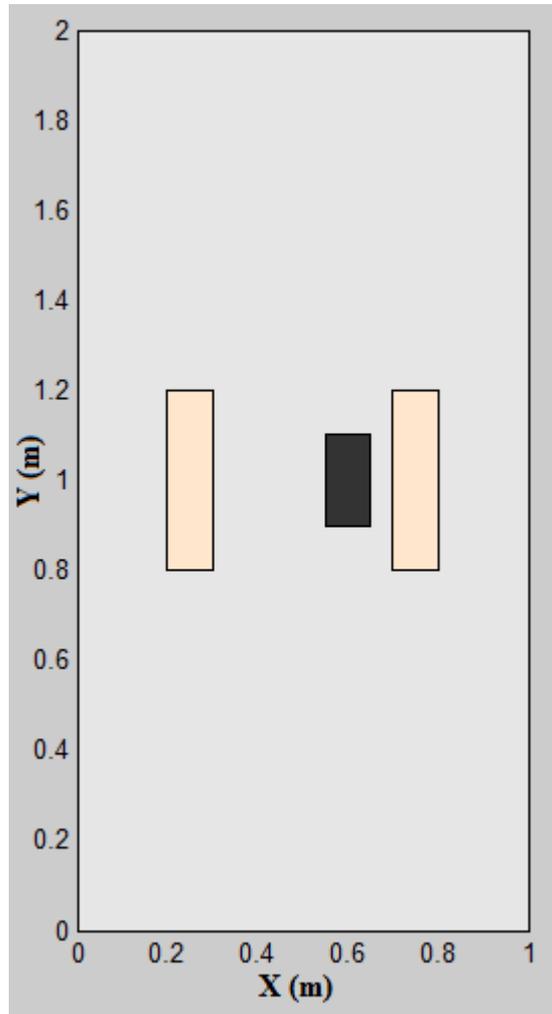


Figure IV.16 : Dimensions géométriques du système

Après avoir changé la position du corps ferromagnétique, nous avons trouvé les résultats suivants comme il est illustré dans les figures IV.17 et IV.18 :

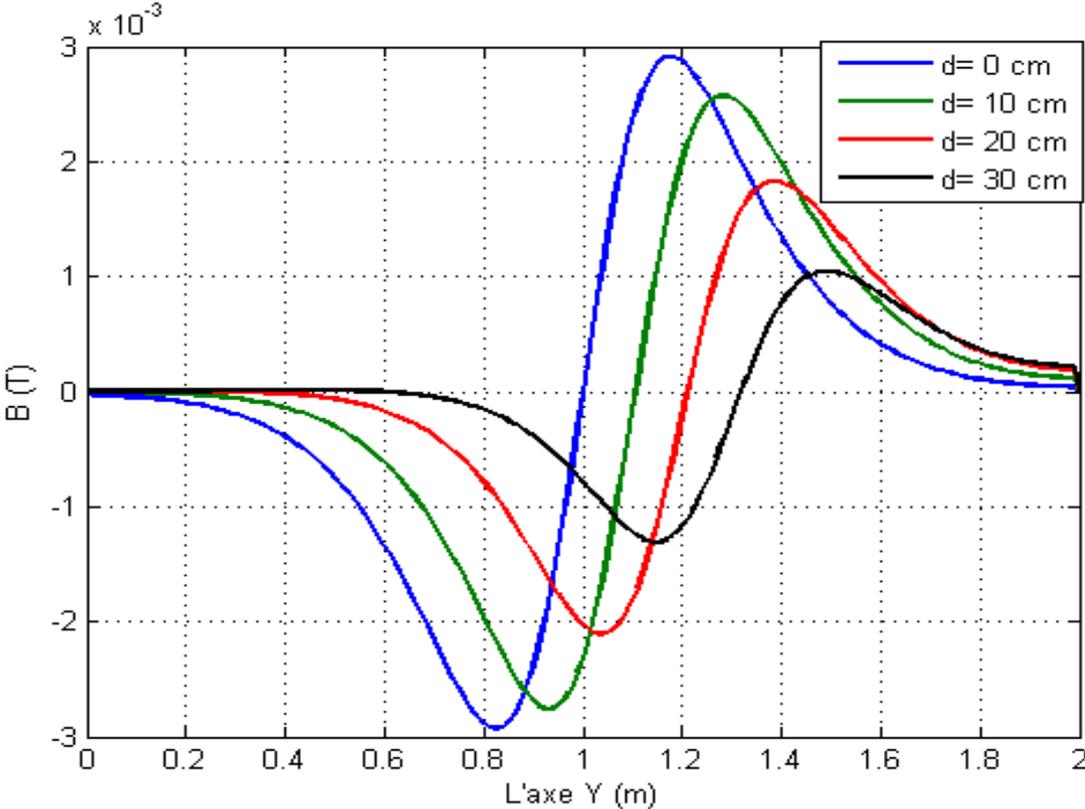


Figure IV.17 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d

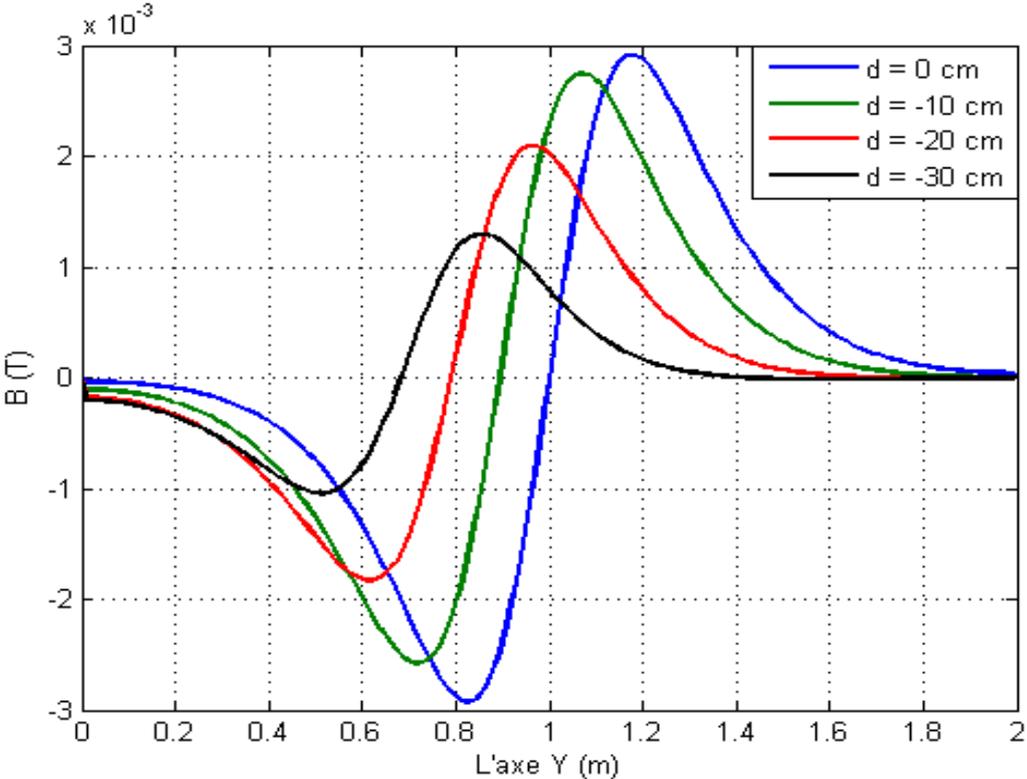


Figure IV.18 : La valeur de B par rapport à l'axe Y pour différente valeurs de d

On remarque que lorsque le corps ferromagnétique est près de la première bobine la valeur de B augmente. Et la détection de la position du corps ferromagnétique s'améliore. Mais quand lorsque le corps ferromagnétique s'éloigne de la première bobine la valeur de B est diminuée.

IV.4.1. LA GEOMETRIE DE DEUXIEME CAS :

La figure IV.19 représente la géométrie de dispositif étudié :

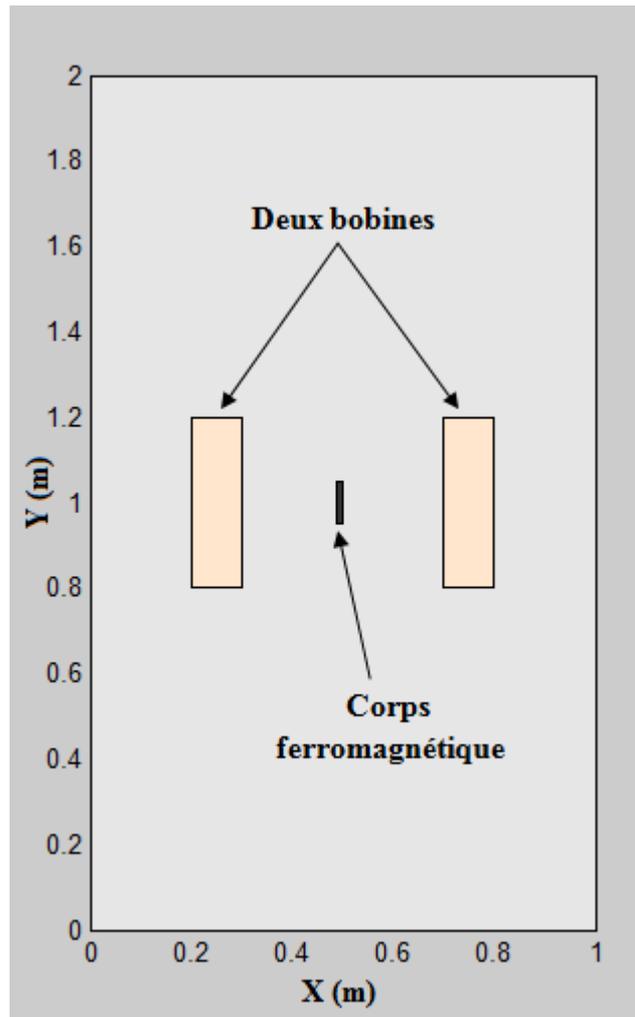


Figure IV.19 : Modèle géométrique à étudier.

IV.4.2. Le Maillage

Les figures IV.20 et IV.21 représentent respectivement le maillage de la première bobine et le corps ferromagnétique :

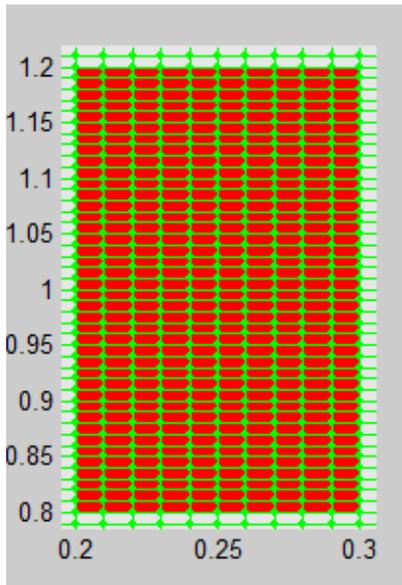


Figure IV.20: Maillage du la premier bobine

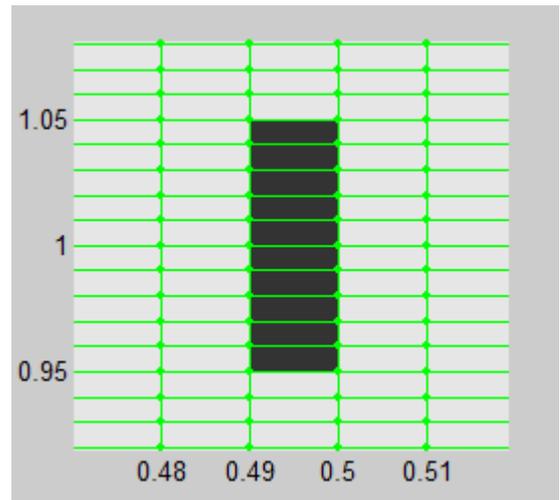


Figure IV.21: Maillage du corps ferromagnétique

La figure IV.22 représente les vecteurs de l'induction magnétique B à l'intérieur de corps ferromagnétique.

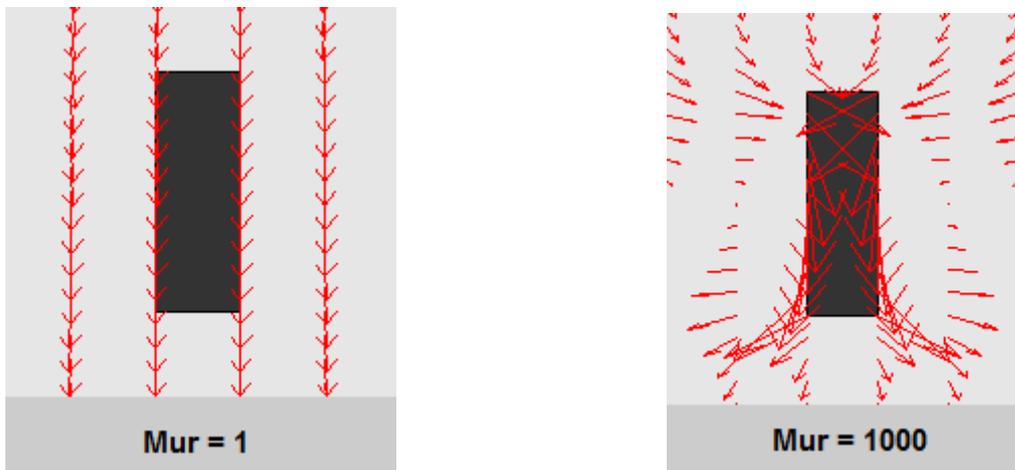


Figure IV.22 : vecteurs de l'induction magnétique B à l'intérieur de corps ferromagnétique

Les tableaux IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12 , IV.13, IV.14, IV.15 représentent les valeurs de l'induction magnétique B par rapport aux valeurs de la perméabilité magnétique relative μ_r sur une valeur donné du décalage vertical entre le centre des deux bobines et l'enplacement du corps ferromagnétique

Pour : $J_0 = 1e^6$; $d = 0$ cm

Chapitre IV : Application d'un système de détection de matériaux magnétique

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	5.924	8.421	9.705	10.49	11.01	11.39	11.68	11.90	12.08
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
12.23	12.35	12.46	12.55	12.62	12.69	12.75	12.81	12.85	12.90	12.94

Tab IV.9 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 0 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = 10 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	5.434	7.721	8.897	9.614	10.10	10.44	10.71	10.91	11.08
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
11.21	11.32	11.42	11.50	11.57	11.63	11.69	11.74	11.78	11.82	11.86

Tab IV.10 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 10 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = 20 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	4.120	5.851	6.740	7.282	7.648	7.910	8.108	8.263	8.387
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
8.489	8.574	8.646	8.708	8.762	8.809	8.851	8.888	8.921	8.951	8.978

Tab IV.11 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 20 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = 30 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	2.600	3.688	4.246	4.586	4.816	4.980	5.105	5.202	5.280
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
5.344	5.397	5.442	5.481	5.515	5.544	5.570	5.593	5.614	5.633	5.650

Tab IV.12 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = 30 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = -10 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	5.420	7.706	8.882	9.599	10.08	10.43	10.69	10.90	11.06
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
11.19	11.31	11.40	11.48	11.56	11.62	11.67	11.72	11.76	11.80	11.84

Tab IV.13 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = -10 cm

Pour : $J_0 = 1e^6$; d = -20 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	4.097	5.826	6.715	7.257	7.622	7.884	8.082	8.237	8.361
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
8.463	8.548	8.620	8.681	8.735	8.782	8.824	8.861	8.894	8.924	8.951

Tab IV.14 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = -20 cm

Pour : J0 = 1e⁶ ; d = -30 cm

Mur	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
B[T]*10 ⁻⁴	0	2.569	3.653	4.209	4.549	4.777	4.941	5.065	5.162	5.240
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
5.303	5.357	5.402	5.440	5.474	5.503	5.529	5.552	5.573	5.592	5.609

Tab IV.15 : les valeurs de B par rapport aux valeurs de μ_r pour d = -30 cm

Ces tableaux permet de tracer les figures IV.9 et IV.10 .

Les figures IV.23 et IV.24 représentent la variation de l'induction magnétique B par rapport à la perméabilité magnétique relative μ_r tout on feson varie le décalage entre les bobines et le corps ferromagnétique. On remarque que la valeur de B augmente à chaque fois que la valeur de la perméabilité magnétique relative μ_r augmente .On remarque également que lors qu'on éloigne le corps ferromagnétique par rapport aux centre des bobines .

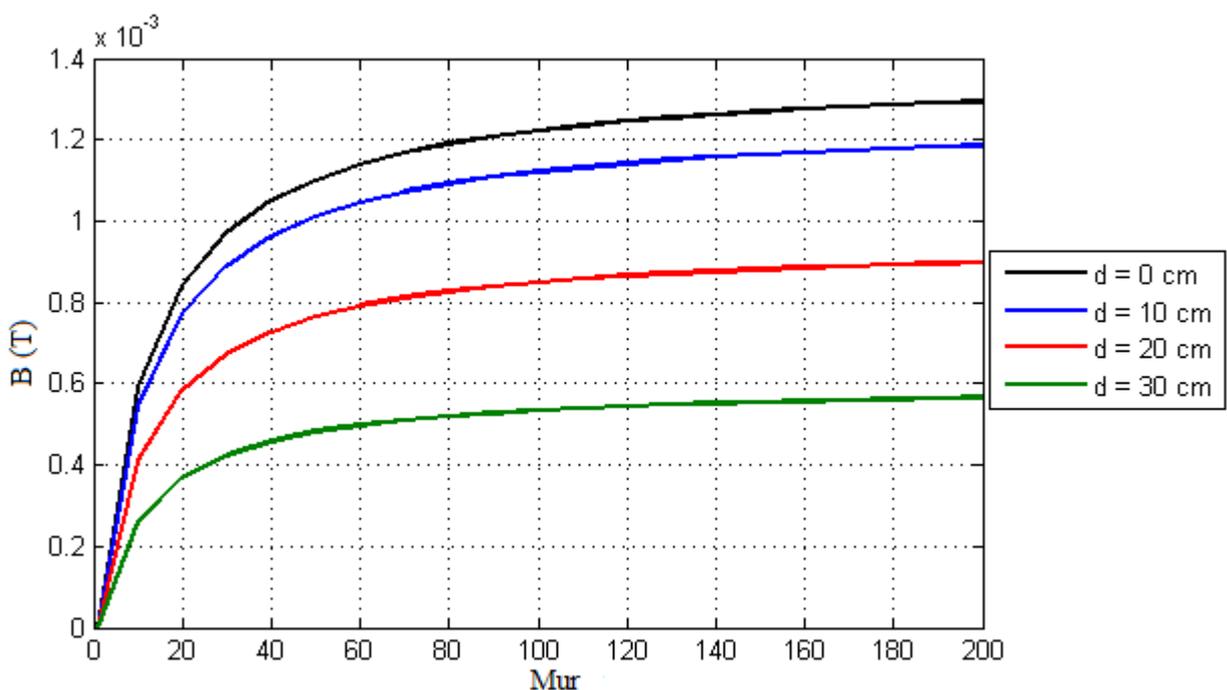


Figure IV.23 : variation de l'induction magnétique B par rapport Mur

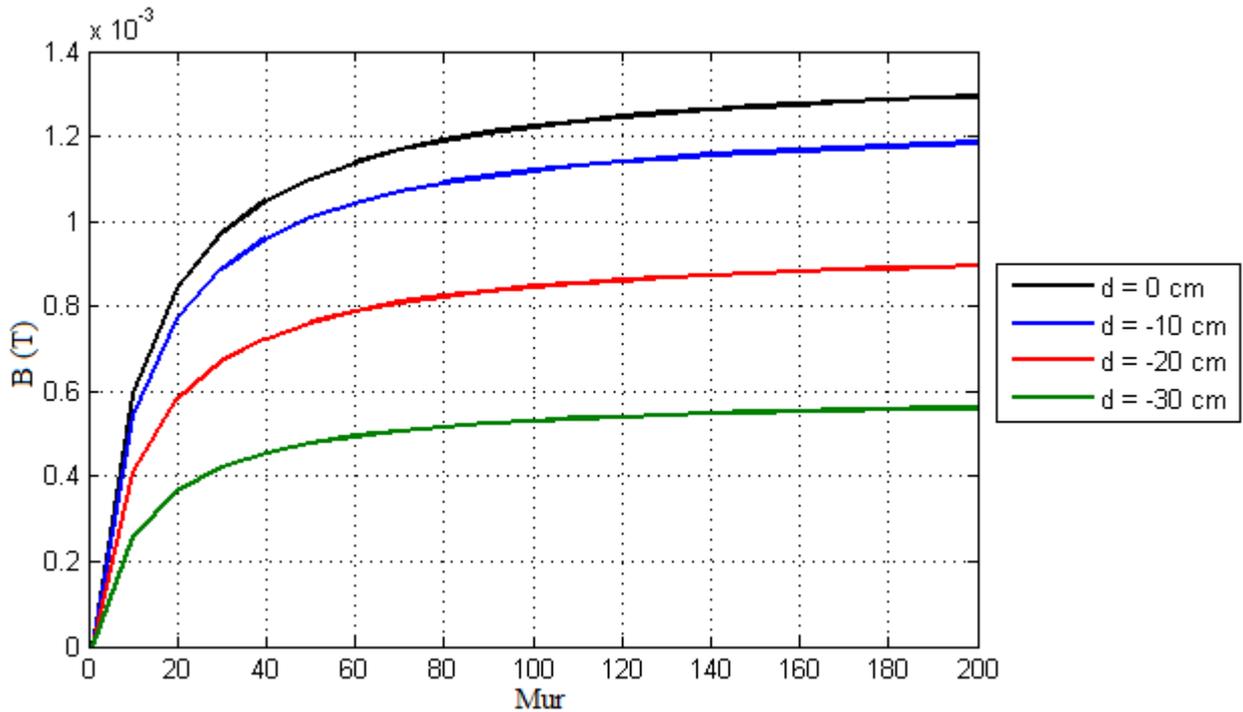


Figure IV.24 : variation de l'induction magnétique B par rapport Mur

Les figures IV.24 et IV.25 représentent la valeur maximal et la valeur minimal de l'induction magnétique B par rapport à l'axe Y. Ces valeurs nous permettent de connaître la position du corps ferromagnétique.

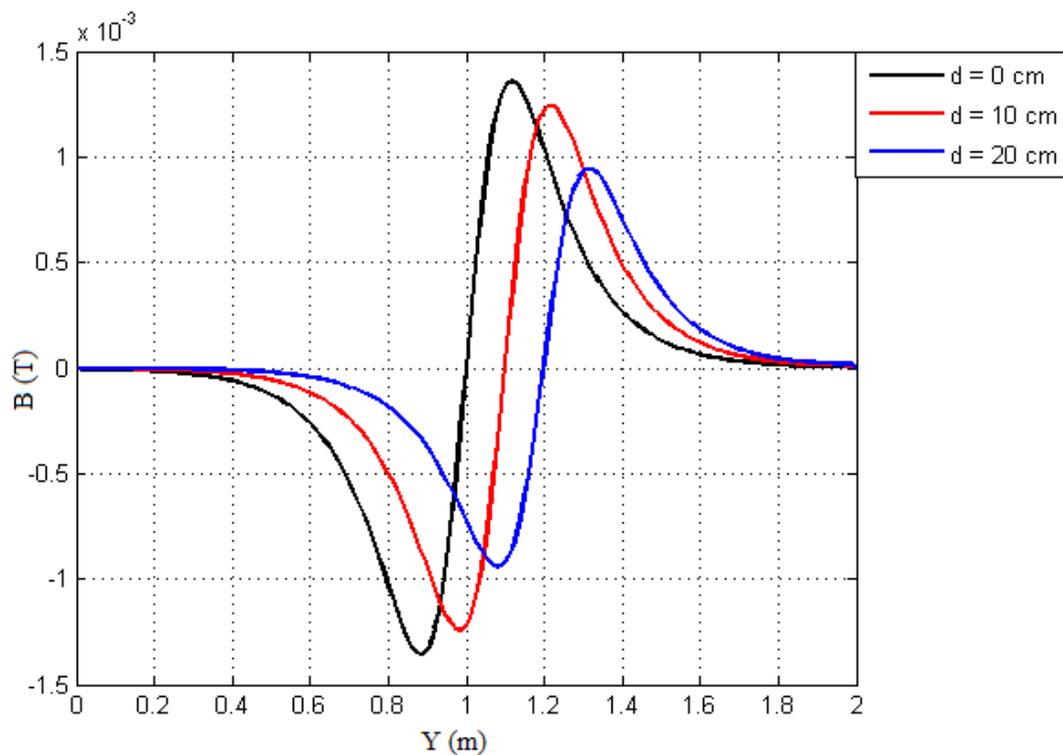


Figure IV.25 : La valeur de l'induction magnétique B par rapport à l'axe Y (m)

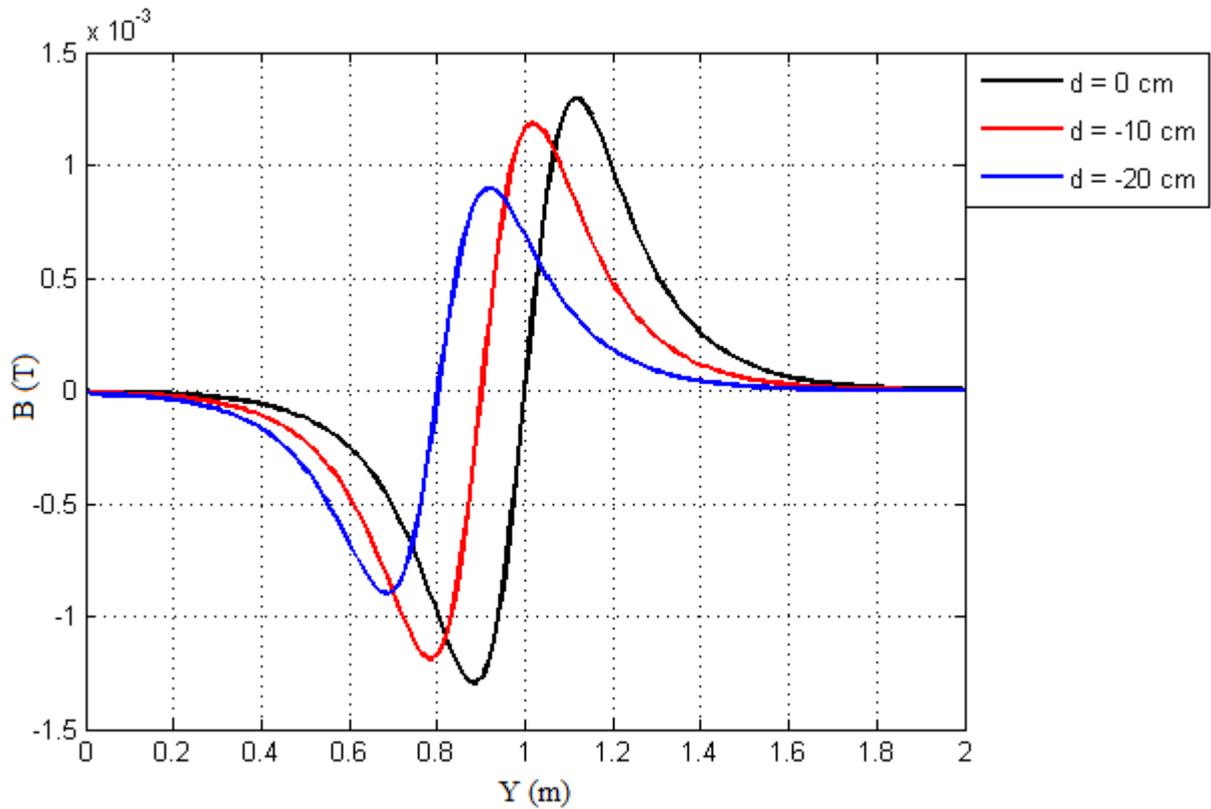


Figure IV.26 : La valeur de l'induction magnétique B par rapport à l'axe Y

La comparaison entre les valeurs réel et les valeur localise et la détection du corps magnétique

◆ *Erreur relative*

$$\epsilon_{r \max} = \left| \frac{Y_R - Y_L}{Y_R} \right| \cdot 100$$

Pour : $J_0 = 1e^6$, $\mu_r = 200$, $d = 0$ cm (pas de décalage).

		Réel	Localisé	$\epsilon_{r \max}$
d = 0 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	0.95	0.88	7.37%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1.05	1.12	6.66%
d = 10 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	1.05	0.98	6.66%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1.15	1.22	6.09%

d = 20 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	1.15	1.08	6.09%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	1.25	1.32	5.6%
d = -10 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	0.85	0.78	8.23%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	0.95	1.02	7.37%
d = -20 cm	$Y_{\min}(\text{cm})$	0.75	0.69	8%
	$Y_{\max}(\text{cm})$	0.85	0.92	8.23%

Tab IV.16 : Les valeurs réelles et les valeurs localise

Avec :

$\epsilon_r \max$: Erreur relative maximale.

Y_R : La valeur réel de Y_{\min} .

Y_L : La valeur localisé de Y_{\min} .

D'après ces erreurs, on peut dire que le code de calcul utilisé pour la résolution de l'équation du modèle magnétostatique donne des résultats satisfaisants.

IV.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté tous les résultats obtenus en utilisant le code de calcul par la méthode de déférence finies améliorée. Nous avons calculé le champ magnétique crée par deux bobines qui nous a permis de détecté et connaître la position du corps ferromagnétique. Cette étude permet de conclure que ce système permet de détecter les matériau ferromagnétique de grand perméabilité et de taille grande.

CONCLUSION GENERALE

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 et comment calculé la valeur de l'induction magnétique qui sont la base de cette technique.

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 de discrétisation des équations aux dérivées partielles par la méthode des différences finies.

Les méthodes de résolutions des équations électromagnétiques ont été présentées. La méthode des différences finies améliorée ayant été retenue pour notre travail elle a été vue dans le détail. Nous avons implanté ces formulations dans un code de calcul développé sous Matlab.

Nous avons présenté tous les résultats obtenus en utilisant le code de calcul par la méthode de différence finis amélioré. Nous avons calculé le champ magnétique créer par deux bobines qui nous a permis de détecté et connaître la position d'un corps ferromagnétique. Il a également conclu de ce travail que chaque fois qu'un grand corps ferromagnétique était de bons résultats.

Perspective :

Le premier perspective de recherche qui apparaît à l'issue de cette mémoire concernent la réutilisabilité de notre travail, à travers la localisation du corps ferromagnétique suivant l'axe X. Le deuxième est de faire augmenter ou diminuer la distance entre les deux bobines.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Guy Chateigner, Michel Boës, Daniel Bouix, Jacques Vaillant, Daniel Verkindère <<MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE>>, Livre, 2006

- [2] F.BOUDOIN, M.LAVARE, <<capteurs : principes et utilisation>>, 2^{ème} édition décembre 2008.

- [3] Edward, M. and all, "Electricité et magnétisme", Collection Berkeley, volume 2, 1973.

- [4] Javaan Bowler "Electromagnetic fields". MCGraw-Hill, 1964.

- [5] Haasen, P., "physical metallurgy", Livre, 1965.

- [6] Pavlov. P, Khokhlov. B, "Physique du solide", édition MIR, Moscou, 1989.

- [7] Le Fouilleur, numéro 26, janvier-février 2009, Le Gamma 6000 dans tout cela, par David, p. 26

- [8] Trésors et Détections, n°83, mai-juin 2005, les détecteurs de métaux ACE 250 PRO de Garrett, Tests collectifs mis en forme par Yves Mauchamps, p.24

- [9] Site : Wikipédia / Détecteur de métaux /Archéologie.

- [10] E. Durand, «Magnétostatique », Université de Paris -VI, (1969).

- [11] P. Lorrain, D.P. Corson, F. Lorrain, «Electromagnetic fields and Waves», W.H. Freeman and Co. New York, 1988.

- [12] R. Petit, «Ondes électromagnétiques», Masson, Paris, 1989.