

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies**



**Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

Thème

**Etude d'un Circuit Magnétique
par la Méthode des Eléments
Finis**

**Dirigée par:
HALEM Noura**

**Réalisée par:
HANI Abdesslam
ZEHOUANI Mohammed Laid**

Soutenu le 10 Juin 2012

Liste des figures

Figure 1.1	Analogie entre un circuit électrique et un circuit magnétique	(5)
Figure 1.2	Discretisation par éléments finis en deux dimensions	(8)
Figure 2.1	Géométrie en 3D du circuit magnétique	(10)
Figure 2.2	Dimensions géométriques de la bobine à noyau de fer	(10)
Figure 2.3	Présentation du circuit équivalent	(11)
Figure 2.4	Affectation des matériaux dans les régions	(14)
Figure 2.5	Répartition du maillage (éléments triangulaires)	(14)
Figure 2.6	Répartition des lignes des équiflux dans le circuit magnétique	(16)
Figure 2.7	Répartition de l'induction dans le circuit magnétique	(16)
Figure 2.8	Carte des vecteurs d'induction magnétique	(17)
Figure 2.9	Contour étudié n°1	(17)
Figure 2.10	Courbe de l'induction magnétique le long du contour 1	(18)
Figure 2.11	Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 1	(18)
Figure 2.12	Contour étudié n°2	(19)
Figure 2.13	Courbe de l'induction magnétique le long du contour 2	(19)
Figure 2.14	Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 2	(20)
Figure 2.15	Courbe d'aimantation B (H) (Msteel-19)	(20)
Figure 2.16	Répartition de l'induction dans le circuit magnétique	(21)
Figure 2.17	Courbe de l'induction magnétique le long du contour 1	(22)
Figure 2.18	Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 1	(22)
Figure 2.19	Courbe de l'induction magnétique le long du contour 2	(23)
Figure 2.20	Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 2	(23)

Notations et symboles

$\vec{E}$	<i>Champ électrique [v / m],</i>
$\vec{B}$	<i>Induction magnétique [T]</i>
$\vec{H}$	<i>Champ magnétique [A/m]</i>
$\vec{D}$	<i>Induction électrique [C/m²]</i>
$\vec{J}_c$	<i>Densité du courant de conduction [A/m²]</i>
ρ	<i>Densité volumique de charge électrique [C/m³]</i>
μ	<i>Perméabilité magnétique [H/m]</i>
ν	<i>Relativité magnétique [m/H]</i>
ε	<i>Permittivité diélectrique [F/m]</i>
σ	<i>Conductivité électrique [S/m]</i>
N	<i>Nombre de Spire [tr/min]</i>
S	<i>Surface [m²]</i>
V	<i>Tension [v]</i>
I	<i>Courant [A]</i>

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : <i>Synthèse bibliographique</i>	
1.1 Introduction	2
1.2 Équations de base et lois liées a la matière	2
1.3 Formulation des équations électromagnétiques	3
1.3.1 Modèle magnétostatique	3
1.3.2 Modèle magnétodynamique	4
1.4 Théorème d'Ampère pour les circuits magnétiques	5
1.4.1 L'application du Théorème d'Ampère	6
1.5 Méthode des éléments finis	7
1.6 Conclusion	8
CHAPITRE 2: <i>Application à la bobine à noyau de fer</i>	
2.1 Application à la bobine a noyau de fer	9
2.1.1 Introduction	9
2.1.2 Généralités sur la bobine à noyau de fer	9
2.2 Etude analytique	11
2.3 Modèle éléments finis magnétostatique	13
2.3.1 Introduction	13

2.3.2	Définition de la géométrie et modélisation	13
2.4	Modèle linéaire	15
2.4.1	Propriété des matériaux	15
2.4.2	Résultats	15
2.5	Modèle non linéaire	20
2.5.1	Résultats	21
2.6	Conclusion	23
	Conclusion générale	24
	Annexe A	25
	Bibliographie	26

Introduction

Générale

Conclusion

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des équations aux dérivées partielles; ces phénomènes se trouvent dans des régions de géométrie très variée (Exemple : pièce des machines tournantes, transformateurs ...etc.). En générale, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes analytiques ou des méthodes approchées.

Les bobines sont d'usage fréquent en électrotechnique (composants passifs magnétiques) et les machines électriques (transformateurs, alternateurs, machines asynchrones et machines à courant continu) nécessitent l'emploi de matériaux magnétiques.

L'étude de la bobine passe par la mise en équation de l'ensemble des phénomènes dont elle est le siège. Or, dans le cas d'une bobine à noyau de fer, la tension à ses bornes et le courant qui la traverse ne peuvent pas être simultanément sinusoïdaux. Donc, il n'est pas possible d'appliquer les résolutions classiques; aussi, pour analyser le comportement de la bobine, deux méthodes sont envisagées :

- ❖ La première méthode consiste à linéariser le problème et à remplacer la bobine réelle par une bobine équivalente où toutes les grandeurs sont sinusoïdales; on peut alors utiliser les outils habituels de calcul.
- ❖ La deuxième méthode consiste à prendre en compte les phénomènes non linéaires; les équations obtenues sont alors traitées par des méthodes de calcul numérique.

Ainsi, et pour ce faire, cette mémoire sera présentée comme suit :

- Dans un premier chapitre, nous présenterons les équations et les modèles mathématiques qui caractérisent les phénomènes électromagnétiques.
- Dans le deuxième chapitre nous appliquons la méthode de calcul analytique dans le but de calculer l'induction magnétique ensuite nous appliquons la méthode de calcul par les éléments finis sur la bobine à noyau de fer, ce qui nous permet de faire une étude comparative entre les deux cas, linéaire et non linéaire du circuit magnétique.

1.1 Introduction

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations sont le couronnement de vieux concepts de la physique.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les équations mathématiques caractérisant l'évolution spatiale et temporelle des phénomènes physiques que nous désirons traiter.

1.2 Équations de base et lois liées à la matière

C'est J. C. Maxwell (1831-1879) qui a apporté à l'étude de l'électromagnétisme la puissance d'un formalisme mathématique, précisant les notions qualitatives introduites par Faraday. Il parvient à établir le groupe d'équations qui portant son nom, et qui constituent toujours la base de nos connaissances théoriques de l'électromagnétisme.

Dans ces formulations, J. C. Maxwell tenait à décrire des relations entre les grandeurs de l'électromagnétisme dans le cas général et où l'espace et le temps ont une influence dans un milieu physique quelconque, avec une densité de courant $\vec{J}$ variable et une distribution de charge ρ . Ces équations sont introduites comme postulats fondamentaux de l'électromagnétisme [Khene 06]:

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Vecteur densité de courant de déplacement, négligeable aux basses fréquences $\left[A/m^2 \right]$

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leur joindre des relations qui définissent la matière ou le milieu à étudier :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \text{ Ou } \vec{H} = \nu \vec{B} \quad (1.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (1.7)$$

L'équation (1. 6) est définie dans un milieu diélectrique et l'équation (1. 7) est définie dans un milieu conducteur. Mais dans un milieu supraconducteur la relation entre le champ électrique et la densité du courant électrique est non linéaire, c'est-à-dire

$$\vec{J}_c = \sigma(E) \vec{E}.$$

1.3 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 découplent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique.

Dans le cadre de notre travail, seul le modèle magnétostatique et le modèle magnétodynamique seront considérés et détaillés [Sabonnadière 1988].

1.3.1 Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ de l'équation (1. 1) est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent :

A. 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(1 .2) et (1 .3) , on obtient:

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

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

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

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

Le modèle ramène alors à l'équation :

$$\text{div} (\mu \text{grad}) = 0 \quad (1.8)$$

B. Modèle magnétostatique vectorielle

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

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

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

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

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

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (1.9)$$

D'où le système d'équation :

$$\text{rot} \nabla (\text{rot} \vec{A}) = \vec{J} \quad (1.10)$$

1.3.2 Modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme qui représente la variation temporelle de vecteur induction magnétique est non nul, ainsi, les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants de Foucault.

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

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

Il existe plusieurs formulations en électromagnétisme. Parmi ces formulations on a choisie la formulation en champ électrique $\vec{E}$.

En termes d'équations nous avons :

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

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

A ces équations nous ajoutons les lois caractéristiques du milieu :

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

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

1.4 Théorème d'Ampère pour les circuits magnétiques

La figure suivante un exemple de circuit magnétique non homogène utilisant des matériaux possédant des perméabilités différentes [Edminister].

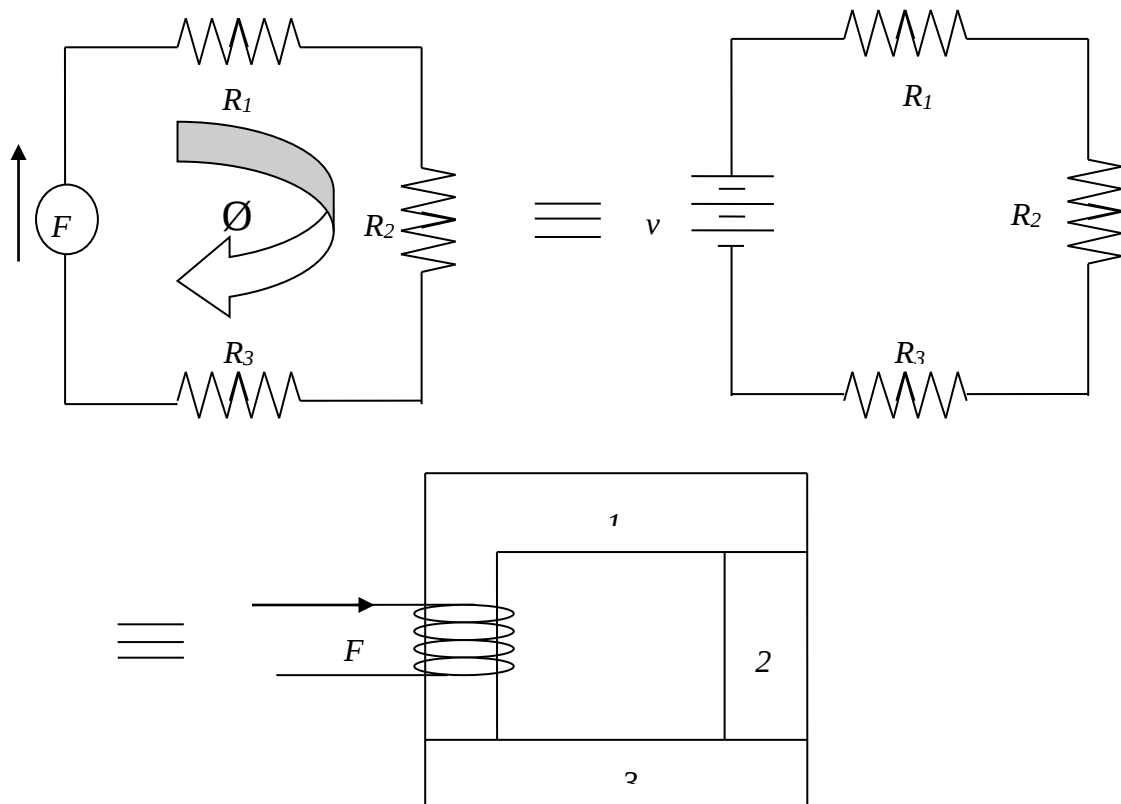


Figure 1.1 : Analogie entre un circuit électrique et un circuit magnétique

Une bobine de N spires, parcourue par un courant I enroulée autour d'un circuit magnétique, produit une force magnétomotrice ($F.m.m$) définie par NI , elle s'exprime en (A.t).

On définit un circuit magnétique comme étant l'ensemble des milieux constituant un circuit fermé et pouvant être le siège d'un flux d'induction magnétique.

Le flux magnétique dépend de :

- La nature du circuit(μ)
- La section(S) directement proportionnelle
- La longueur (L) inversement proportionnelle

Et on a :

$$\Phi = B.S = \mu.H.S$$

1.4.1 L'application du Théorème d'Ampère

Soit plusieurs courants $I_1 I_2 \dots \dots \dots I_n$ qui enveloppent chacun une courbe fermée "C", chaque courant produit en un point d'un élément de la courbe un champ magnétique dont la résultante "H" aura une circulation le long du contour "C" qui obéit à la loi d'Ampère, qui est donnée par [Edminister]:

$$\oint H.dl = \sum_{i=1}^n n_i . I_i \quad (1.11)$$

Pour un circuit souple : $H.L = n.I$

Pour notre cas : $F = N.I$

$$N.I = \oint H.dl \quad (1.12)$$

$$F = \int_1 H.dL + \int_2 H.dL + \int_3 H.dL \quad (1.13)$$

Par analogie d'Hopkins on écrit dans le long d'une maille électrique renfermant trois résistances et une f.e.m "V" (figure 1.1) on a:

$$V=V_1+V_2+V_3$$

Suggère de considérer F comme une augmentation ou source de potentiel magnétique " $N.I$ " et les termes " $H.L$ " comme des chutes de potentiel magnétique.

Par analogie avec la source de potentiel électrique " V " et les chutes de potentiel électrique V_1, V_2 , et V_3 .

Le flux Φ est l'analogie du courant I et la réluctance R l'analogie de la résistance R . Si on connaît les réluctances, on peut alors écrire l'équation :

$$F=N.I=\Phi(R_1+R_2+R_3) \quad (1.14)$$

$$\Phi = \frac{N.I}{\frac{l}{\mu \dots \mu \dots S}} = \frac{F}{R} \quad (1.15)$$

$$F=R.\Phi \quad (1.16)$$

$$R = \frac{l}{\mu.S} \quad (1.17)$$

1.5 Méthode des éléments finis

Appliquée à la conception des structures électromagnétiques, la méthode des éléments finis est devenue un outil très répandu, elle consiste à chercher une solution approchée à partir d'une discrétisation du domaine d'étude sur lequel les équations de maxwell sont résolues.

Cette méthode permet de déterminer un champ scalaire ou vectoriel satisfaisant à un ensemble d'équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point du domaine d'étude et à tout instant, tout en respectant les conditions aux limites.

Si le temps n'apparaît pas comme variable dans la formulation, ce dernier est dit stationnaire, sinon c'est un problème d'évolution.

Le domaine, dans lequel est effectuée la simulation, est décomposé en éléments sur lesquels sont construites des solutions approchées dont les inconnues sont les valeurs de la solution en un ensemble de points finis qui sont les nœuds de la discrétisation. Sur chaque point est calculé un potentiel, figure (1.2) [Bouharkat 06].

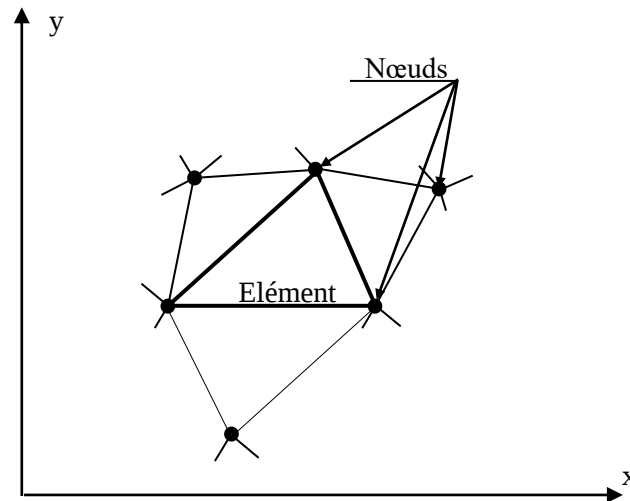


Figure 1.2: Discrétisation par éléments finis en deux

1.6 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré aux formulations mathématiques du phénomène électromagnétique présent dans les dispositifs électrotechniques. Des modèles mathématiques ont été établis, dans leurs formes générales. La théorie de la modélisation par éléments finis est basée sur la résolution *des équations de Maxwell*. Cette dernière est présentée dont le but d'une utilisation numérique à travers des outils logiciels. Dans le chapitre suivant un modèle magnétostatique de la bobine à noyau de fer sera appliqué en utilisant la méthode des éléments finis.

2.1 Application à la bobine à noyau de fer

2.1.1 Introduction

Dans ce paragraphe, nous choisissons d'appliquer la méthode de calcul par éléments finis sur un exemple académique.

L'importance de l'étude de la bobine à noyau de fer en régime variable est considérable en électrotechnique. Les bobines sont d'usage fréquent en électronique de puissance (composants passifs magnétiques) et les machines électriques (transformateurs, alternateurs, machines asynchrones et machines à courant continu) nécessitent l'emploi de matériaux magnétiques, deux méthodes sont envisagées :

- La première méthode consiste à linéariser le problème et à remplacer la bobine réelle par une bobine équivalente où toutes les grandeurs sont sinusoïdales; on peut alors utiliser les outils habituels de calcul.
- La deuxième méthode consiste à prendre en compte les phénomènes non linéaires; les équations obtenues sont alors traitées par des méthodes de calcul numérique.
[Halem 10]

Dans ce but nous allons utiliser ici la méthode de calcul par éléments finis, cette dernière permet de décrire les phénomènes non linéaires qui régissent le fonctionnement de la bobine à noyau de fer. Notant que lors de l'utilisation des outils logiciels de calcul par éléments finis, plusieurs techniques sont possibles, parmi les objectifs de ce chapitre est de présenter la méthode de calcul analytique en suite la méthode de calcul par éléments finis en utilisant un modèle magnétostatique qui est été déjà présenté dans le paragraphe.1.3.1 du chapitre I.

2.1.2 Généralités sur la bobine à noyau de fer

Considérons le circuit magnétique présenté dans la figure 2.1 qui est constitué de partie fer "U", le champ magnétique est crée par la bobine entourant l'armature. La figure 2.2 présente les dimensions géométriques en millimètre en 2D du circuit magnétique étudié [Chapman].

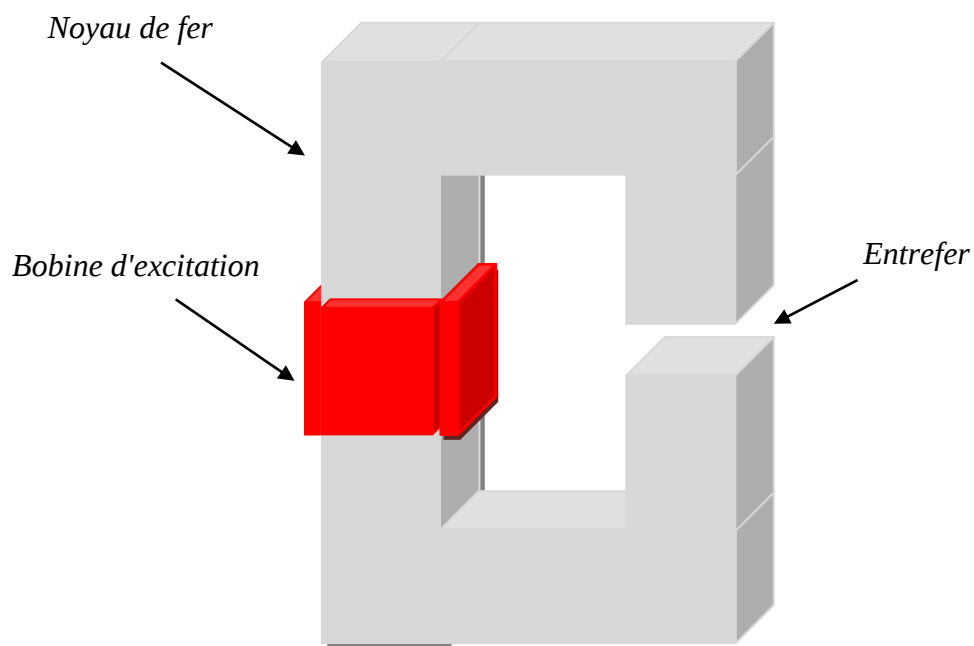


Figure 2.1 : Géométrie en 3D du circuit magnétique

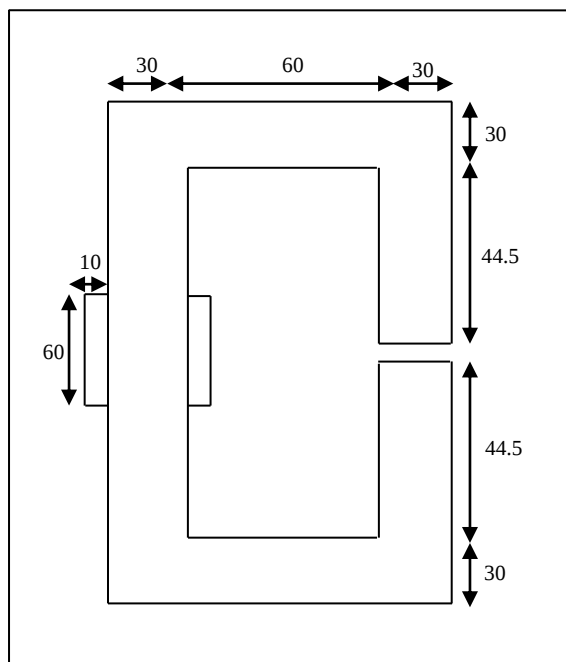


Figure 2.2 : Dimensions géométriques de la bobine à noyau de fer

2.2 Etude analytique

D'après le théorème d'ampère (paragraphe 1.4, chapitre 1) on a :

$$\sum_{i=1}^N \frac{N}{I} = \oint_c H \cdot dl \quad (2.1)$$

$$F = NI = H_i L_i + H_a L_a \quad (2.2)$$

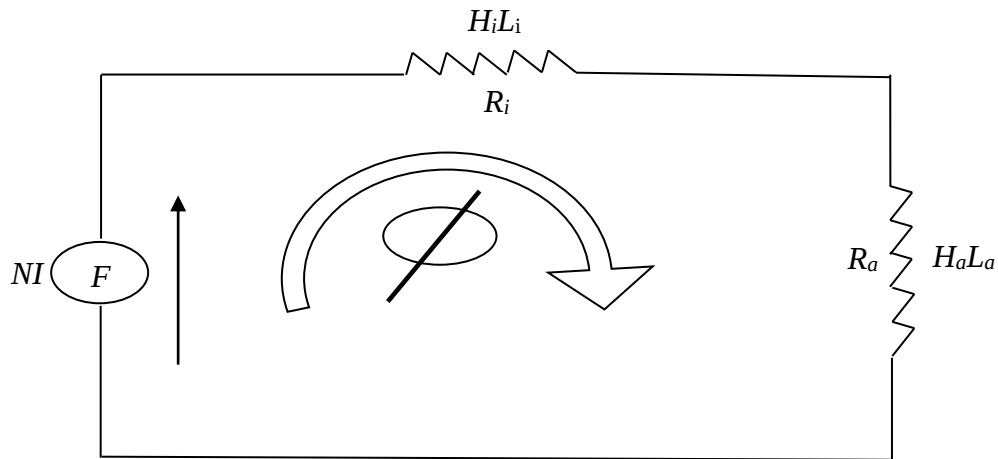


Figure 2.3 : Présentation du circuit équivalent [Sabonnadière 1988]

On a:

R_i : la réluctance de la partie fer,

L_i : la longueur de la partie fer,

Alors :

$$H_i L_i = \Phi R_i \quad (2.3)$$

R_a : la réluctance de la partie entre fer,

L_a : la longueur de la partie entre fer,

$$H_a L_a = \Phi R_a \quad (2.4)$$

D'après la formule de la force magnétomotrice :

$$NI = F = \Phi R_i + \Phi R_a = \Phi (R_i + R_a) \quad (2.5)$$

$$R_i = \frac{L_i}{\mu_0 * \mu_r * S}, R_a = \frac{L_a}{\mu_0 * S} \quad (2.6)$$

$$R_i = \frac{4190 * 10^{-3}}{4 * \pi * 10^{-7} * 1000 * 30 * 10^{-3}} = \frac{419 * 10^3}{12 * \pi} = 11119.95 H^{-1}$$

$$R_a = \frac{1.10^{-3}}{4 * \pi * 10^{-7} * 1 * 30 * 10^{-3}} = \frac{10^6}{12 * \pi}; R_a = 26539.278 H^{-1}$$

$$R_{TOT} = R_i + R_a = 11119.95 + 26539.278 = 37659.22 H^{-1}$$

Le flux total dans le circuit magnétique :

On a :

$$NI = \Phi_{TOT} R_{TOT} \quad (2.7)$$

Donc :

$$\Phi_{TOT} = \frac{NI}{R_{TOT}} \quad (2.8)$$

$$\Phi_{TOT} = \frac{1000 * 1.8}{37659.22} = 0.04779 \text{ wb} = 47.97 \text{ m wb}$$

L'induction magnétique dans l'entrefer :

D'après la formule : $\Phi = B.S$

On trouve :

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2.9)$$

$$B = \frac{0.04779}{30 * 10^{-3}} = 1.59 \text{ Tesla}$$

2.3 Modèle éléments finis magnétostatique

2.3.1 Introduction

Pour notre application, et à cause de sa simplicité, une modélisation magnétostatique est faite en utilisant l'outil logiciel FEMM (Annexe A).

A partir des équations de *Maxwell*, l'expression qui régit le modèle magnétostatique est définie par le terme potentiel vecteur magnétique A :

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad (2.10)$$

Où :

μ : La perméabilité magnétique.

J : La source (densité du courant électrique).

Pour la modélisation en 2D le potentiel vecteur magnétique possède seulement la composante A_z qui est perpendiculaire sur les surfaces étudiées, dans ce cas l'expression de l'équation (3.1) sera :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = J_z \quad (2.11)$$

2.3.2 Définition de la géométrie et modélisation

La première étape pour la modélisation par élément finis est la construction de la géométrie en deux dimensions (figure 2.4).

On commence par la définition des points définissant les extrémités de toutes les régions du circuit magnétique à l'aide de ses coordonnées sur le plan de travail, c'est à partir de ces points qu'on peut créer les surfaces du circuit magnétique.

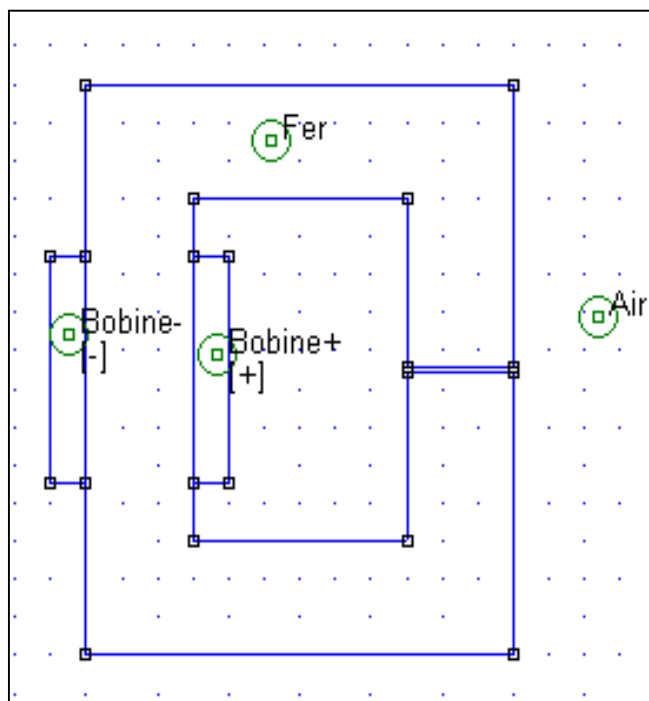


Figure 2.4 : Affectation des matériaux dans les régions

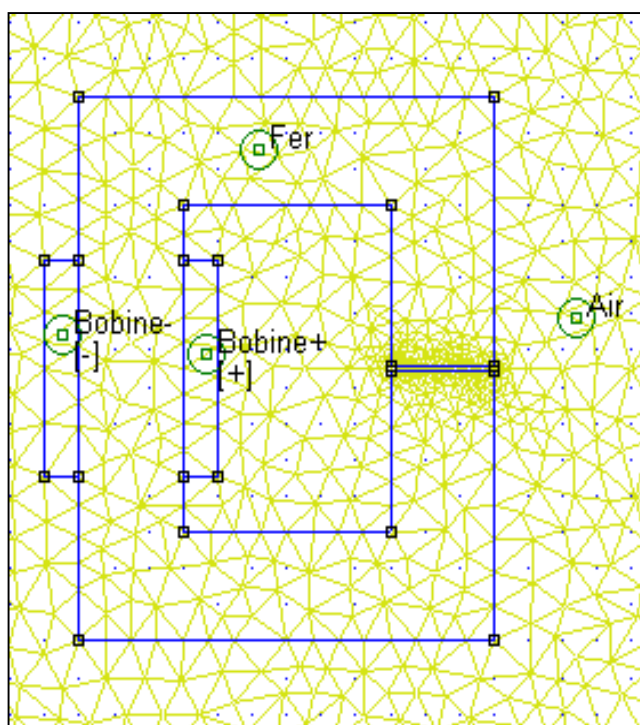


Figure 2.5 : Répartition du maillage (éléments triangulaires)

2.4 Modèle linéaire

Nous appellerons *bobine parfaite*, une bobine où les phénomènes d'hystérésis, la saturation et les courants de Foucault peuvent être négligés. Il s'agit, par exemple, d'une bobine sans noyau de fer ou d'une bobine réalisée à partir de tôles isolées dont la caractéristique magnétique $B(H)$ est linéaire.

2.4.1 Propriété des matériaux

Dans ce cas on a trois matériaux différents pour les trois régions du circuit magnétique [Halem 10]:

- *La région de l'air* : est définie par un matériau qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique $\mu_r=1$.
- *La région de la bobine* : est définie par un matériau qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique $\mu_r=1$.
- *La région du fer* : est définie par un matériau magnétique qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique $\mu_r=1000$.

2.4.2 Résultats

La répartition des lignes d'équiflux est présentée dans la figure 2.6, les lignes de flux sont canalisées par le fer, nous observons des lignes de fuite au voisinage de l'entrefer.

La répartition de l'induction magnétique, est présentée dans la figure 2.7, nous remarquons que la valeur de l'induction augmente linéairement.

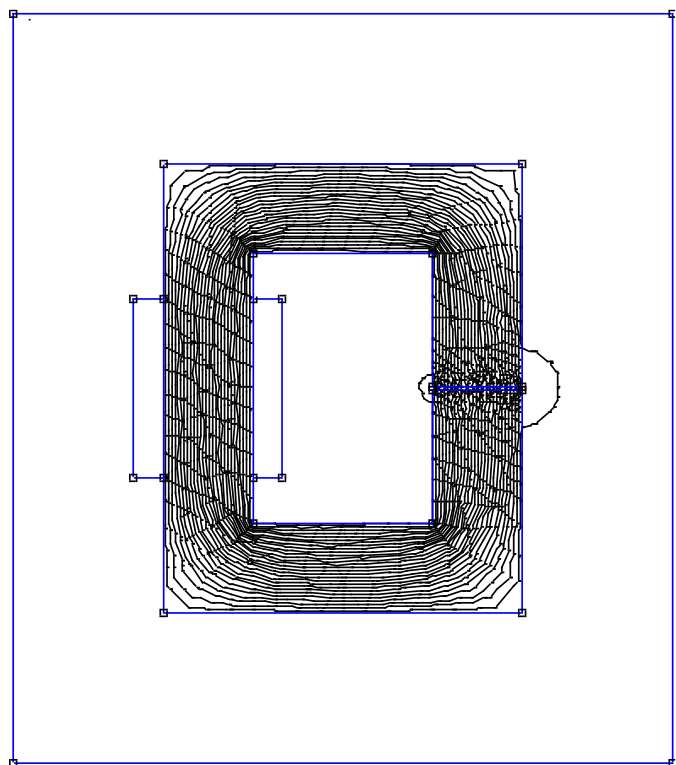


Figure 2.6 : Répartition des lignes équiflux dans le circuit magnétique

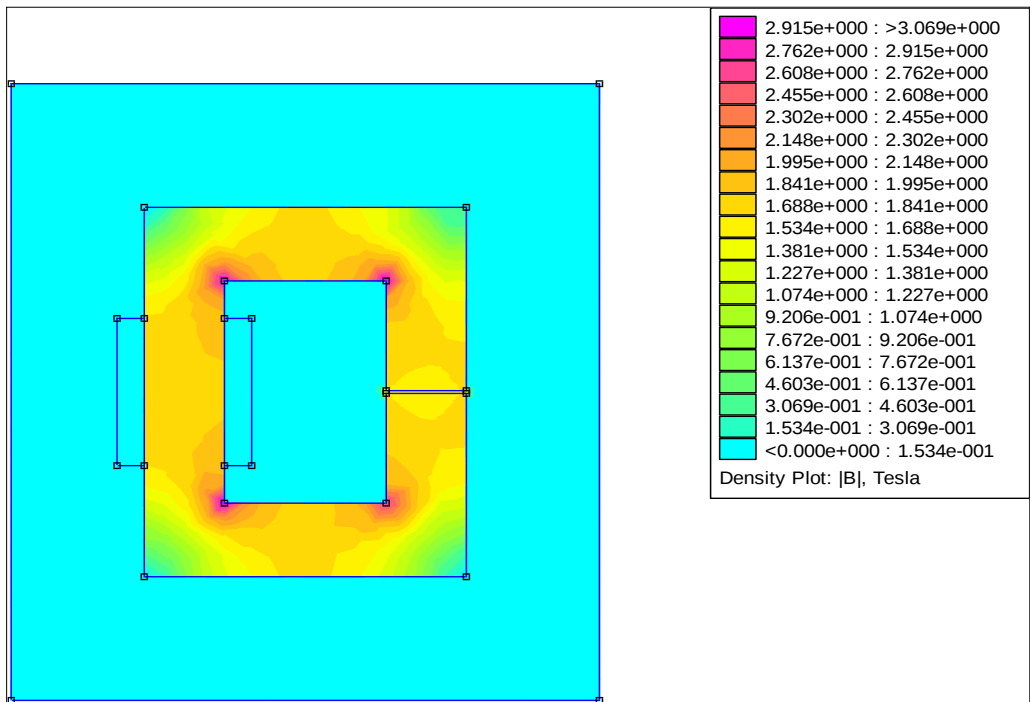


Figure 2.7 : Répartition de l'induction dans le circuit magnétique

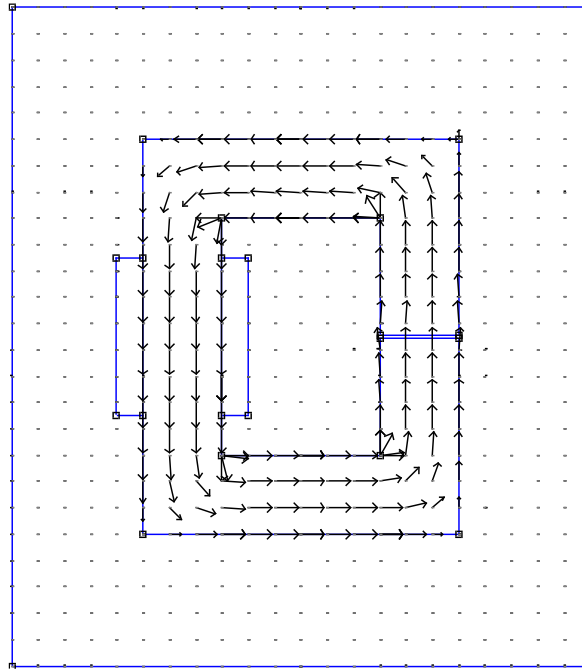


Figure 2.8 : Carte des vecteurs d'induction magnétique

Pour bien préciser les directions des vecteurs d'induction magnétique, la figure 2.8 présente sa direction.

a. Etude d'un contour

Dans ce paragraphe nous choisissons d'étudier un contour entre deux nœuds, au milieu de l'entrefer (figure 2.9).

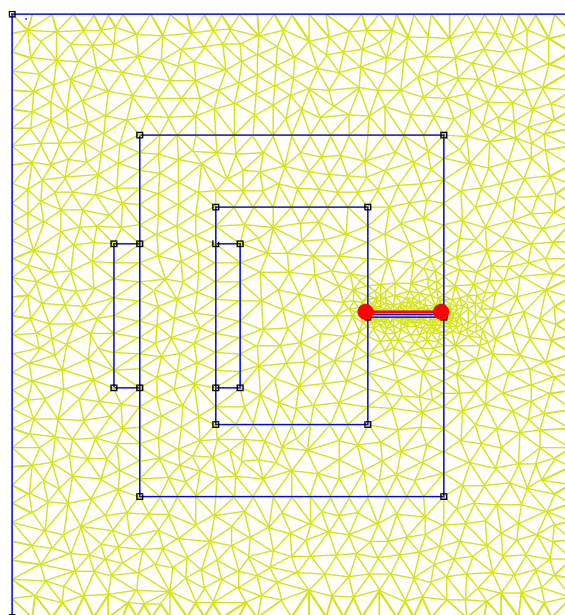


Figure 2.9 : Contour étudié n°1

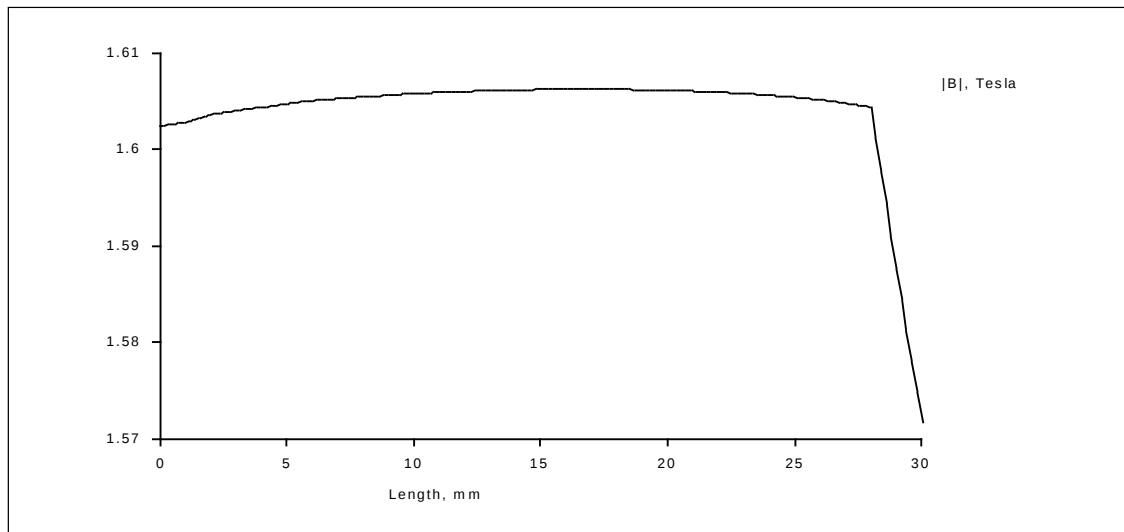


Figure 2.10 : *Courbe de l'induction magnétique le long du contour 1*

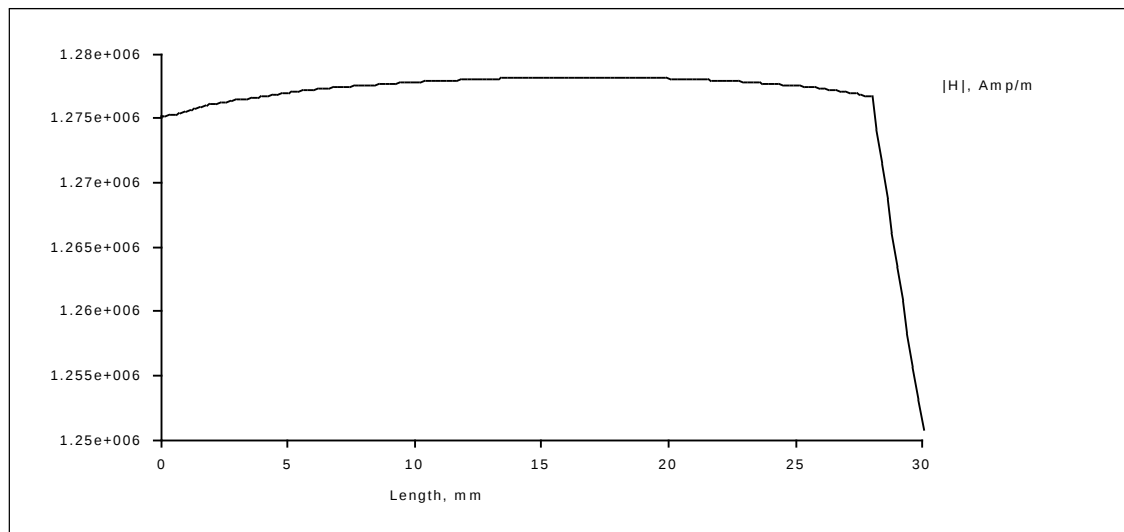


Figure 2.11 : *Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 1*

Les deux figures, 2.10 et 2.11 présentent respectivement la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique le long du contour 1. La valeur de l'induction magnétique calculée analytiquement 1.59 tesla est presque égale la valeur calculée par la méthode des éléments finis 1.62 tesla.

Et pour bien observer la circulation de l'induction magnétique, ainsi que l'intensité du champ magnétique dans le fer, nous choisissons le contour 2, qui est présenté par la figure 2.12.

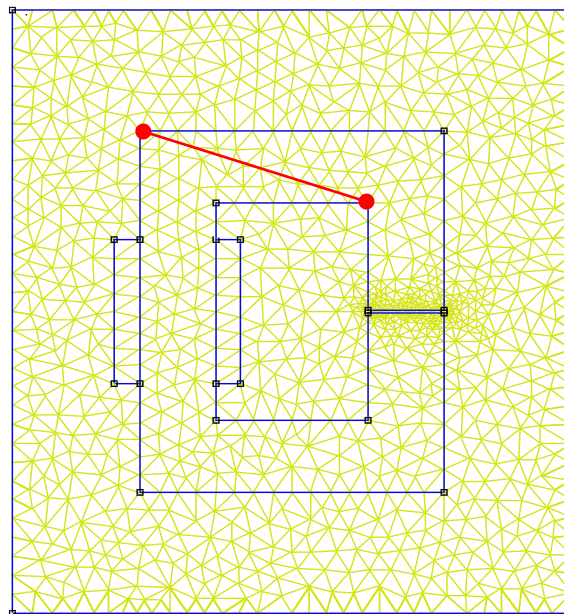


Figure 2.12 : Contour étudié n°2

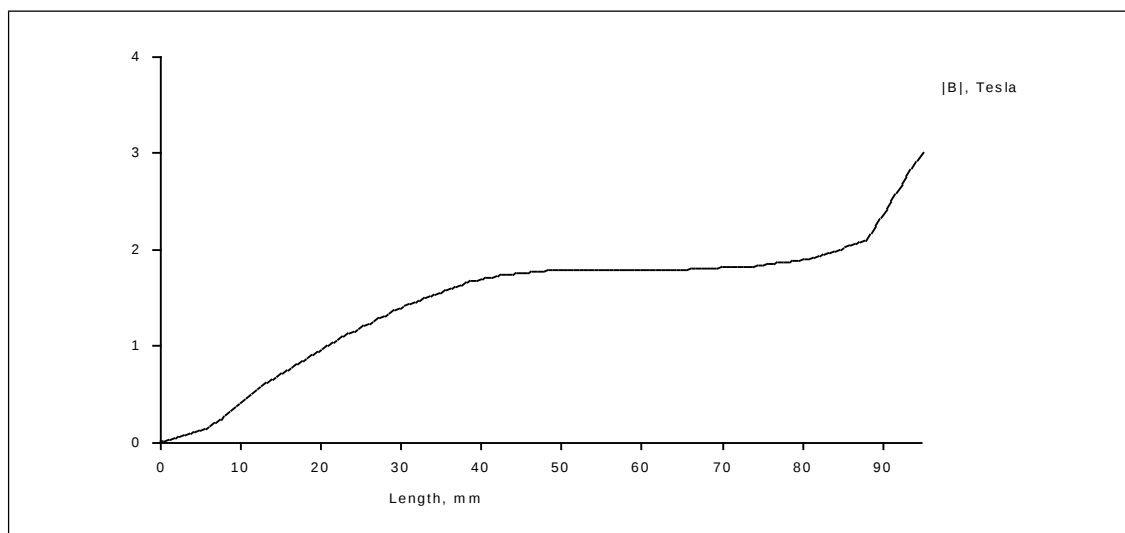


Figure 2.13 : Courbe de l'induction magnétique le long du contour 2

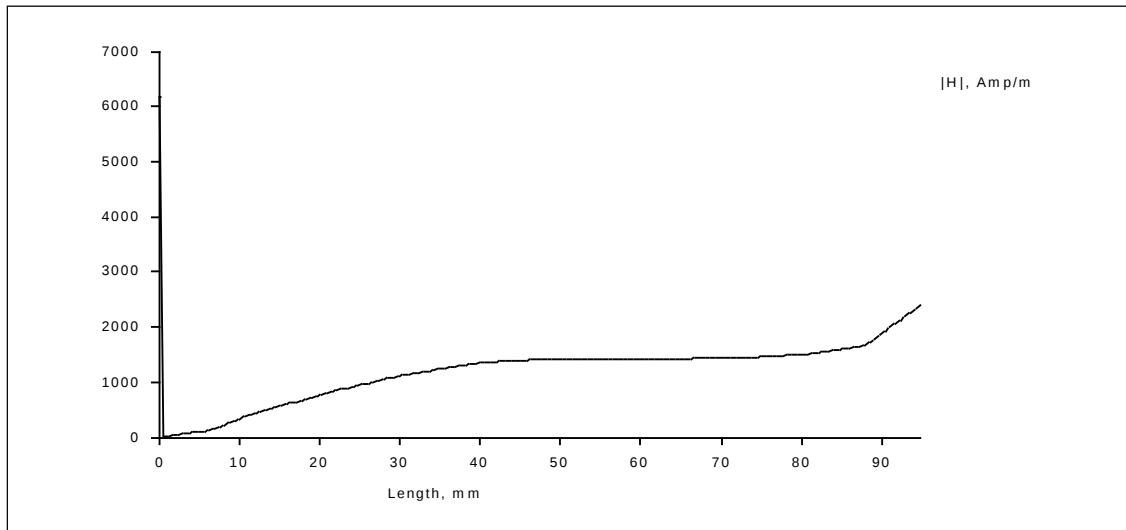


Figure 2.14 : Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 2

A partir de deux figure précédentes 2.13 et 2.14, nous remarquons que la valeur de l'intensité du champ magnétique augmente linéairement avec celle de l'induction magnétique.

2.5 Modèle non linéaire

Avec les mêmes données et les mêmes conditions du modèle du paragraphe 2.4, nous remplaçons seulement la perméabilité constante du fer, par une courbe d'aimantation $B(H)$ non linéaire représentée par la figure 2.15, afin de d'obtenir le modèle non linéaire de notre exemple de la bobine à noyau de fer.

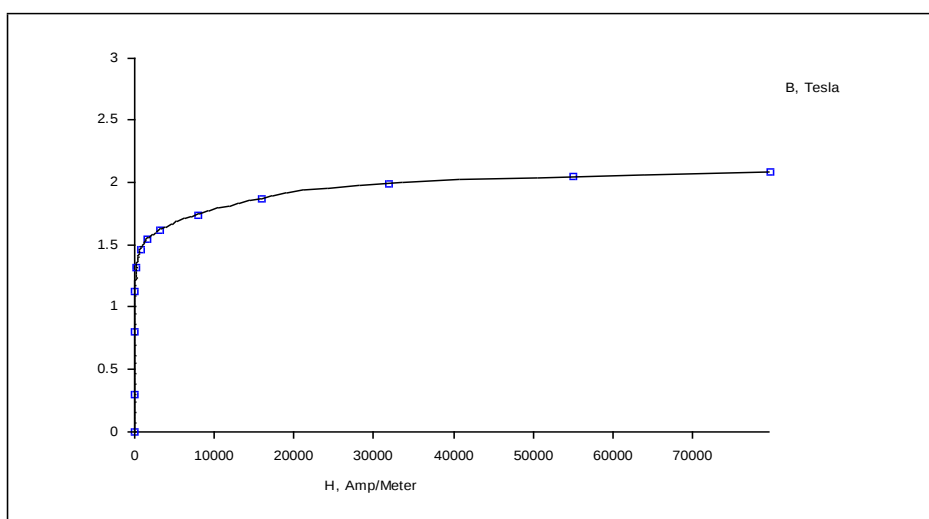


Figure 2.15: Courbe d'aimantation $B(H)$ (Msteel-19)

2.5.1 Résultats

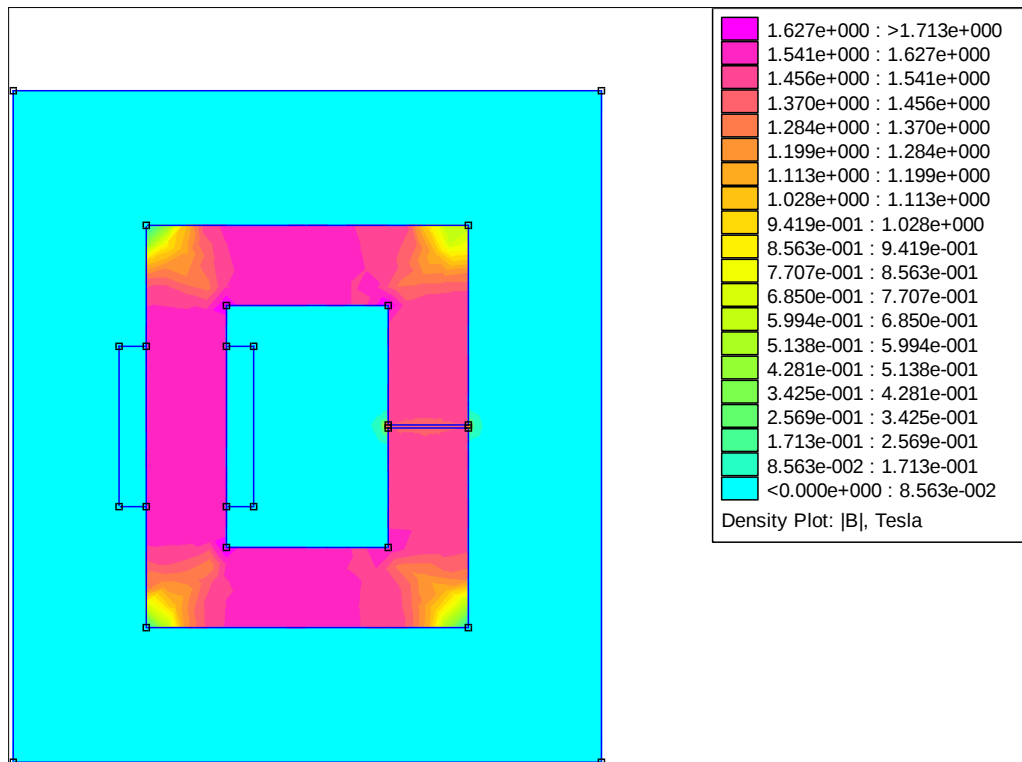


Figure 2.16 : Répartition de l'induction dans le circuit magnétique

La figure 2.16 présente l'induction magnétique obtenue, cette fois le circuit magnétique est presque saturé, où la valeur de l'induction magnétique augmente suivant cette courbe jusqu'à la zone de la saturation, ici la valeur maximale obtenue est de *1.837 tesla*, tandis que dans le modèle linéaire nous obtenons une valeur maximale de *4.135 tesla*, car dans ce cas l'induction magnétique augmente linéairement.

À partir du contour présenté par la figure 2.9 nous obtenons les deux figures suivantes : 2.17 et 2.18 présentent respectivement la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique le long du contour 1.

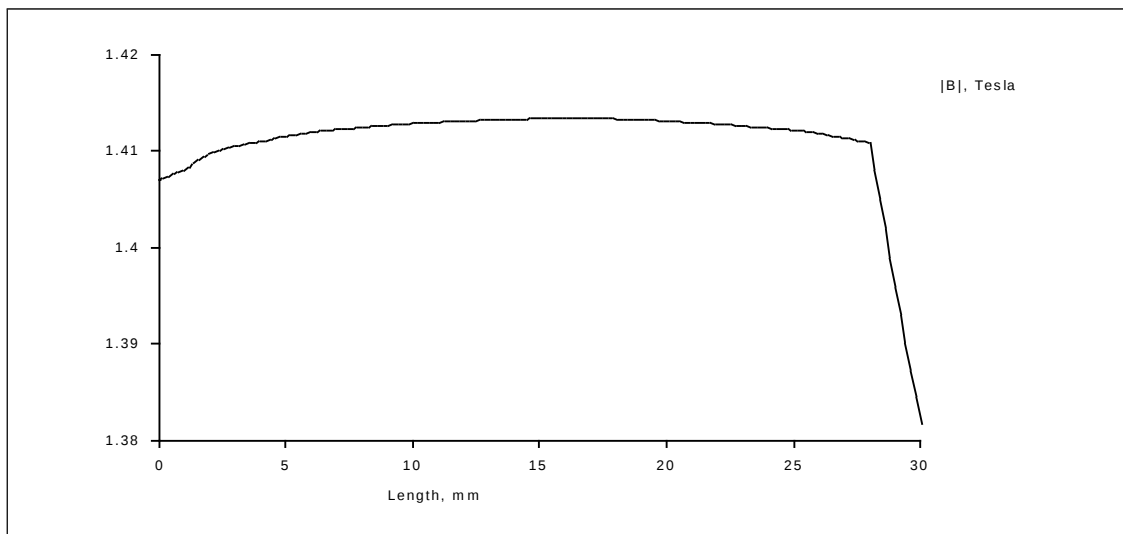


Figure 2.17 : Courbe de l'induction magnétique le long du contour 1

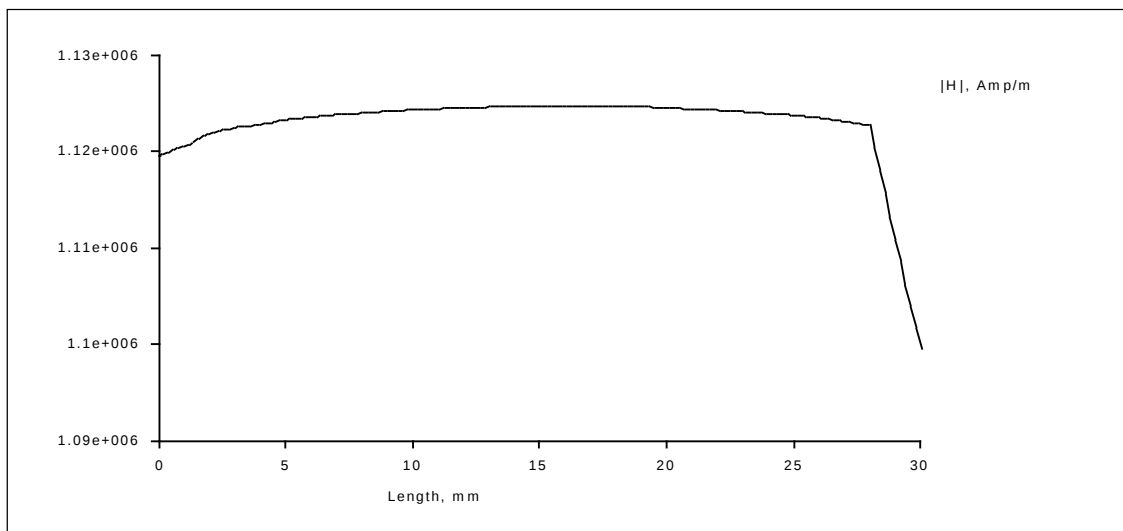


Figure 2.18 : Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 1

Et de même pour le contour 2 qui est créée dans la région fer (figure 2.12). Nous obtenons les deux figures suivantes : 2.19 et 2.20, présentent respectivement la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique.

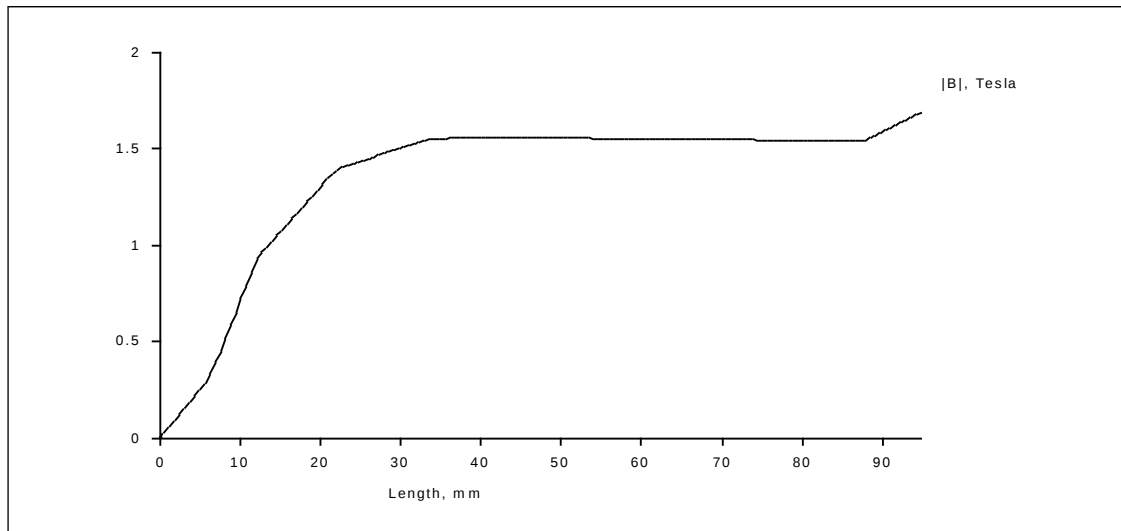


Figure 2.19 : Courbe de l'induction magnétique le long du contour 2

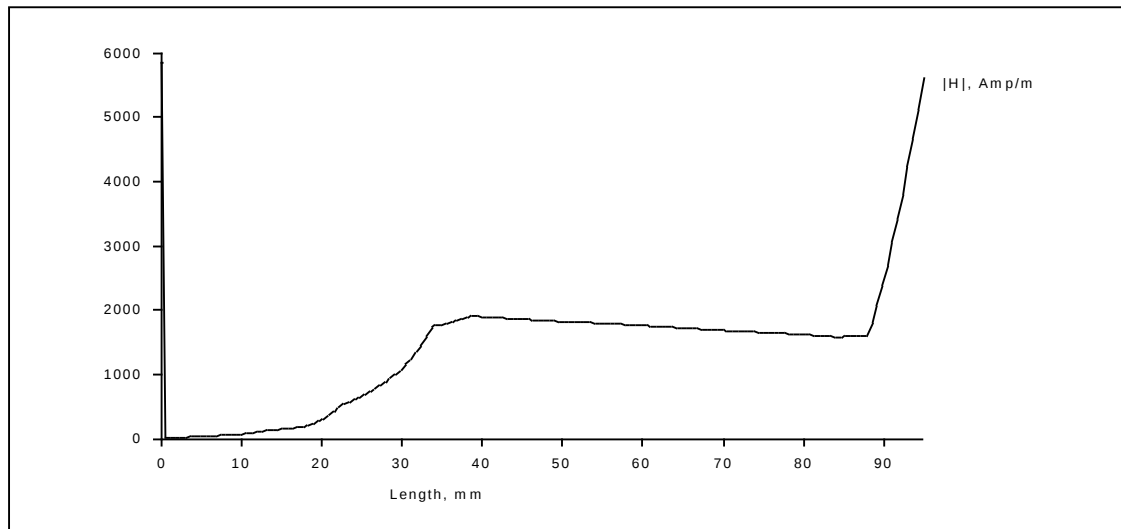


Figure 2.20 : Courbe de l'intensité du champ magnétique le long du contour 2

2.6 Conclusion

Dan ce chapitre nous avons appliqué la méthode de calcul par éléments finis sur la bobine à noyau de fer. Nous commençons par un calcul analytique ensuite nous appliquons une modélisation magnétostatique (alimentation par la densité du courant électrique) afin de visualise les lignes d'équiflux et de calculer l'induction magnétique dans l'entrefer, la valeur de l'induction magnétique calculée analytiquement est presque égale la valeur calculée par la méthode des éléments finis. La modélisation magnétostatique possède l'avantage de faciliter les calculs grâce à sa simplicité de modélisation ainsi que son temps de calcul qui est très léger.

CONCLUSION GENERALE

Les phénomènes électromagnétiques sont modélés par des équations mathématiques (équations aux dérivées partielles).

Il y a plusieurs méthodes de résolutions de ces équations. La méthode analytique parfois est difficile à cause de la géométrie du dispositif étudié. Donc les méthodes numériques sont les plus efficaces dans ce cas, parmi ces méthodes on trouve la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. Chacune de ces méthodes a des propriétés, donc il y a une méthode convenable pour chaque problème ou chaque domaine d'étude.

Dans la première partie, nous avons exposé la méthode de modélisation par éléments finis. La théorie de la modélisation par éléments finis est basée sur la résolution *des équations de Maxwell*. Cette dernière est présentée dont le but d'une utilisation numérique à travers des outils logiciels.

Une deuxième partie constitue le cœur de cette mémoire, où nous avons appliqué la méthode de calcul par éléments finis sur la bobine à noyau de fer. Nous commençons par un calcul analytique ensuite nous appliquons une modélisation magnétostatique (alimentation par la densité du courant électrique). La modélisation magnétostatique possède l'avantage de faciliter les calculs grâce à sa simplicité de modélisation ainsi que son temps de calcul qui est très léger. Cette méthode peut suffire pour certains cas spéciaux, mais elle reste limitée, puisque la plus proche méthode de la réalité est de simuler les problèmes avec une source de tension, et on cherche l'évolution du courant ainsi que les autres grandeurs électrique et magnétique à partir des conditions et des données qui sont déjà connus.

FEMM (Finite Element Method Magnetics)

FEMM (Finite Element Method Magnetics) est une suite de programmes pour résoudre les problèmes magnétostatiques et de faibles fréquences en deux dimensions (2D), planaires et axisymétriques. FEMM est divisé en trois parties:

1. Preprocessor (femme.exe)

C'est un programme de CAO pour la définition de géométrie du problème à résoudre, et définissant les conditions aux limites. Les fichiers DXF d'Autocad peuvent être importés pour faciliter des géométries.

2. Solver (fkern.exe)

Le solveur prend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans domaine de résolution.

3. Postprocesseur (femmview.exe)

C'est un programme graphique qui affiche les résultats sous forme de champ, de contour et densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, et d'évaluer plusieurs différentes intégrales et tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur. Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux-ci sont:

1. triangle.exe : Triangle découpe la région avec en grand nombre de triangles, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.
2. femmplot.exe : Ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D.

Bibliographie

- [Bouharkat 06] M. Bouharkat, "*Etude de l'évolution des courant rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique*", Thèse de doctorat, université de Batna. Février 2006.
- [Chapman] Stephan. J. Chapman « *Electric Machinery Fundamentals* », Instructor's manual, fourth edition (page 12).
- [Edminister] Joseph. A. Edminister, « *Electromagnétisme* » (cours et problèmes), série Schaum (pages 115, 129, 177).
- [Halem 10] N. Halem : Mémoire de Magister 2010 « *Modélisation des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic avec Prise en Compte Adéquate de Circuit Magnétique par Eléments Finis* ». Centre universitaire d'Eloued.
- [Khene 06] M. L. Khene : Mémoire de Magister 2006 « *Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques dans les Structures à Géométries Complexes par Adaptation de la Méthode des Volumes Finis* ». Université de Batna.
- [Sabonnadière 1988] J.C Sabonnadière et J.L Coulomb "*calcul des champs électromagnétiques*". Techniques de l'Ingénieur D3020.