

tkRépublique Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude De MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
GANNA MOHAMMED

Mémoire dirigé par **Abdelghani KIMOUCHE** et co-dirigé par **Azzouz MIOUAT**

Thème

Calcul Électromagnétique par Eléments Finis Application aux Transformateurs de Puissance

Mémoire soutenu publiquement le 27 Septembre 2014 devant le jury composé de :

M C. BIROUCHE

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Président

M A. KIMOUCHE

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Rapporteur

M A. MIOUAT

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Co-Rapporteur

M R. KHALDI

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

M H. DJOUDI

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à monsieur **MIOUAT AZOUZ** et monsieur **KIMOUCHE ABDELGHANI** pour leur grande disponibilité lors de mes différentes sollicitations et aussi pour leurs précieux conseils pour l'élaboration de ce projet.

Je remercie l'ensemble des membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner mon travail.

Mes remerciements et mon respect s'adressent à tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail

Introduction Generale	1
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance	
Introduction	2
I.1 Constitution et principe de fonctionnement d'un transformateur	2
I.1.1 Constitution du transformateur	2
a) Partie active	2
a.1) Les enroulements	4
a.1.1) Enroulement primaire.....	5
a.1.2) Enroulement secondaire.....	5
a.2) Circuit magnétique.....	5
a.2.1) Circuit magnétique classique.....	5
a.2.2) Le circuit magnétique cuirassé	6
b) Partie constructive.....	7
b.1) La cuve et le couvercle.....	7
b.1.1) La cuve.....	7
b.1.2) Le couvercle.....	7
b.2) Les traversées.....	7
I.1.2 Isolement.....	8
I.1.2.1 Isolement des conducteurs	8
I.1.2.2 Isolement des bobines.....	8
I.1.3 Principe de fonctionnement du transformateur.....	10
I.1.4 Couplage des enroulements du transformateur.....	11
I.1.5 Indice horaire.....	13
I.1.6 Couplage des transformateurs	13
I.1.7 Conditions de couplage.....	13
I.1.8 Rapport de transformation.....	14
I.1.9 Prise de réglage (enroulement de réglage).....	14
I.2 Circuit équivalent d'un transformateur.....	14
I.3 Les pertes dans les transformateurs.....	15
I.3.1 Les pertes à vide.....	15
I.3.1.1 Pertes Joule.....	15
I.3.1.2 Pertes fer.....	15
a) Pertes par hystérésis	16
b) Pertes par courants de Foucault	18
I.3.2 Les pertes en court circuit.....	18
I.4 Equation générales du transformateur.....	19
I.4.1 Equation électrique au primaire.....	19
I.4.2 Equation électrique au secondaire.....	20
I.5 les différents essais.....	21
I.5.1 Essai à vide sous tension nominale.....	21
I.5.2 Essai en court circuit sous tension réduite au courant nominale	21
I.6 Les paramètre d'exploitation.....	22
I.7 Protection des transformateurs.....	22
I.8 Plaque signalétique.....	23
I.8.1 Contenu.....	23
Conclusion	23

Chapitre II : Equations de maxwell et modèles électromagnétiques

Introduction	24
II. Champs électromagnétiques, Mise en équations et formulations.....	25
II.1.Importance du champ électromagnétique.....	25
II.1.2 Equations et modèles mathématiques des phénomènes électromagnétiques.....	25
II.1.2.1 Equations de maxwell.....	25
II.1.2.2 Lois de comportement relatives aux milieux.....	26
II.1.2.3 La loi d'ohm.....	28
II.1.2.4 relation de passage.....	28
II.1.2.5 Modèle électrostatique.....	29
II.1.2.6.Modèle magnétostatique.....	30
II.1.2.7. Model magnétodynamique.....	30
II.2 Méthode de résolution	31
II.2.1 Méthode numérique	31
II.2.2 principe de la méthode des éléments finis	31
II.2.2.1 Méthodes d'approximation.....	31
II.3LES CONDITIONS AUX LIMITES	36
II.3.1 Condition de Dirichlet	36
II.3.2 Condition de Neumann	36
II.4Classification des systèmes physiques	36
II.4.1Système discret et système continu.....	36
II.5 Déroulement d'une étude	37
a)analyse du problème	37
b)Choix du modèle	37
c) Choix du type d'éléments	37
d) Choix du maillage	37
II.6 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	38
II.7 Présentation du logiciel (F.E.M.M) a travers un exemple d'application	38
II.7.1 Les principales étapes de simulation du dispositif (circuit)	39
II.7.2création du schéma de simulation	40
II.7.3 paramètres pour l'édition	40
II.7.3.1 choix de l'unité	40
II.7.3.2 Choix d'une taille de grille	41
II.7.4 Réalisation du schéma de simulation	41
II.7.5 Paramètre des matériaux à utiliser	41
II.7.5.1 définition des matériaux et milieux	42
II.7.5.2 choix des différentes régions.....	45
II.8 Conditions aux limites.....	46
II.9 Générateur de triangle.....	46
II.10 Simulation.....	46
II.10.1 visualisation des lignes de champs.....	46
II.10.2 Visualisation du résultat.....	48
Conclusion	49

Chapitre III : Calcul électromagnétique d'un transformateur de puissance

Introduction	50	50
III.1 Présentation du transformateur étudié.....	51	51
III.1.1 Les caractéristiques géométriques.....	51	51
III.1.2 Les propriétés électriques et magnétiques du transformateur.....	53	53
III.1.3 Caractéristiques du transformateur	53	53
III.1.4 Courbe d'aimantation du matériau utilisé.....	54	54
III.1.5 Allure des courants d'alimentation de l'enroulement primaires et secondaire.....	55	55
III.2 Organigramme.....	56	56
III.3 Introduction des propriétés physiques et des conditions aux limites au domaine d'étude.....	57	57
III.4 Maillage de la structure.....	58	58
III.5 Etude électromagnétique du transformateur.....	58	58
III.6) Modélisation sans présence de bobine de réglage.....	59	59
III.6.1 Calcul approximatif du nombre de spires n_1, n_2	59	59
III.6.2 Calcul des densités de courant dans les bobines à $t=8ms$	60	60
III.6.3 Calcul des courants de chaque phases.....	60	60
III.6.4 Simulation et interprétation des résultats.....	61	61
III.6.5 Interprétation des résultats.....	62	62
III.7 Détermination des paramètres R,L des enroulements.....	63	63
III.7.1 Calcul des résistances des enroulements HT et BT.....	63	63
III.7.2 Calcul des inductances des enroulements HT et BT.....	63	63
III.8 Modélisation avec bobine de réglage.....	64	64
III.8.1 Etude de l'influence des bobines de réglage.....	64	64
III.8.1.1 Recalcul du nombre de spires primaire.....	64	64
III.8.1.2 Calcul du Nombre de spires de la bobine de réglage.....	64	64
III.9 Effets de la bobine de réglage sur les paramètres R,L.....	67	67
III.9.1 Détermination de L,R.....	67	67
III.10 Effets du matériau du circuit magnétique.....	68	68
III.10.1 Détermination des paramètres R,L.....	68	68
Conclusion.....	70	70
Conclusion Generale	71	71

Introduction Générale

L'étude des phénomènes électromagnétiques a pour but d'évaluer d'une manière précise le comportement des grandeurs globales (résistances, inductances, induction magnétique...)

La distribution de ces grandeurs dans les dispositifs électrotechniques est gouverné par un système d'équations aux dérivées partielles qui régie son fonctionnement et qui s'exprime sous la forme de model mathématique ou numérique.

Ces modèles sont résolus à l'aide d'outil informatique en utilisant une méthode de choix propre à la nature du problème recherché.

Ce présent travail, est porté sur l'évaluation du comportement électromagnétique des transformateurs de puissance en utilisant la méthode des éléments finis. Ceci nous permettra d'avoir une approche des grandeurs locales au niveau du transformateur. La méthode des éléments finis est fortement développée, car elle s'adapte aux études des géométries complexes et non linéaires. En vu de sa capacité d'exécution, qui est relativement simple a mettre en œuvre, elle est l'objet de traitement de plusieurs domaines d'études.

Notre mémoire est construit comme suite :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du transformateur de puissance d'une manière générale, en rappelant les différentes relations régissant son fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des lois de l'électromagnétisme qui se résume aux équations de MAXWELL, relations du milieu et les différents modèles des phénomènes électromagnétiques qui en découle. Et enfin pour mieux se familiariser avec le logicielle (**FEMM**) de calcule nous allons donner un aperçu général sur son fonctionnement.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude de l'influence des composants actifs (bobine de réglage et noyau du circuit magnétique) du transformateur sur les paramètres électromagnétiques de celui-ci.

Nous terminerons notre étude par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS SUR
LES
TRANSFORMATEURS
DE PUISSANCE

Introduction

Le transformateur de puissance, est le dispositif qui a permis le développement, puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.

La première fonction d'un transformateur a été l'élévation de la tension de transport, afin de réduire le courant et donc réduire les pertes joules générées dans les lignes. De ce fait il est nécessaire, à l'entrée d'une usine ou d'un bâtiment habitable, de disposer d'une machine permettant d'adapter le niveau de la tension de distribution aux dispositifs qui vont utiliser l'énergie électrique. C'est le rôle des transformateurs de distribution.

L'élévation de la tension est bien entendue allée de pair avec l'abaissement de la tension aux points d'utilisation. D'un point de vue plus général, un transformateur est un élément indispensable à l'interconnexion des différents réseaux d'énergie.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le transformateur, son fonctionnement et sa constitution ainsi que sa représentation générale à travers sa topologie géométrique en définissant les différents phénomènes électriques et magnétiques régissant son fonctionnement.

I.1 Constitution et principe de fonctionnement d'un transformateur :

I.1.1 Constitution du transformateur :

Le transformateur est une machine d'induction qui comporte deux parties essentielles :

- ✓ Partie active constituée par : le circuit magnétique et les enroulements

Primaire et secondaire

- ✓ Partie constructive formée : de la cuve, du couvercle et des traversées.

a) Partie active :

Les composantes actives du transformateur assurant la conversion du courant sont le circuit magnétique et les enroulements. Ce circuit magnétique, composé de tôles empilées les unes sur les autres. Sur une colonne de ce circuit magnétique est placé un enroulement réalisé par des spires de fils conducteur généralement en cuivre ou en aluminium de section circulaire ou rectangulaire. Ce bobinage est appelé enroulement primaire du transformateur.

[1]

Un second enroulement est bobiné sur le circuit magnétique, il est appelé enroulement secondaire du transformateur.

La tension secondaire à vide est proportionnelle à la tension du primaire.

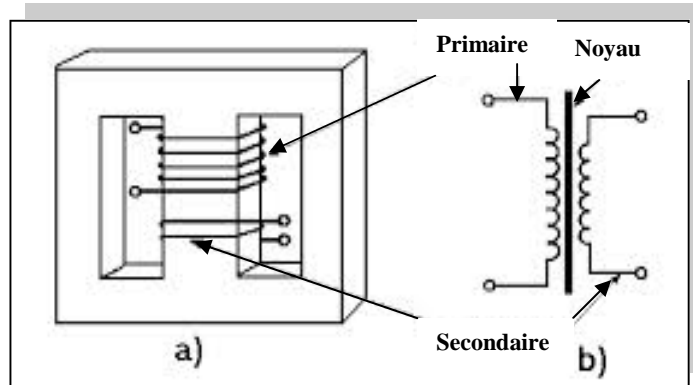


Fig. I.1 Transformateur avec noyau et son symbole

Dans la pratique les enroulements sont imbriqués l'un dans l'autre pour améliorer le rendement du transformateur

Le transformateur est représenté dans le schéma électrique par le symbole suivant :

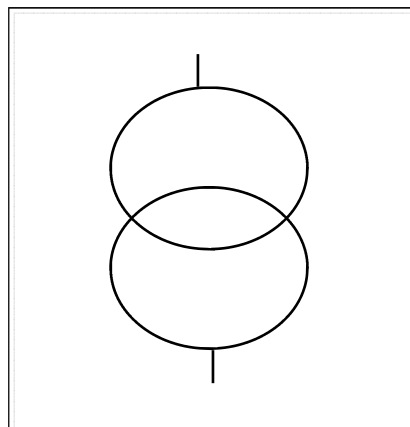


Fig. I.2 symbole du transformateur

En triphasé le circuit magnétique comporte généralement 3 colonnes.
Sur chaque colonne, un enroulement primaire est imbriqué avec un enroulement secondaire.
Les trois enroulements secondaires sont reliés ensemble par des barres de couplages.
On fait de même pour les enroulements primaires.

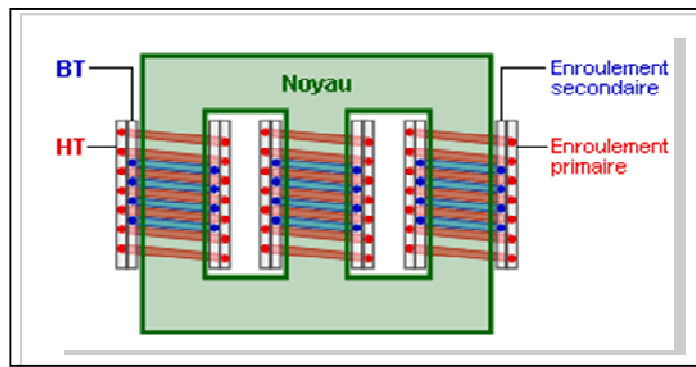


Fig. I. 3 Circuits magnétiques du transformateur triphasé

a.1) Les enroulements :

Les enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- Il faut diminuer les intervalles entre les enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique .Ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégage sous forme calorifique.
- Les enroulements doivent résister à l'élévation de température, les courts-circuits et les surtensions lors du fonctionnement de transformation [3]

a.1.1) Enroulement primaire:

Il sert à créer un champ magnétique alternatif. Cet enroulement est soumis à une tension élevée et une intensité de courant faible, ce qui nécessite une section faible et un nombre de spires important.

a.1.2) Enroulement secondaire:

L'enroulement secondaire produit un courant induit, ce courant se caractérise par une forte intensité. Cette caractéristique impose une section des conducteurs relativement importante et un nombre de spires limité.

NB : ces définitions sont valables pour le cas d'un transformateur abaisseur).

a.2) Circuit magnétique :

Le circuit magnétique d'un transformateur a pour but de fournir un chemin de basse reluctance pour le flux magnétique qui lie les enroulements primaires et secondaires. Afin d'optimiser le passage de cette induction avec un minimum de matière, le circuit magnétique est fabriqué avec des matériaux de haute perméabilité, ce qui augmente son efficacité de transformer l'énergie électrique.

Dans le but de diminuer les courants de Foucault, le noyau est fabriqué avec un matériau ferromagnétique en feuille de tôles empilées.

Le circuit magnétique se présente généralement sous deux formes :

a.2.1) Circuit magnétique classique :

Le circuit magnétique est fermé simplement à travers la culasse comme le montre la figure I.4

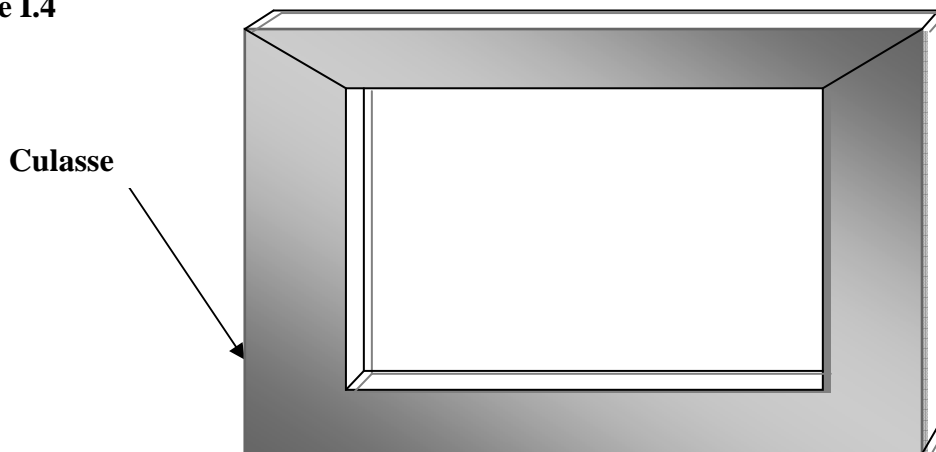


Fig. I.4 : Circuit magnétique classique

a.2.2) Le circuit magnétique cuirassé :

Le circuit magnétique, représenté sur la **figure I.5** est fermé à travers les deux colonnes de fermeture. [9]

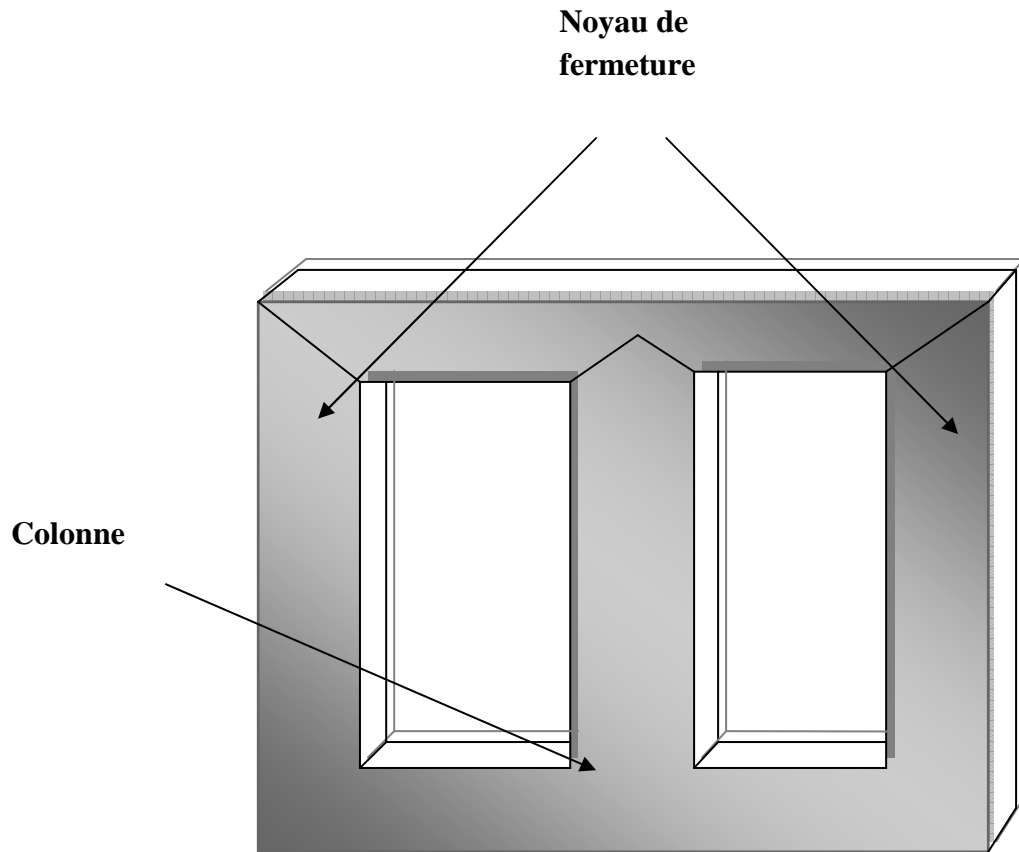


Fig. I.5 : Circuit magnétique cuirassé

b) Partie constructive :

Le transformateur comprend des éléments mécaniques appelés pièces constructives, qui ont pour rôle de fixer et de refroidir la partie active.

b.1) La cuve et le couvercle :

b.1.1) La cuve :

La cuve sert de support à la partie active, car elle assure le maintien mécanique du circuit magnétique. Elle joue le rôle de réservoir, car elle contient le liquide diélectrique qui isole le circuit magnétique du milieu extérieur.

La cuve doit répondre aux normes et aux exigences liées à la résistance et à la rigidité et ce la pour éviter sa déformation sous l'effet de poids de la partie active.

Elle doit avoir une bonne étanchéité, pour qu'il ne puisse pas y avoir de fuite du liquide du diélectrique qui est très inflammable et qui peut provoquer un incendie au transformateur.

Les liquides diélectriques se répandant, risquent d'occasionner une pollution de la nappe phréatique et occasionner une catastrophe écologique.

Pour faciliter le refroidissement du transformateur, la surface de contact avec l'air doit être assez grande et surtout de forme ondulée.

b.1.2) Le couvercle :

En plus de son rôle d'assurer la fermeture de la cuve, il sert de support aux accessoires ou pour la fixation des appareilles de protection.

b.2) Les traversées :

Elles permettent de faire passer les conducteurs des enroulements au circuit extérieur et de les isoler. Elles sont fabriquées en porcelaine fixés sur le couvercle ou en papier imprégné afin d'éviter les arcs électriques dû aux tensions élevées des transformateurs.

I.1.2 Isolement :

L'isolement de la partie active est d'une importance majeure et déterminante pour le fonctionnement du transformateur pour cela les conducteurs, les bobines et les connexions doivent être isolés entre eux, avec la masse, le circuit magnétique, la cuve et le couvercle.

I.1.2.1 Isolement des conducteurs :

L'isolement des spires est réalisé avec du vernis ou du papier ou les deux en même temps.

I.1.2.2 Isolement des bobines :

L'isolation des bobines basse tension du circuit magnétique est réalisée par un tube isolant avec ou sans cales, monté sur la colonne du circuit magnétique.

Entre bobines basse tension et haute tension, l'isolement se fait à l'aide d'un tube en papier avec cales. Entre bobines haute tension voisines, on utilise un écran plat presspahn ou en papier bakelise qui est fixé à chaque angle.

Enfin, entre bobines et culasse, l'isolement se fait à l'aide des cales, en bois imprégné et de cornières en presspahn rejoignant les tubes écrans.

L'isolement est renforcé par imprégnation dans l'huile.

La **figure I.6** représente un schéma de l'extérieur d'un transformateur qui permet de voir les différents éléments constituant le transformateur :

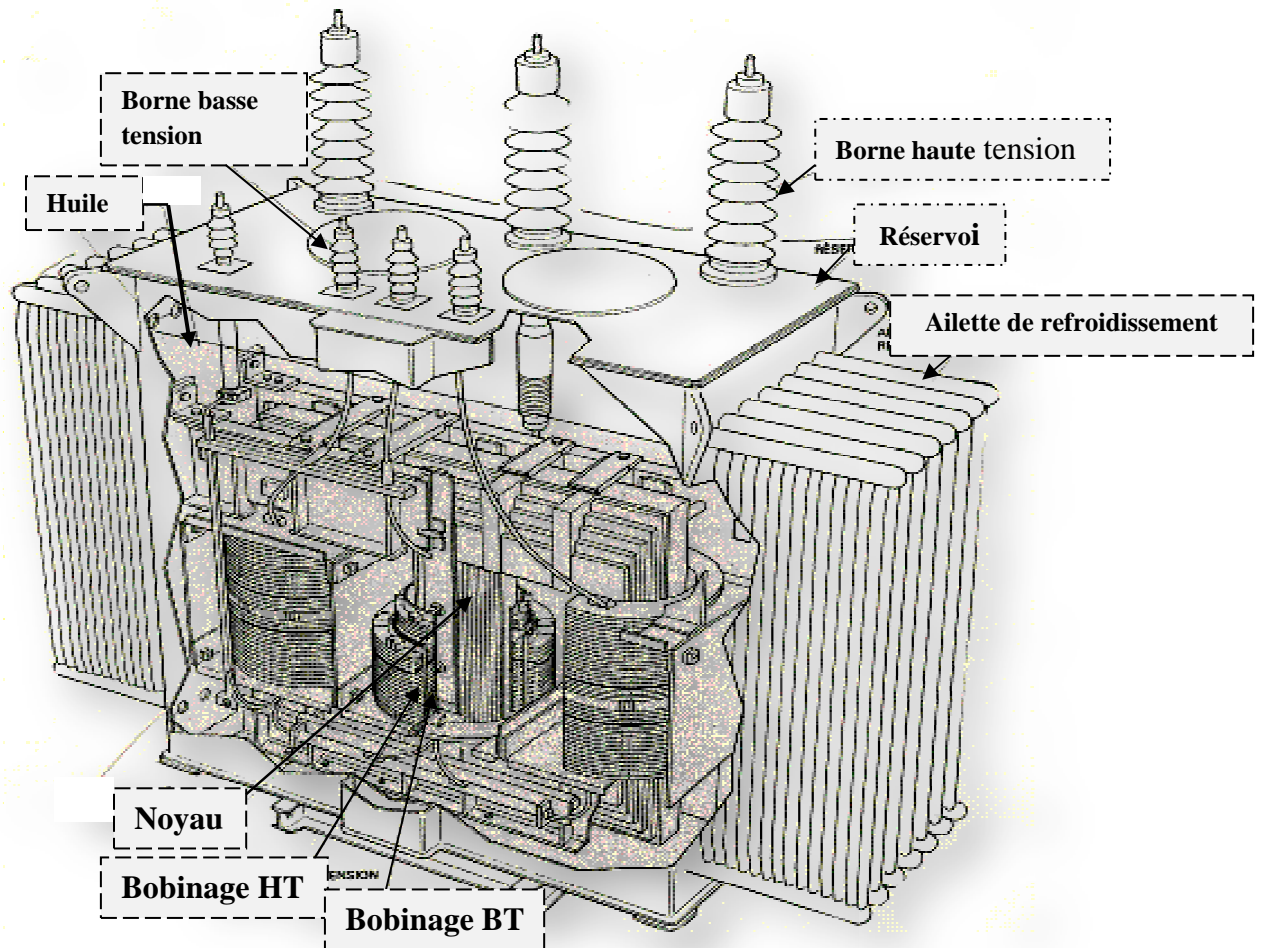


Fig. I.6 : Schéma de l'extérieur d'un transformateur

I.1.3 Principe de fonctionnement du transformateur :

Sur les colonnes du circuit magnétique du transformateur sont disposés deux enroulements séparés. L'un, B_1 , est appelé primaire. Il fonctionne comme un récepteur. Le courant I_1 qu'il reçoit, engendre dans le circuit magnétique une induction alternative dont le flux à travers une section du circuit magnétique est Φ . L'autre, B_2 , appelé secondaire, est traversé par Φ Il est donc le siège d'une f.é.m. capable de fournir à un récepteur placé à ses bornes une puissance électrique alternative. Si le circuit magnétique est soigneusement réalisé, le flux traversant une spire est sensiblement le même au primaire et au secondaire ainsi, aux bornes d'une spire, il existe la même f.é.m. e au primaire et au secondaire. Soit n_1 le nombre de spires du primaire et n_2 le nombre de spires du secondaire. La f.é.m. totale est $e_1 = n_1 \cdot e$ au primaire et $e_2 = n_2 \cdot e$ au secondaire. Or, e_1 est très peu différent de u_1 , tension appliquée au primaire. De même, e_2 est sensiblement égal à u_2 , tension secondaire. Si U_1 et U_2 sont les valeurs efficaces de u_1 et de u_2 , on obtient :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I.1})$$

Si l'on néglige les pertes (dont la valeur relative peut être très faible), on peut aussi écrire $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$,

Soit encore :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = m \quad (\text{I.2})$$

m Étant appelé *rapport de transformation* du transformateur. Si $m > 1$, le transformateur est élévateur de tension ; si $m < 1$, il est abaisseur de tension. Remarquons que l'intensité est abaissée dans le rapport où est élevée la tension et vice versa.

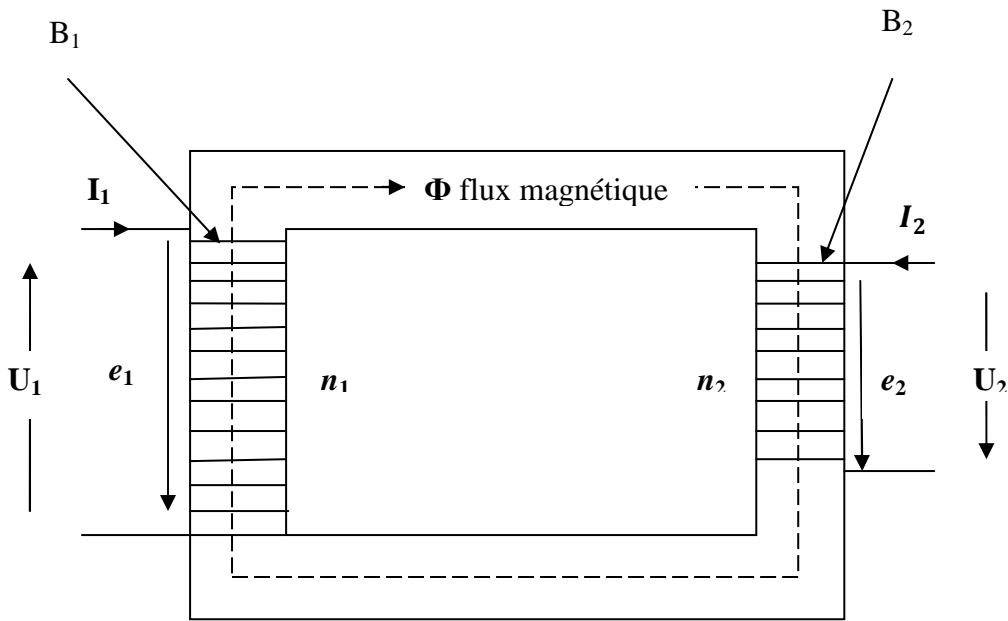


Fig. I.7: Schémas montrant le principe de fonctionnement du transformateur. [3]

I.1.4 Couplage des enroulements du transformateur :

Le couplage, est la façon dont est raccordé l'enroulement primaire et secondaire de telle sorte à constituer un groupe de connexion.

Le choix du couplage dépend de l'utilisation du type de transformateur. Les trois enroulements secondaires, sont reliés ensemble par des barres de couplage, on fait de même pour les enroulements primaires.

Les couplages généralement utilisés dans les réseaux électriques, sont le triangle (D), l'étoile (Y), ou le zigzag (Z).

Le couplage étoile, permet la sortie du point neutre, très utilisé en BT. Deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée.

Dans le couplage zigzag, Chaque enroulement comprend deux demi bobines placées sur des noyaux différents, les sorties de la deuxième demi bobine sont inversées.

Les f.e.m. de chaque demi-bobine sont déphasées de 120° . Avec le couplage zigzag, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseaux BT déséquilibrés.

Dans le couplage triangle il est nécessaire d'avoir plus de spires par colonnes que l'enroulement étoile, il est aussi caractérisé par l'absence du point neutre.

La **figure I.8** montre les différents modes de couplage utilisés

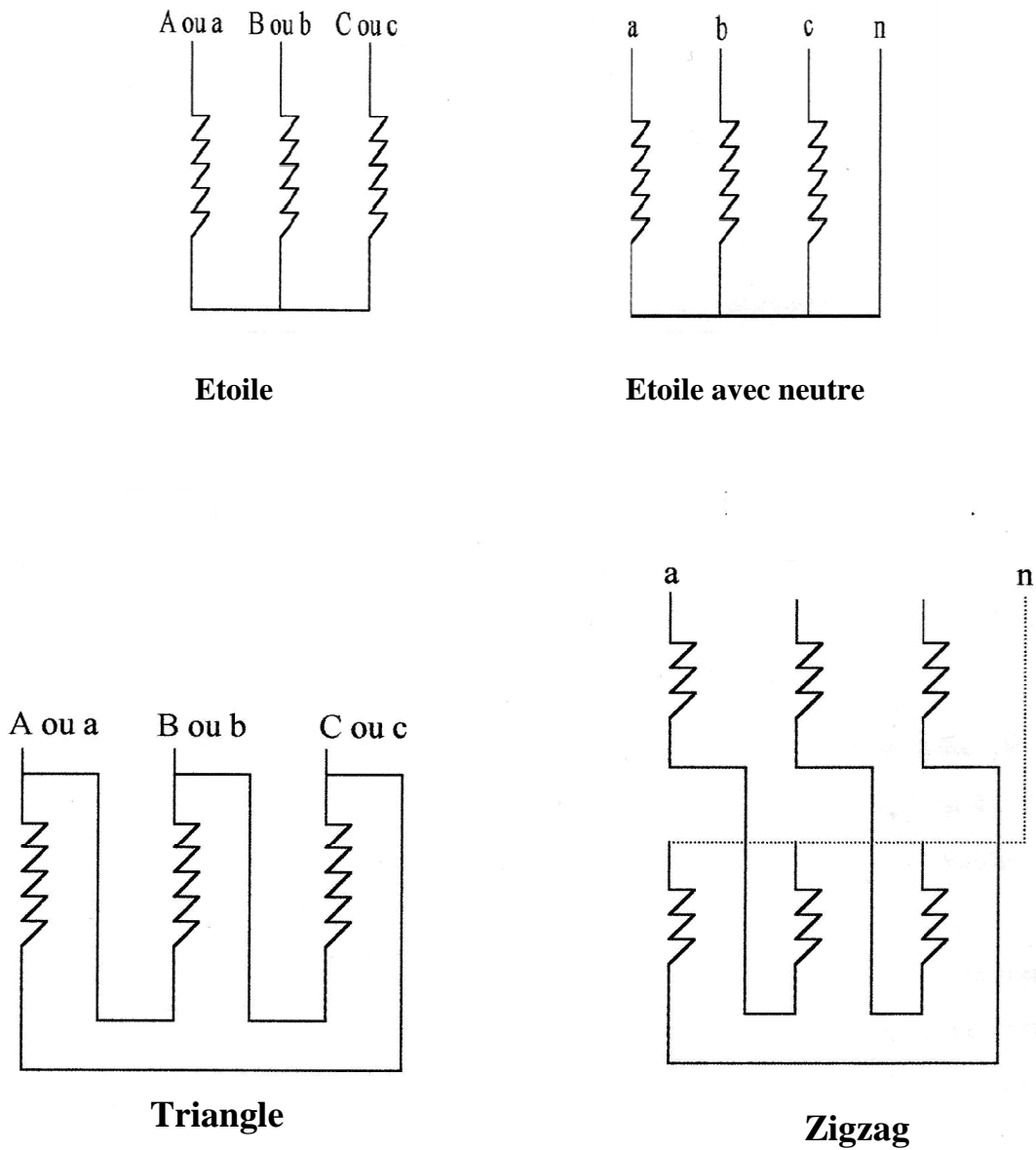


Fig. I.8 : Différents mode de couplages [2]

I.1.5 Indice horaire :

L'indice horaire est un nombre entier (compris entre 0 et 11) définis par le rapport :
$$h = \theta / \frac{\pi}{6}$$
 avec $\theta > 0$ dans le sens horaire étant le déphasage entre la tension simple primaire et secondaire homogène ou la tension simple primaire est l'origine des phases h dépend du mode de couplage, du sens des enroulements des bobines, de la permutation des tensions d'alimentation. [4]

I.1.6 Couplage des transformateurs :

Comme pour tous les récepteurs triphasés où la notion du couplage, on doit indiquer le type de couplage réalisé ainsi que le déphasage entre le système de tension primaire et le système de tension secondaire.

I.1.7 Conditions de couplage :

➤ Puissance :

La puissance totale disponible est la somme des puissances des transformateurs. Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit.

➤ Réseau :

Les transformateurs doivent être alimentés par le même réseau.

➤ Connexions et indices horaires :

Les transformateurs doivent avoir les mêmes longueurs de connexion surtout côté BT mais aussi un même indice horaire de couplage, en d'autre termes une compatibilité.

➤ Tensions :

Les tensions de court-circuit sont égales à **10 %** près ; tensions secondaires très peu différentes selon la charge (**0,4 %**).

I.1.8 Rapport de transformation :

On désigne **rapport de transformation** par le rapport des nombres de spires entre les enroulements secondaires et primaires $m = \frac{N_2}{N_1}$ il est aussi le rapport de la tension nominal et de la tension secondaire à vide il est donné par $m = \frac{U_{20}}{U_1}$

Le rapport de transformation dépend du nombre de spires et des couplages des enroulements. [4]

I.1.9 Prise de réglage (enroulement de réglage) :

Les transformateurs sont plus au moins soumis aux variations de tension dus aux chute de tension dans les lignes .pour tenir compte, le transformateur comporte un enroulement ajouté aux deux enroulements primaire et secondaire dans le but de réguler la tension ainsi éviter que le transformateur soit endommagé.cet enroulement est connecté en série avec la bobine HT.

Notons que pour un couplage étoile, il est très facile d'ajouter ou de retrancher ces spires a l'enroulement du cote du point neutre.

Pour le réglage, on emploie un commutateur approprié qui pourra être manœuvré en charge ou à vide.

Notons encore que l'ajout de spires, peut engendrer une variation de la tension de l'ordre de 5 % au secondaire.

I.2 Circuit équivalent d'un transformateur :

Une représentation d'un transformateur réel consiste en un transformateur idéal auquel se rattachent diverses résistances et réactances. R_1 R_2 Représentent respectivement les résistances des enroulements primaire et secondaire.

Le schéma équivalent de la **fig. I.9** représente le modèle à 50 HZ qui décrit le phénomène dissipatif à savoir les pertes fer et les pertes joules.

R_m , Résistance du circuit magnétique, représente les pertes par hystérésis et par courants de Foucault (pertes fer).

$L1$ Et $L2$ représentent les inductances de fuites respectives des enroulements primaire et secondaire.

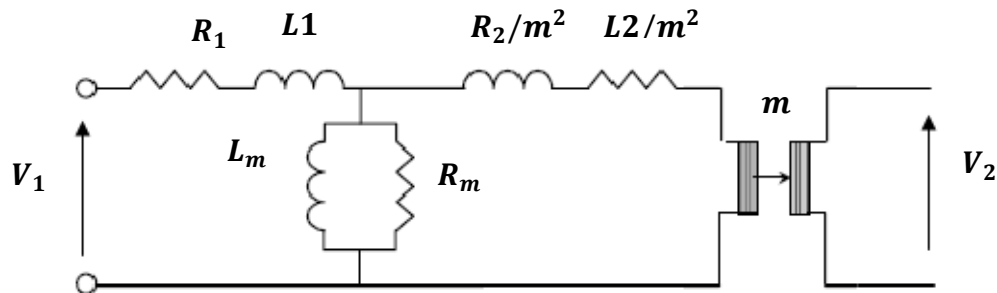


Fig. I.9 : Schéma équivalent d'un transformateur tenant compte des effets dissipatifs

NB : les impédances des enroulements secondaires sont ramenées au primaire et cela pour faciliter l'analyse du circuit.

I.3 Les pertes dans les transformateurs :

I.3.1 Les pertes à vide :

I.3.1.1 Pertes Joule :

C'est la dissipation d'énergie sous forme de chaleur, provoquée par le passage du courant électrique dans les enroulements primaire et secondaire et les parties de connexion.

Elles sont facilement calculables, si on connaît la résistance des enroulements (généralement en cuivre).

On peut aussi les mesurer lors de l'essai de la machine en court circuit (l'induction B est alors négligeable ce qui rend les pertes fer voisinent de zéro).

I.3.1.2 Pertes fer :

La variation du flux magnétique dans un transformateur, génère souvent dans le matériau de celui-ci une dissipation d'énergie apparaissant sous forme de chaleur non récupérable d'où l'expression de pertes magnétique pour désigner ce phénomène.

La magnétisation de tôles, accompagnées de ces pertes d'énergie, est provoquée par les pertes par hystérésis et par les pertes par courant de Foucault.

Cette puissance perdue dans les circuits magnétiques, soumis à une induction alternative, se traduit par un échauffement du matériau, ces pertes existent dans les machines à courant alternatif, mais aussi dans le rotor des machines à courant continu. Elles diminuent le couple utile d'un moteur, comme s'il y avait frottement fluide du rotor dans un bain d'huile. On les mesure toujours par un essai à vide, c'est-à-dire lorsque l'induction dans le fer atteint des valeurs maximales que l'on peut retrouver en charge (secondaire d'un transformateur ouvert par exemple).

a) Pertes par hystérésis :

Elles sont dues au fait que la magnétisation du matériau n'est pas totalement réversible, elles dépendent à la fois du courant magnétisant et de la mémoire du matériau

La surface du cycle s'exprime en Joule/m³. Elle correspond à un échauffement du matériau dû aux frottements des moments magnétiques, orientés dans une direction pour $+H_{max}$ et dans la direction opposée pour $-H_{min}$, c'est-à-dire une demi période plus tard (en courant alternatif).

Pour déterminer la valeur des pertes hystérésis, on utilise la formule suivante :

$$P_H = C_H \cdot B_m^2 \cdot f \quad [\text{W / KG}] \quad (\text{I.3})$$

f : Fréquence de l'alimentation

C_H : Coefficient d'hystérésis (dépend de la nature du matériau)

B_m : Valeur maximal de l'induction

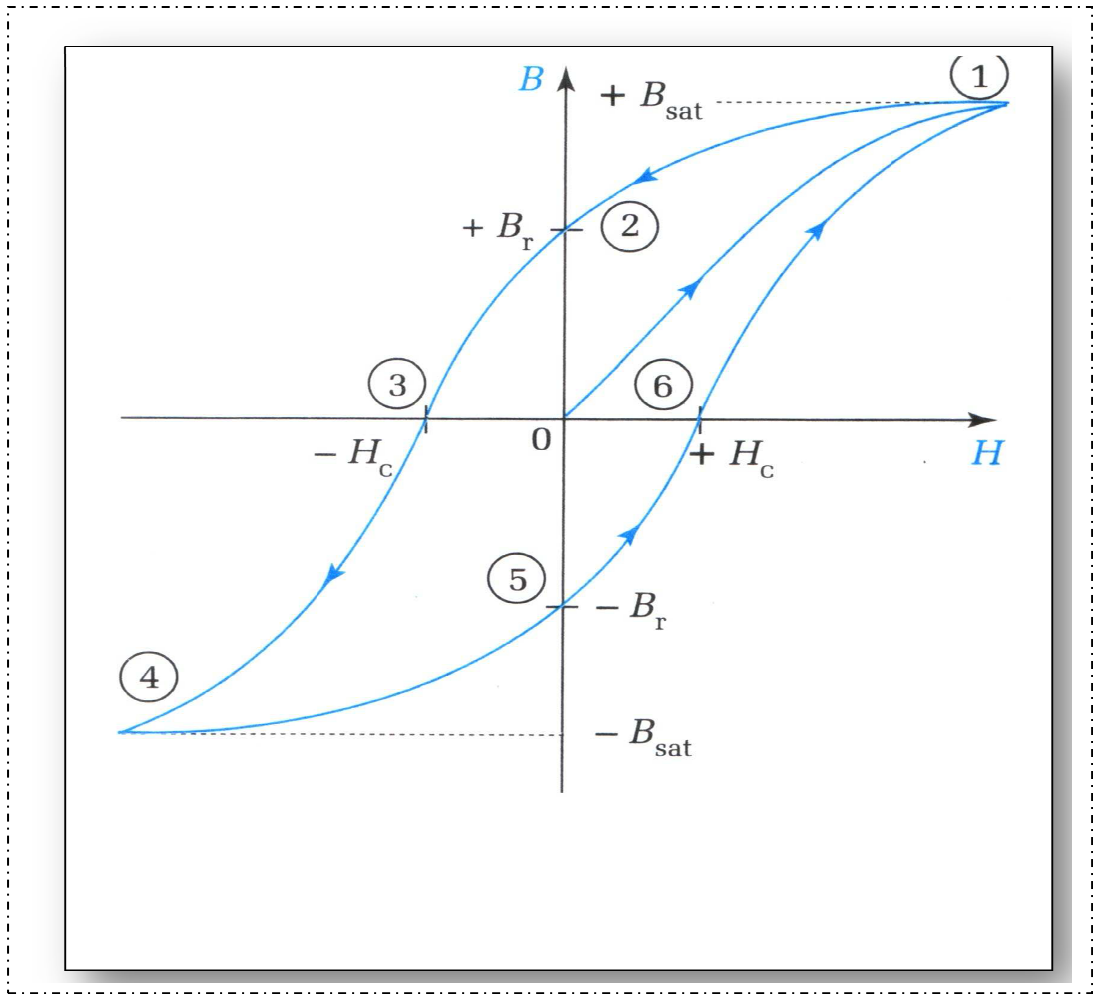


Fig. I.10 : Cycle d'hystérésis

b) Pertes par courants de Foucault :

Les courants de Foucault, dans le transformateur, sont provoqués par des courants induits dans le matériau magnétique conducteur, perpendiculairement aux lignes de champ. Ces derniers sont d'autant plus importants que la surface traversée par le champ magnétique est grande.

Les pertes par courant de Foucault, dépendent du carrée de l'épaisseur de la tôle.

La formule suivante décrit les pertes par courant de Foucault :

$$P_f = K_2 \cdot f^2 \cdot e^2 \cdot B^2 / \rho \quad [\text{W /Kg}] \quad \text{(I.4)}$$

Avec :

k_2 : Constante liée au matériau

e : Epaisseur des feuilles

ρ : Résistivité électrique

I.3.2 Les pertes en court circuit :

Dans le cas d'un court circuit d'un transformateur, les pertes fer sont négligées car le flux principal dans le noyau est très petit, en revanche les pertes joules seront toujours considérées, ces pertes dépendent de l'intensité des courants et de la résistance des enroulements.

La formule suivante décrit les pertes joules :

$$P_j = n \cdot R \cdot I_{eff}^2 \quad [W] \quad \text{(I.5)}$$

Avec :

I_{eff} : Courant efficace

n : Le nombre d'enroulements

R : Résistance des enroulements

I.4 Equation générales du transformateur

I.4.1 Equation électrique au primaire

Selon l'hypothèse de **Kapp** le schéma relatif au primaire équivalent se traduit par le suivant :

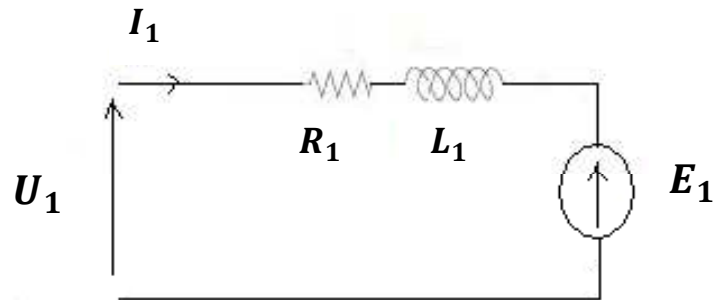


Fig. I.11 : Circuit équivalent au primaire

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + jL_1 \omega I_1 + E_1 \quad (\text{I.6})$$

Avec :

U_1 : Tension au primaire [V]

I_1 : Courant au primaire [A]

R_1 : Resistance de l'enroulement primaire [Ω]

L_1 : Inductance de l'enroulement primaire [H]

E_1 : Force contre électromotrice au primaire [V]

I.4.2 Equation électrique au secondaire :

Le schéma électrique équivalent au secondaire est le suivant :

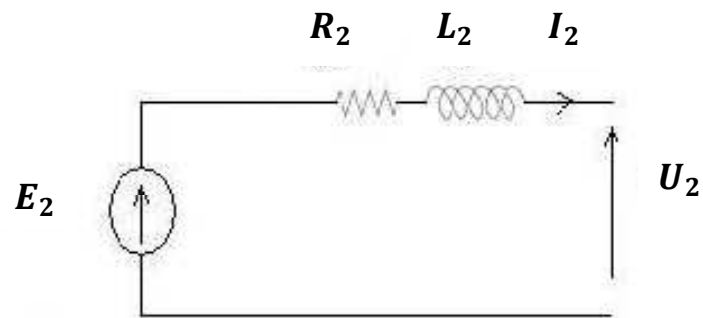


Fig. I.12 : Circuit équivalent au secondaire

$$U_2 = E_2 - R_2 I_2 - jL_2 \omega I_2 \quad (I.7)$$

Avec :

U_2 : Tension au secondaire [V]

I_2 : Courant au secondaire [A]

R_2 : Résistance de l'enroulement secondaire [Ω]

L_2 : Inductance de fuite de l'enroulement secondaire [H]

E_2 : Force électromotrice au secondaire [V] [1]

Détermination des paramètres du transformateur :

Les éléments du circuit équivalent de la Fig. I.9 sont facilement accessibles à l'aide de deux essais expérimentaux.

I.5 les différents essais :

I.5.1 Essai à vide sous tension nominale :

Le transformateur étant à vide, on l'alimente sous tension nominale en mesurant les valeurs efficaces des tensions primaires U_{10} , secondaires U_{20} , du courant primaire à vide I_{10} et la puissance active P_{10} .

On déduit :

- ✓ La valeur du rapport de transformation $m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{U_{20}}{U_{10}}$;
- ✓ La puissance de pertes fer : $P_{fer} = P_{10} = \frac{U_{10}^2}{R_m}$ permet de déterminer R_m ;
- ✓ La valeur de l'inductance L en considérant : $Q_{10} = \frac{U_{10}^2}{L_m}$

Remarque :

- Le courant à vide étant non sinusoïdal, devra être mesuré par un ampèremètre donnant la valeur efficace vraie.
- La puissance à vide comprend également les pertes joules primaire, qui lors de cet essai sont négligeables devant les pertes fer.

I.5.2 Essai en court circuit sous tension réduite au courant nominale :

Les transformateurs dont le secondaire est en court-circuit, sont alimentés sous tension réduite et cette dernière est réglée pour obtenir des courants dans les bobinages voisins des courants nominaux du transformateur.

On mesure alors la puissance active P_{1CC} consommée lors de cet essai ainsi que les valeurs efficaces du courant secondaire I_{2CC} et de la tension primaire U_{1CC} .

I.6 Les paramètres d'exploitation :

Les paramètres d'exploitation sont :

- Le rendement du transformateur η qui est défini comme étant le rapport de la puissance débitée par le secondaire P_2 et la puissance absorbée par le primaire P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{fer} - P_J}{P_1} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$P_{fer} = P_H + P_F$: les pertes dans le fer

P_J : Les pertes dans le cuivre (les enroulements)

- La chute de tension, ΔU , qui est donnée par la différence des tensions secondaire à vide et en charge U_2 , elle dépend généralement de la valeur et de la nature de la charge

$$\Delta U = U_{20} - U_2 \quad (\text{I.9})$$

I.7 Protection des transformateurs :

Le transformateur subit toutes les perturbations, aussi bien des réseaux situés en amont (coup de foudre, coupure de ligne, etc..) qu'en aval.

Les Variations anormales de la température ambiante ou de la charge, peuvent provoquer un échauffement des enroulements susceptible de compromettre la durée de vie de l'appareil.

Les systèmes de protection sont :

- Les appareils de protection contre les défauts situés en amont, généralement sur le réseau du distributeur d'énergie (parafoudre et limiteur de surtension).
- Les cellules de protection par fusible ou par disjoncteur, contre les courts-circuits.

I.8 Plaque signalétique :

La plaque signalétique, permet d'obtenir rapidement des informations détaillée sur le transformateur utilisé.

I.8.1 Contenu :

- Rapport de la tension nominale primaire à la tension nominale secondaire.
- Fréquence d'opération(f).
- Puissance apparente nominale.
- Impédance équivalente en unités relatives.
- Température d'opération.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une présentation générale du transformateur de puissance, sa constitution, son principe de fonctionnement ainsi que les paramètres techniques en rappelant les différentes équations magnétiques régissant son fonctionnement, ainsi que les différents schémas équivalents.

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser sur le comportement électromagnétique des transformateurs. Pour se faire nous allons nous rapprocher, durant, d'une méthode de calcul par élément finis, afin de résoudre des problèmes liés à l'électromagnétisme.

Introduction :

Tous les phénomènes électromagnétiques sont régis par des équations aux dérivées partielles, ces phénomènes se trouvent dans des régions de géométrie très variée (exemple : machines, transformateurs, etc. ...)

Pour résoudre ces équations, on doit choisir soit une méthode de résolution analytique ou numérique.

Notre choix se porte sur une méthode de résolution numérique qui s'est développée depuis l'avènement de l'informatique ; c'est la méthode des éléments finis, cette dernière permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial à partir d'une discrétisation du domaine d'étude sur lequel les équations de Maxwell sont résolues

L'utilisation de la méthode des éléments finis est aujourd'hui courante et son utilisation est très répandue et elle est très sollicitée.

Cette méthode très multidisciplinaire présente de multiples facettes :

- Compréhension du problème physique étudié et connaissance intuitive de la nature de la solution recherchée ;
- Mise en équation du phénomène physique sous la forme d'équations aux dérivées partielles et sous la forme d'écriture faible dites variationnelles ou intégrales ;
- Techniques de discrétisation, conduisant à un modèle discret ou algébrique ;
- Méthodes d'intégration numérique de fonctions de plusieurs variables, de résolutions de systèmes d'équations algébriques et différentielles, linéaires et non linéaires ; [4]

Dans notre chapitre, nous traduirons le problème des phénomènes électromagnétiques en écriture mathématique (modèle mathématique), ensuite nous présenterons la méthode des éléments finis, que nous allons ensuite appliquer, dans le troisième chapitre, pour le calcul électromagnétique des transformateurs de puissance, en utilisant un logiciel de calcul qui est : F.E.M.M **version 3.4** (finite element method magnetic).

II. Champs électromagnétiques, Mise en équations et formulations :

II.1. Importance du champ électromagnétique :

Les appareillages électrotechniques à haute tension, sont soumis durant leur fonctionnement à l'action de champs électromagnétiques (électriques ou magnétiques). Dans les transformateurs de puissances, règne un champ électrostatique important. La connaissance du champ, permet donc dans tout appareil électromagnétique d'avoir accès au calcul des performances et du fonctionnement de ce dernier en régime permanent ou transitoire.

En effet autour du circuit magnétique, la valeur du champ, permet d'apprécier la possibilité de tenue diélectrique

Donc dans de nombreuses étapes du processus de conception d'un transformateur de puissance, l'évaluation des champs électriques et magnétiques apparait comme un travail nécessaire. [7]

II.1.2 Equations et modèles mathématiques des phénomènes électromagnétiques :

II.1.2.1 Equations de maxwell :

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques classiques, sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell auxquelles il faut associer les conditions aux limites et des conditions d'interfaces, et par les trois relations du milieu considéré

Nous disposons alors, du système des sept équations suivantes :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

Sous la forme intégrale ,l'équation (II.1) s'écrit :

$$\iint \overrightarrow{rot} \vec{E} \cdot \overrightarrow{ds} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \overrightarrow{ds} = - \frac{d\phi}{dt} \quad \text{C'est la Loi de Maxwell-Faraday}$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

Sous la forme intégrale, l'équation (II.2) s'écrit :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} \quad \text{C'est la loi de Maxwell-Ampère}$$

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

Sous la forme intégrale, l'équation (II.3) s'écrit :

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \text{C'est la Loi de conservation de flux}$$

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Sous la forme intégrale, l'équation (II.4) s'écrit :

$$\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \rho \cdot dV = Q_i \quad \text{C'est la Loi de Maxwell-Gauss}$$

II.1.2.2 Lois de comportement relatives aux milieux :

Une relation constitutive, décrit localement le comportement des grandeurs électromagnétiques dans un matériau donné .Elles sont données dans le cas le plus générale :

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

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

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

Avec

\vec{D} : Vecteur induction électrique [A.S/m²].

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

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

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

\vec{J} : Vecteur densité de courant [A/m²].

ρ : Densité volumique de charge [C/m³]

ϵ : Permittivité électrique absolue	[F /m]
μ : perméabilité magnétique	[H/m]
t : Variable temporelle	[s].
μ_0 : Perméabilité magnétique du vide, égale a $4.\pi. 10^{-7}$	[H/m].
μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré	
ϵ_0 : Permittivité électrique du vide, égale à $\frac{1}{36.\pi} . 10^{-9}$	[F /m]
ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu	

$$\epsilon = \epsilon_0 . \epsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 . \mu_r$$

La relation du milieu, exprime le lien entre le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} (**équation (II.5)**) d'une part, a travers la perméabilité magnétique ainsi que celui existant entre le déplacement \vec{D} et le champ électrique \vec{E} , d'autre part, a travers la permittivité électrique ϵ (**équation (II.6)**)

Les relations **(II.5)** et **(II.6)** représentent les équations des deux milieux respectifs magnétique et diélectrique

D'après **l'équation (II.2)** le champ magnétique rotationnel est produit par un courant de conduction ou un champ électrique variable

La relation **(II.1)** traduit qu'un champ électrique rotationnel est engendrée par la variation de l'induction magnétique en fonction du temps, elle décrit aussi tous les phénomènes d'induction et montre qu'un champ magnétique variable peut créer un champ électrique à circulation non nulle.

La relation **(II.3)** montre qu'elle est indépendante des sources.

La signification précise que le flux de \vec{B} a travers toute surfaces fermée est nul .C'est une propriété intrinsèque de \vec{B} qui montre que le champ magnétique ne peut diverger a partir de point de l'espace ou encore qu'il n'existe pas de charge magnétique

II.1.2.3 La loi d'ohm :

Cette loi exprime la densité de courant \vec{J} dans un milieu conducteur en fonction du champ électrique \vec{E} , la loi s'applique à tous milieu représentant une conductivité électrique

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Milieu conducteur}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad \text{Milieu conducteur avec source}$$

$$\vec{J}_s: \text{Densité de courant source [A/m}^2\text{]} \quad [6]$$

II.1.2.4 relation de passage :

Les champs de vecteurs électriques et magnétiques des différents milieux sont liés à l'interface par les relations de continuité. Soit deux milieux M_1 et M_2 et soit N_{12} le vecteur normal à la surface du milieu M_1 vers le milieu M_2 (**Fig. (II.1)**)

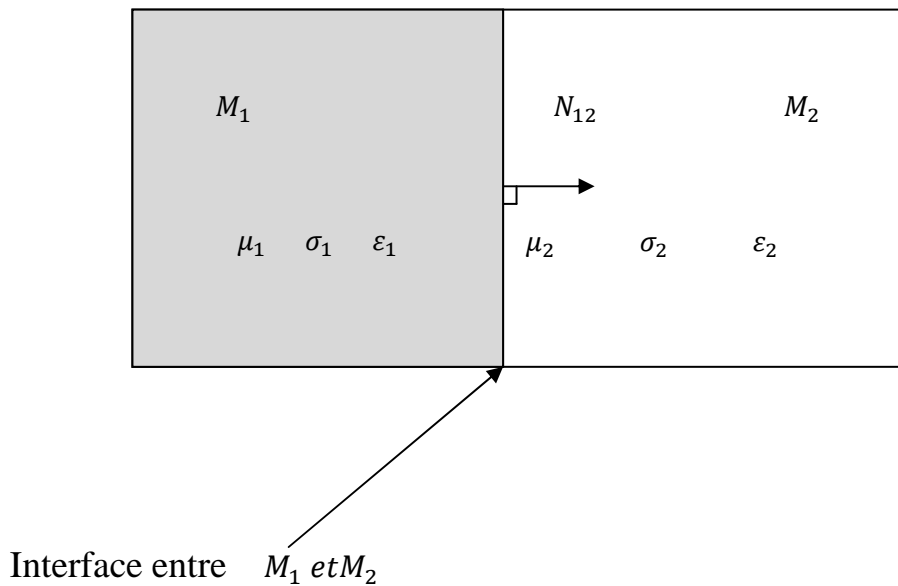


Fig. II.1 interface entre deux milieux

La discontinuité du milieu de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} dû aux densités de courants surfaciques \vec{K}_s

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{N} = \vec{K}_s \quad (\text{II.8})$$

La conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E}

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{N} = 0 \quad (\text{II.9})$$

La discontinuité de la composante du déplacement électrique \vec{D} due aux charges surfaciques

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{N} = \rho_s \quad (\text{II.10})$$

La conservation de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B}

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{N} = 0 \quad (\text{II.11}) \quad [6]$$

II.1.2.5 Modèle électrostatique :

Il décrit tous les dispositifs dans lesquels le champ électrique est produit par des charges dont la répartition et la valeur ne varient pas en fonction du temps

Les équations correspondantes s'écrivent :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = \vec{0} \quad \text{car} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \right) \quad (\text{II.12})$$

$$\overrightarrow{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.14})$$

$$\overrightarrow{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{II.15}$$

La relation (II.12) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V , ou tension électrique, telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad} V \quad \text{II.16}$$

On ne peut résoudre directement les équations précédentes du fait qu'elles contiennent beaucoup d'inconnues.

Leur résolution numérique passe par un choix de variables d'états qui dépend particulièrement de la géométrie des structures (dispositifs) et du type du problème de champ (électrique ou magnétique) à étudier.

Dans le cas par exemple, d'objets suffisamment longs, ou pourvu d'une symétrie de révolution, les courants sont perpendiculaires au plan dans lequel on conduit l'étude.

Le choix comme variables d'états, du potentiel vecteur magnétique \vec{A} et du potentiel scalaire électrique V Permettent de réduire le nombre d'inconnues et rendre la résolution numérique plus souple, ces deux termes nous permettent de résoudre en termes de potentiel et de déduire les valeurs des champs électrique et magnétique.

$$\text{On a} \quad \overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\overrightarrow{rot} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

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

$$\text{Ainsi, il existe } V \text{ tel que : } \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}V$$

$$\text{Ou : } \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.17})$$

II.1.2.6. Modèle magnétostatique :

C'est lorsque la Densité volumique de charge ρ et la densité de courant J sont indépendants du temps. Le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est alors nul et les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} sont découplés on obtient alors les relations suivantes :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 J \quad (\text{II.20})$$

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{II.21})$$

La relation (II.19) permet de définir une fonction potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.22})$$

Pour que \vec{A} soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence .on ajoute alors la condition :

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.23})$$

II.1.2.7. Model magnétodynamique :

Ces modèles s'appliquent aux dispositifs électrotechniques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient en fonction du temps.

Le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ n'est plus nul ; les champs électriques et magnétique sont alors couplés par la présence des courants induits (ou courants de Foucault).

Pour représenter l'état électromagnétique en un point, on doit alors recourir simultanément au **potentiel vecteur magnétique** \vec{A} précédemment défini (car $\overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0$) et au **potentiel scalaire électrique** V . En effet, le système d'équations régissant les phénomènes magnétostatique s'écrit :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (\text{II.24})$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (\text{II.25})$$

$$\overrightarrow{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (\text{II.26})$$

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad} V \quad (\text{II.27})$$

II.2 Méthode de résolution :

II.2.1 Méthode numérique :

L'utilisation des méthodes numérique de discrétisation pour la résolution des équations mathématiques établies, consiste à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude ,compte tenu des conditions aux limites ,a celle d'un système d'équations algébriques dont la solution donne les valeurs et la distribution des grandeurs recherchées. Parmi ces méthodes on trouve la méthode de différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. La méthode des éléments est sans doute la plus utilisée car elle est plus adaptée pour traiter les géométries les plus complexes et les mieux non linéaire.

II.2 principe de la méthode des éléments finis

*Méthodes d'approximation :

Pour discrétiser les modèles complexes de phénomènes physiques, l'ingénieur dispose, à l'heure actuelle, de méthodes d'approximation permettant de résoudre la plupart des problèmes pour lesquels il n'existe pas de solution formelle.

Toutes les méthodes d'approximation ont un même objectif, remplacer un problème mathématique défini sur un milieu continu (équations différentielles ou intégrales) par un problème Mathématique discret (équation matricielle) de dimension finie que l'on sait résoudre numériquement.

La classification que nous proposons sur la **Fig. II.2** n'est pas unique. Elle permet simplement de distinguer la méthode en fonction de la démarche utilisée pour obtenir une forme intégrale.

Il est important de noter qu'un problème physique ,peut être formulé de façon équivalente en un système d'équations différentielles ou sous une formulation variationnelle.

La méthode des éléments finis, est plus générale car elle est mieux adaptée aux géométries complexes et aux matériaux non linéaires.

Dans cette méthode ,on cherche à exprimer une formulation intégrale basée sur l'une des deux approches suivantes :

- **La méthode variationnelle(ou écriture faible) :**

Le principe de la méthode, 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.

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \quad (\text{II.28})$$

$$L = W_C - W_P \quad (\text{II.29})$$

La fonction de Lagrange construite à partir de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle

W_C : Énergie cinétique

W_P : Énergie potentielle

Ω : domaine d'étude

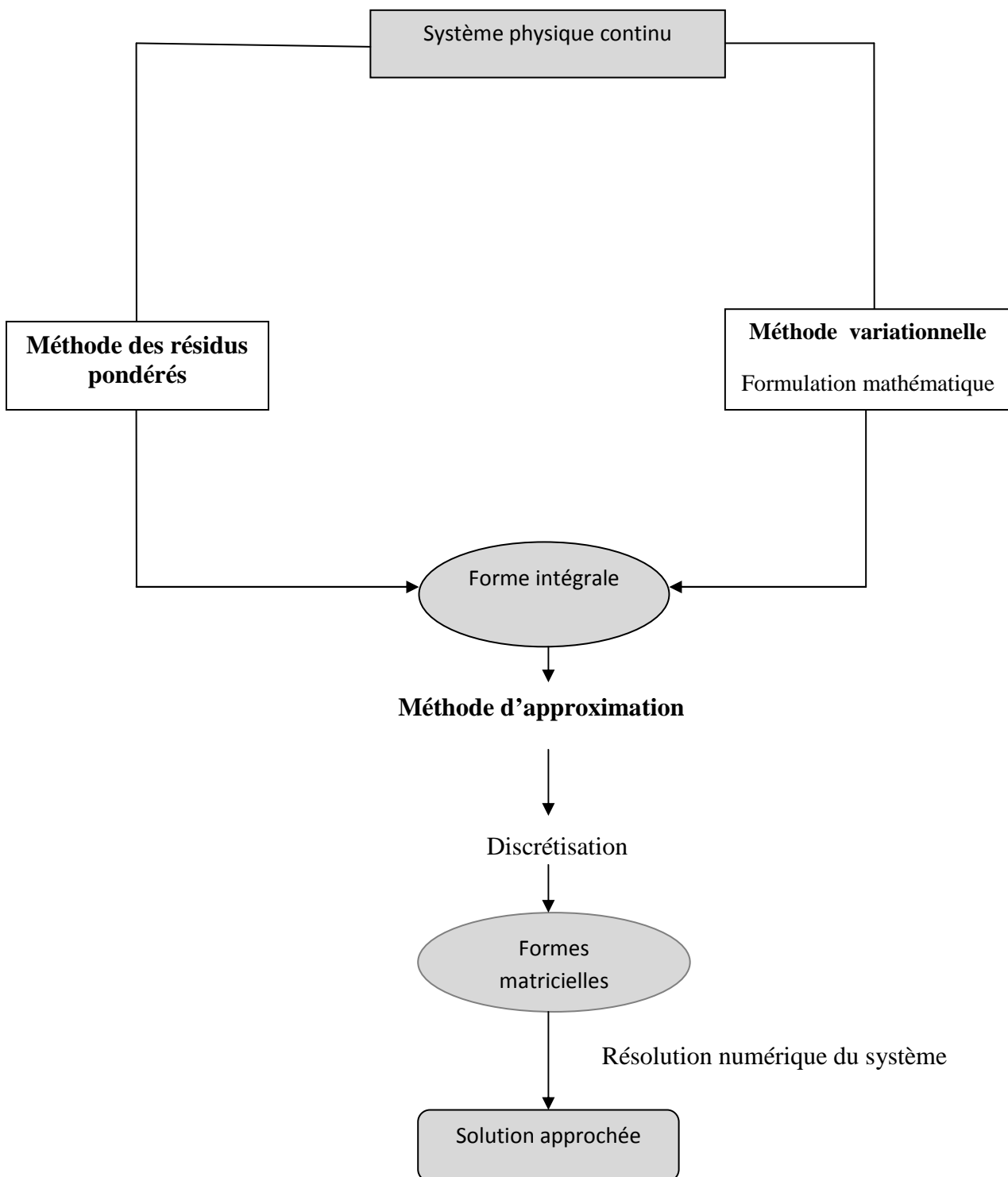


Fig. II.2 Vue synthétique des méthodes d'approximation

- **La méthode des résidus pondérés ou méthode projective :**

Cette méthode consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.

La méthode des éléments finis, consiste à subdiviser le domaine d'étude en domaines élémentaire appelés éléments finis, comme le montre la figure (II.2) et a exprimer l'inconnue sur chaque élément par les fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. L'inconnue devra vérifier globalement les conditions de continuité à l'interface et au passage d'un milieu à un autre.

Pour des structures bidimensionnelles, les éléments de maillage sont souvent des triangles, tandis que dans les problèmes tridimensionnels, les éléments son de forme tétraédrique ou prismatique.

L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités, ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme, bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre, puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important.

C'est une méthode plus générale, son application ne nécessite pas la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système, elle traite directement l'équation aux dérivées partielles qu'on veut résoudre.

L'équation à résoudre étant :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial f(A)}{\partial A_2} = \dots = \frac{\partial f(A)}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{II.30})$$

n : Nombre de nœuds du domaine d'étude

A_i : Inconnu au nœud i du domaine

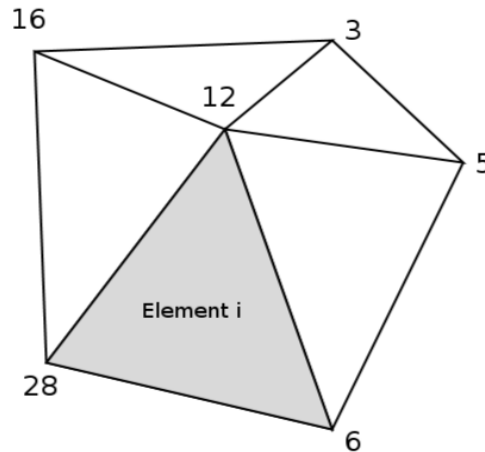


Fig. II.3 : Un domaine d'étude discrétisé en éléments finis

- **La méthode d'approximation par éléments finis** est une méthode particulière d'approximation par sous domaine qui présente les particularités suivantes :
 - L'approximation nodale sur chaque sous-domaine Ω^e ne fait intervenir que les variables nodales attachés a des nœuds situés sur Ω^e et sur sa frontière.
 - Les fonctions approchées $u^e(\mathbf{x})$ sur chaque sous-domaine Ω^e sont construite de manière a être continues sur Ω^e et elles satisfont des conditions de continuité entre les différents sous-domaines.

Définition :

Les sous –domaine Ω^e sont appelés des **éléments finis**.

Les points en lesquels la fonction approchée $u^e(\mathbf{x})$ coïncide avec la fonction $u(\mathbf{x})$ sont les **nœuds d'interpolation** ou points nodaux.

Les coordonnées \mathbf{x}_i de ces nœuds sont les **coordonnées nodales**.

Les valeurs $u_i = u^e(\mathbf{x}_i) = u_{ex}(\mathbf{x}_i)$ sont les **variables nodales**.

L'approximation par éléments finis présente deux aspects distincts :

- Il faut tout d'abord définir la géométrie de tous les éléments, ce qui est plus ou moins compliqué selon leurs formes.
- Il faut ensuite construire les fonctions d'interpolation $N_i(\mathbf{x})$ correspondant a chaque élément ce qui vérifient la continuité entre les éléments.

II.3 LES CONDITIONS AUX LIMITES :

Pour la résolution des équations aux dérivées partielles électromagnétiques, il est Inévitable d'associer les conditions aux limites du domaine d'étude à ces équations.

En électromagnétisme on a deux types de conditions :

II.3.1 Condition de Dirichlet :

Elle impose les valeurs du potentiel vecteur magnétique A aux bords du domaine d'étude, ces valeurs sont prises nulles par la considération de l'infini.

II.3.2 Condition de Neumann :

Elle est utilisée dans le cas où le système à étudier présente des plans de symétrie. Le problème impose les valeurs de A aux bords du domaine et celle de $\partial A/\partial n$ aux niveaux des plans de symétrie (plan de coupe) ou ' n ' représente la normale au plan de coupe. [7]

II.4 Classification des systèmes physiques :

*Système discret et système continu

Un système est discret s'il possède un nombre de degrés de liberté finis.

Un système est continu s'il possède un nombre de degrés de liberté infini.

NB : le nombre de degrés de liberté du système est le nombre de paramètres nécessaires pour définir \mathbf{u} à l'instant t donné.

Le comportement d'un système discret est représenté par un système d'équations algébriques. Celui d'un système continu est le plus souvent représenté par un système d'équations aux dérivées partielles associé à des conditions aux limites en espace et en temps.

Les équations algébriques des systèmes discrets peuvent être résolues par les méthodes numériques. Par contre, les équations des systèmes continus ne peuvent en général pas être résolues directement. Il est nécessaire de discrétiser ces équations, c'est-à-dire de les remplacer par des équations algébriques. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes qui peuvent être utilisées pour faire cette discrétisation

II.5 Déroulement d'une étude :

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis.

Le cadre de l'étude, c'est-à-dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée.

Supposons toutes ces conditions remplies, l'étude proprement dite est organisée de façon logique selon les étapes suivantes :

II.5.1 analyse du problème

Cette analyse doit fixer les paramètres du calcul et conduire à la réalisation d'un maillage.

Cette phase basée sur l'expérience personnelle acquise dépend de nombreuses considérations.

La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail. L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats

II.5.2 Choix du modèle

Le calcul électromagnétique par exemple a un modèle mathématique qui lui correspond

Et une famille d'éléments finis propre a elle.

II.5.3 Choix du type d'éléments

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible.

On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles.

II.5.4 Choix du maillage

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou globales. Sans oublier bien entendu le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage. [4]

II.6 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :

Avantage :

- ✓ Adaptation aux géométries complexes ;
- ✓ Prise en compte des non linéarités accrues ;
- ✓ Temps de calcul relativement avantageux ;

Inconvénients :

- ✓ Mise en œuvre relativement difficile ;
- ✓ Prise en considération de domaines infinis ;
- ✓ Présence de singularités dans le domaine d'étude. [8]

II.7 Présentation du logiciel (F.E.M.M) a travers un exemple d'application :

F.E.M.M (finite element method magnetics) est un programme conçu pour résoudre des problèmes liés à l'électromagnétisme. Il est basé sur le calcul approché, son efficacité permet de modéliser et de simuler des phénomènes électrostatiques basse fréquence.

Le calcul s'appuie sur la discrétisation en 2D et 3D des équations de maxwell par une méthode d'éléments finis, couplée à des conditions aux limites.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du logiciel de calcul, nous étudierons le cas d'une bobine à noyau d'air, puis dans le troisième et dernier chapitre, nous metrons en validation les calculs électromagnétiques d'un transformateur de puissance ce qui est l'objectif de notre travail.

II.7.1 Les principales étapes de simulation du dispositif (circuit) :

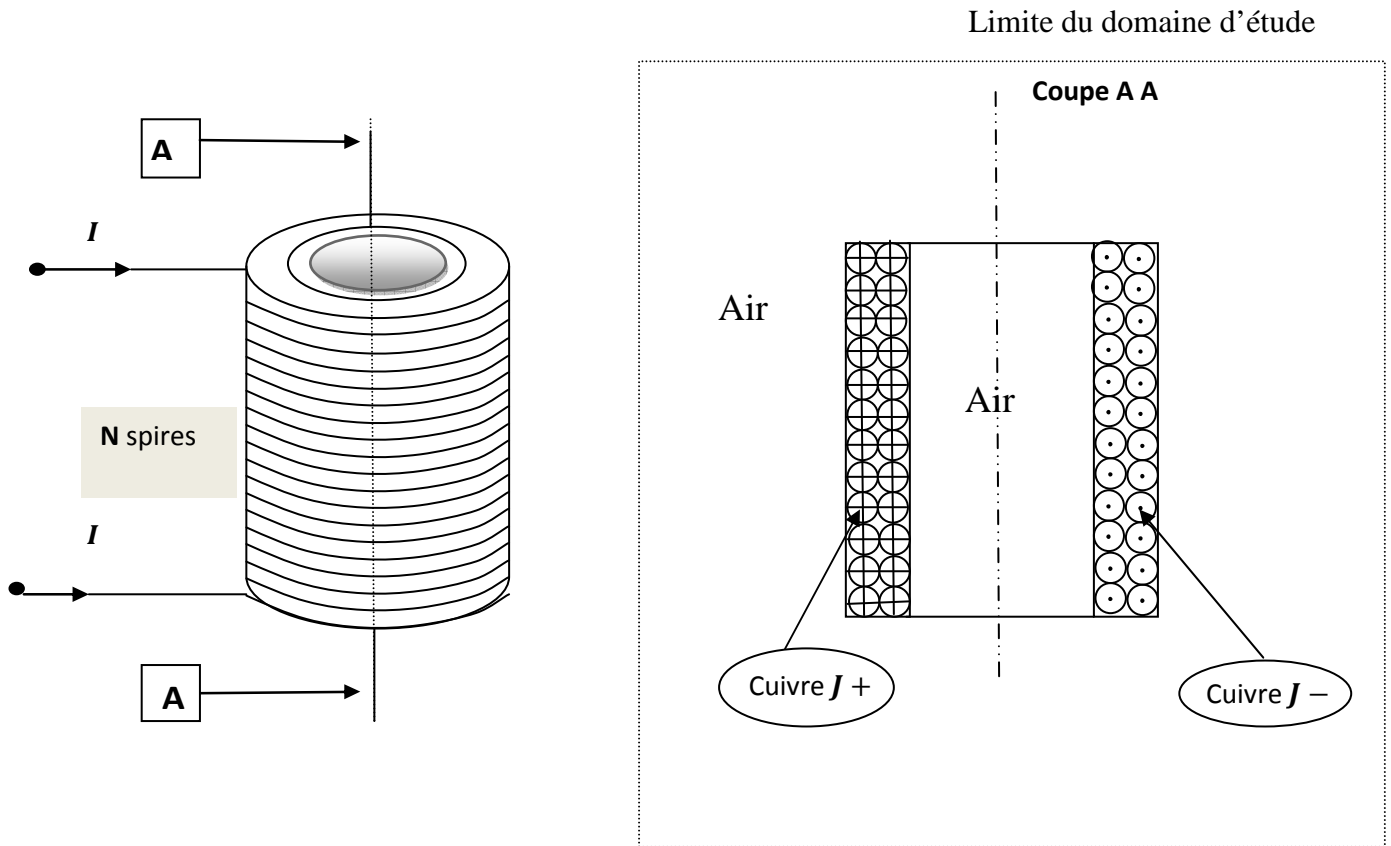


Fig. II .4 Circuit électrique pour la simulation

Nous trouverons en figure II.5 la barre de menu principale

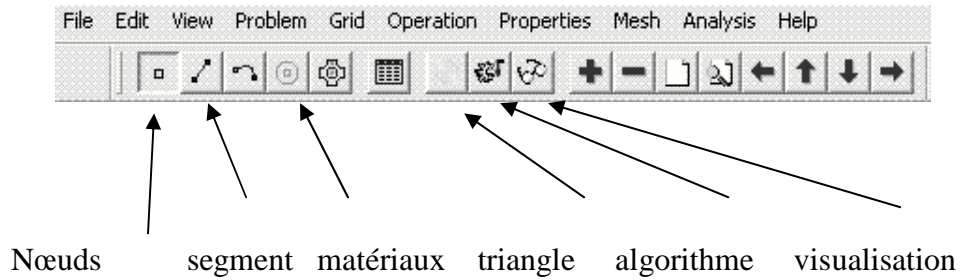


Fig. II.5 Barre de menu principale

II.7.2 création du schéma de simulation :

La première étape consiste à dessiner en 2D le modèle du circuit magnétique qu'on veut étudier, mais avant choisissant quelques paramètres de la feuille d'édition.

II.7.3 paramètres pour l'édition :

II.7.3.1 choix de l'unité :

Sélectionner *Problèm* puis *millimètre* par exemple .on trouve en **figure 2.6** les différents paramètres à configurer

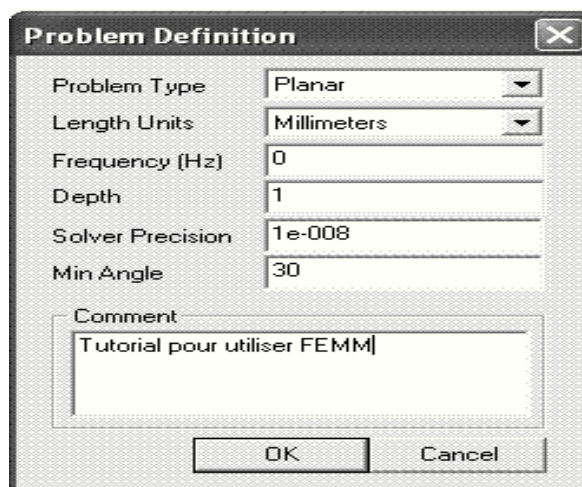


Fig. II.6 fenêtre pour le choix de l'unité

II.7.3.2 Choix d'une taille de grille :

Pour définir une taille de grille on sélectionne *Grid* puis *set grid*, imposer *grid size=5* par exemple.

II.7.4 Réalisation du schéma de simulation :

Afin de placer un nœud aux coordonnées X et Y sélectionner l'icône *Nœuds*, on peut utiliser le bouton gauche de la souris, ou bien en utilisant la touche **Tab**. Pour supprimer un nœud sélectionner celui-ci avec le bouton **droit** de la souris, puis actionner **Supp**. La saisie des différents nœuds est donnée en figure II.7

Pour relier les différents nœuds, sélectionner l'icône *Segments* puis avec la souris activer le nœud de départ et celui d'arrivée, un segment apparait alors. Votre schéma doit ressembler à celui de la figure II.8

II.7.5 Paramètre des matériaux à utiliser :

Après avoir saisi le schéma de simulation, vous devez définir les différent matériaux à utiliser

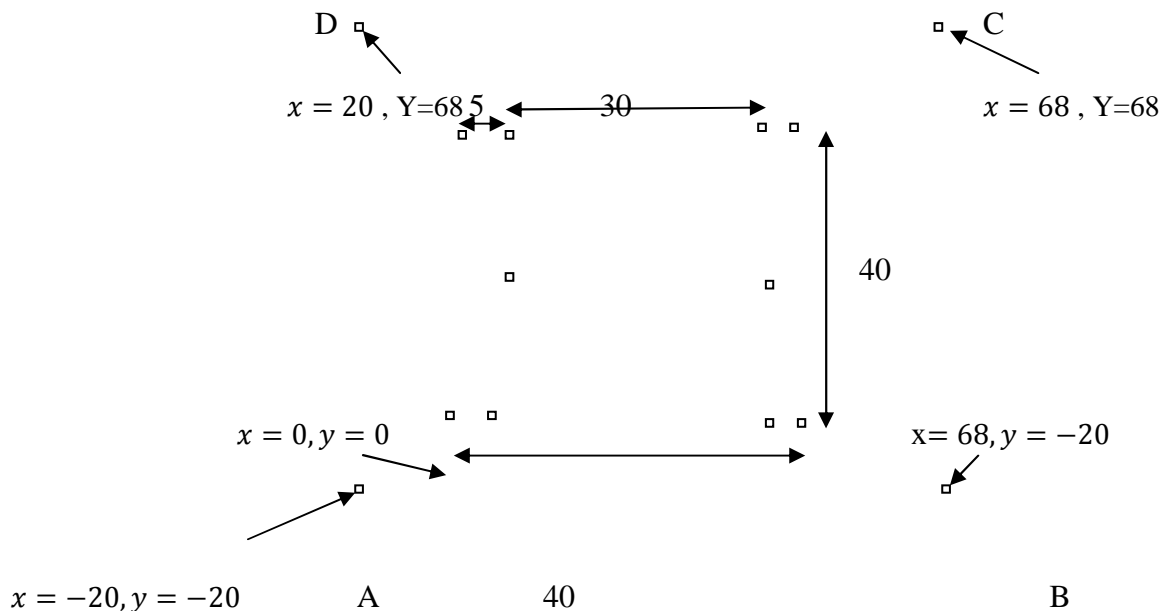


Fig. II.7 Saisie des différents nœuds

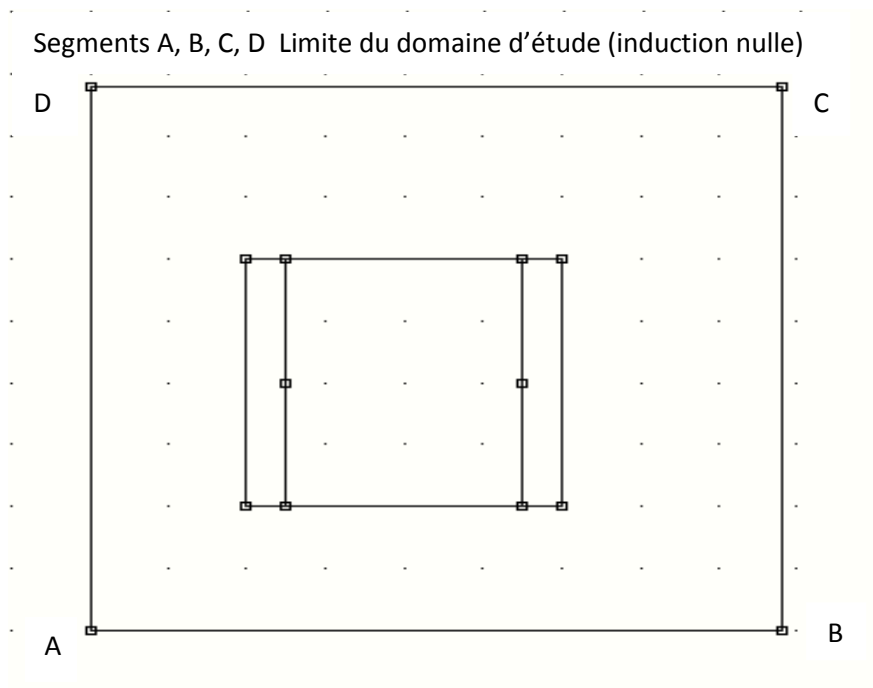


Fig .II.8 Saisie des différents segments

II.7.5.1 Définition des matériaux et milieux

Sélectionner le menu *propriétés* puis *materials library*, repérer dans l'arborescence de gauche le milieu nome **Air**, puis faite un glisser déposer dans l'arborescence de droite comme indique en figure II.9

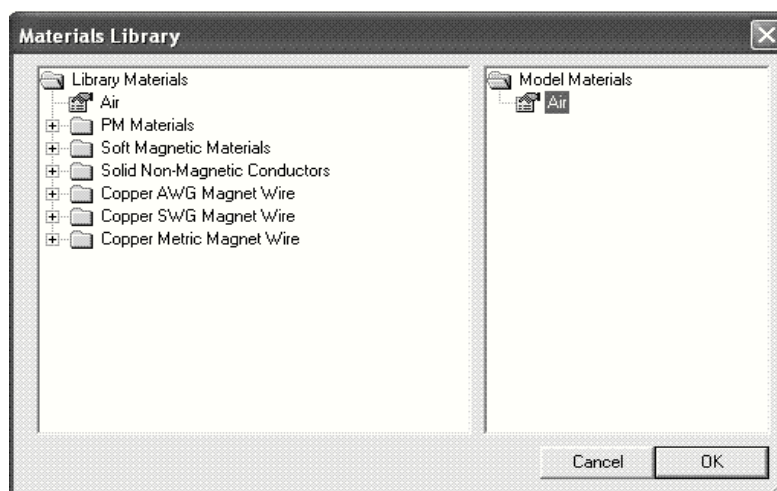


Fig. II.9 Choix du milieu air

L'icône permet d'éditer les paramètres magnétique.les grandeurs sont celles de la **figure II.10**

Par exemple pour le circuit électrique de la bobine étudié (**Fig. II.3**) en utilisant le cuivre de densité électrique J et un matériau en fer de perméabilité magnétique μ_r , on aura deux milieux ($J+$: densité de courant positif et $J-$: densité de courant négative). La fenêtre doit ressembler à la **figure II.11**

Les paramètres pour configurer la densité de courant positive sont ceux de la **figure II.12**

De même les paramètres pour la densité de courant négative sont ceux de la **figure II.13**

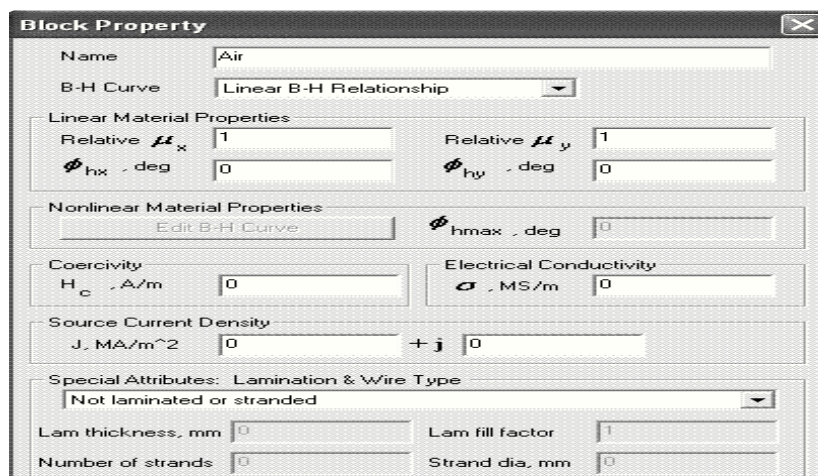


Fig. II.10 Paramètres à définir pour le milieu air

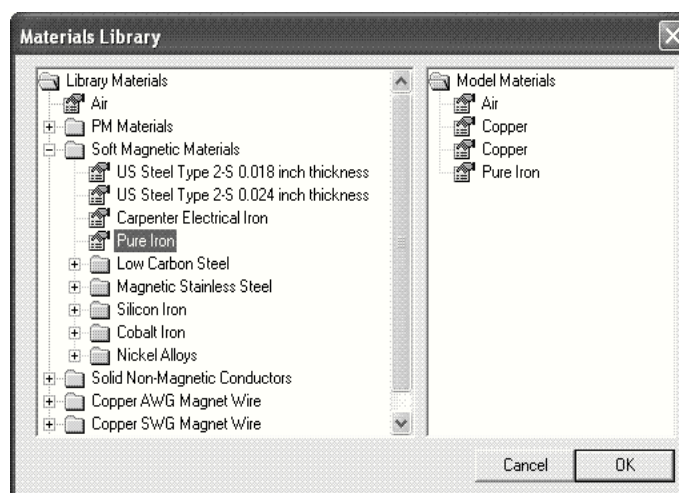


Fig. II.11 Matériaux pour la simulation du circuit

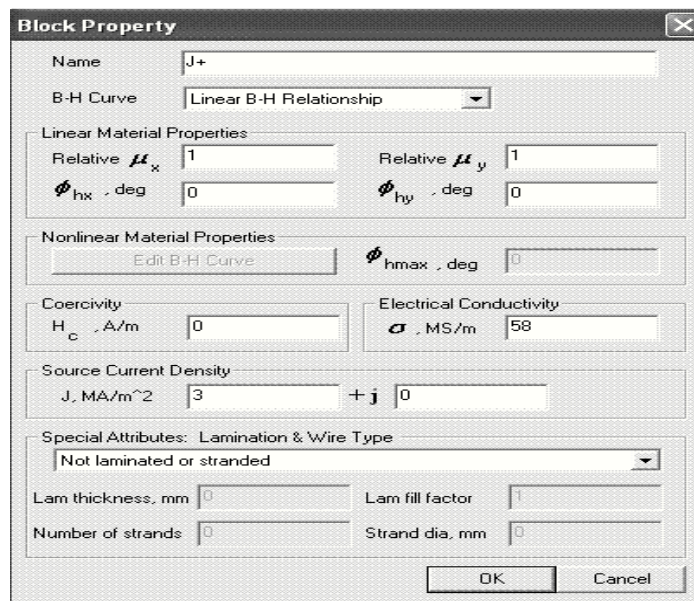


Fig. II.12 Matériau en cuivre avec densité positive

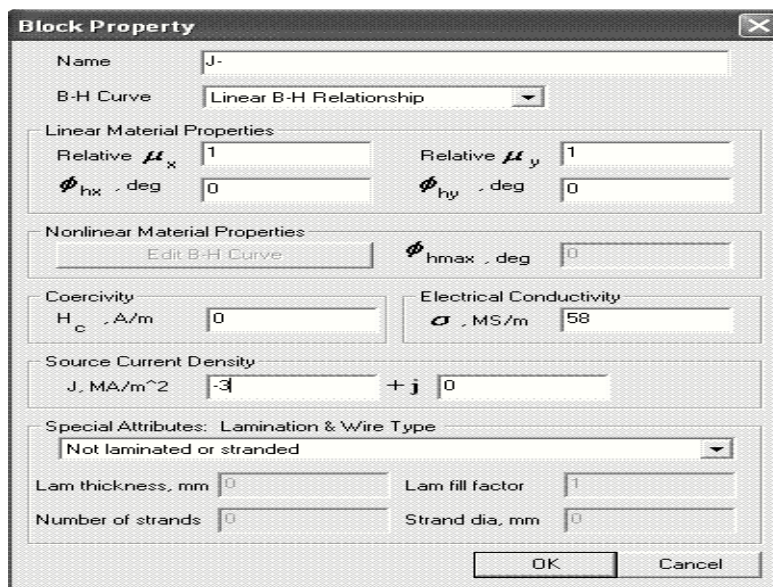


Fig. II.13 Matériau en cuivre avec densité négative

Le milieu en fer de perméabilité μ_r est donne en **figure II.14**

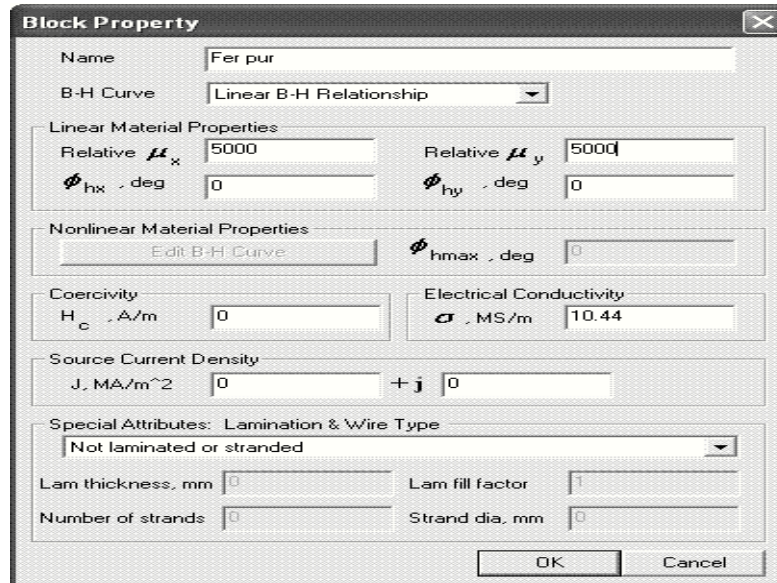


Fig. II.14 Matériau fer pur

II.7.5.2 choix des différentes régions :

Après avoir dessiné dans un repère 2D la structure magnétique, il reste à caractériser les différentes régions. La figure montre comment définir les matériaux des différentes régions

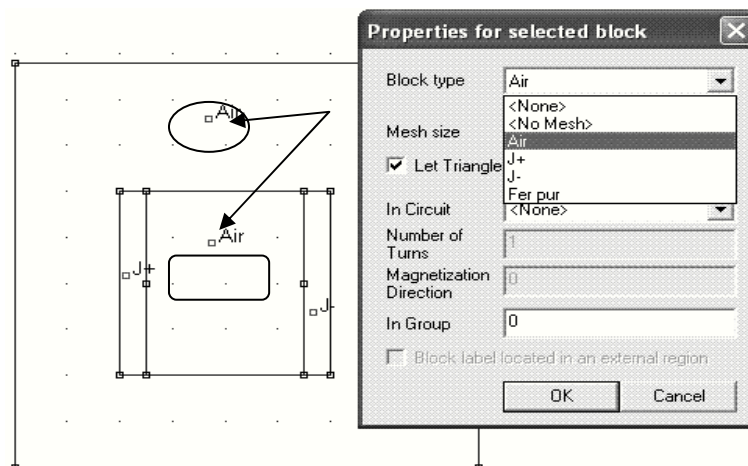


Fig. II.15 Définition des différents milieux

II.8 Conditions aux limites :

Une étape importante pour le calcul, consiste à définir pour le contour A, B, C, D de la zone à étudier une condition aux limites

Dans le schéma de simulation on sélectionne les segments AB BC CD et DA afin de définir la condition aux limites pour un champ nul par exemple la figure II.15 montre la condition aux limites

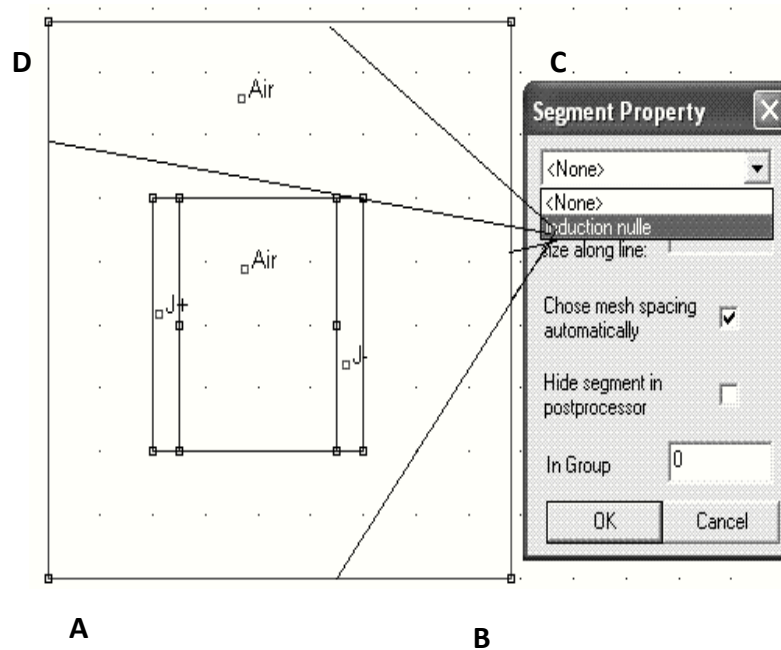


Fig. II.16 :Edition de la condition aux limites

II.9 Générateur de triangle :

Le programme résout les équations magnétiques en un nombre de point (éléments finis) comme l'indique la figure II.16 .plus le nombre de triangle est important plus les résultats sont précis, mais le temps de calcul est alors plus élevé.

II.10 Simulation :

II.10.1 visualisation des lignes de champs :

Lors de l'exécution du programme les lignes de champ sont visualisée, elle montre le chemin suivi dans le circuit magnétique.la figure II.17 montre la cartographie des lignes de champ dans le circuit étudié.

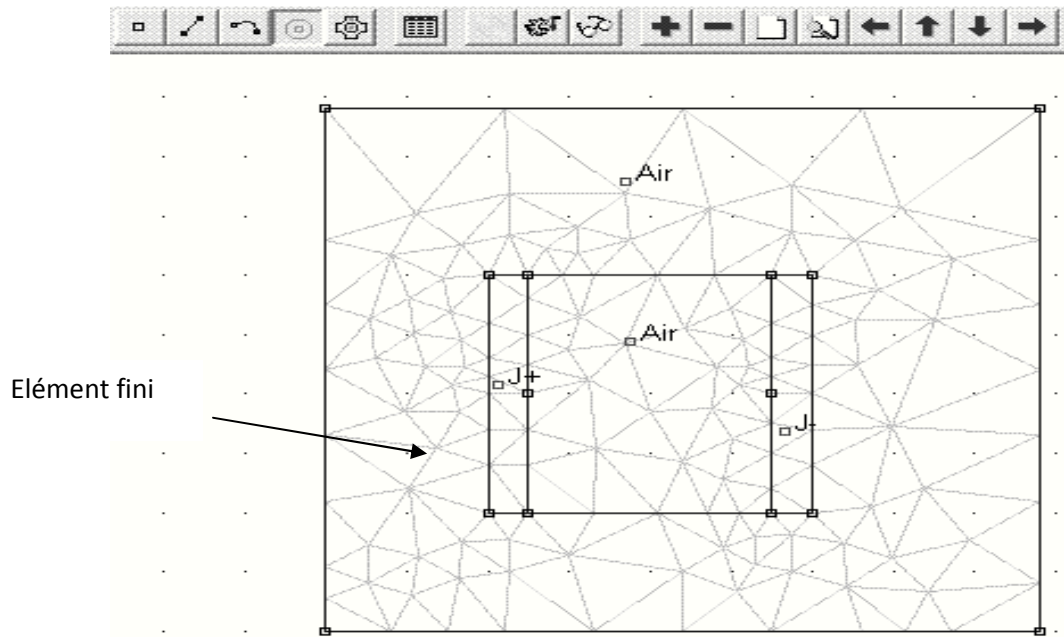


Fig. II.17 Générateur de triangle

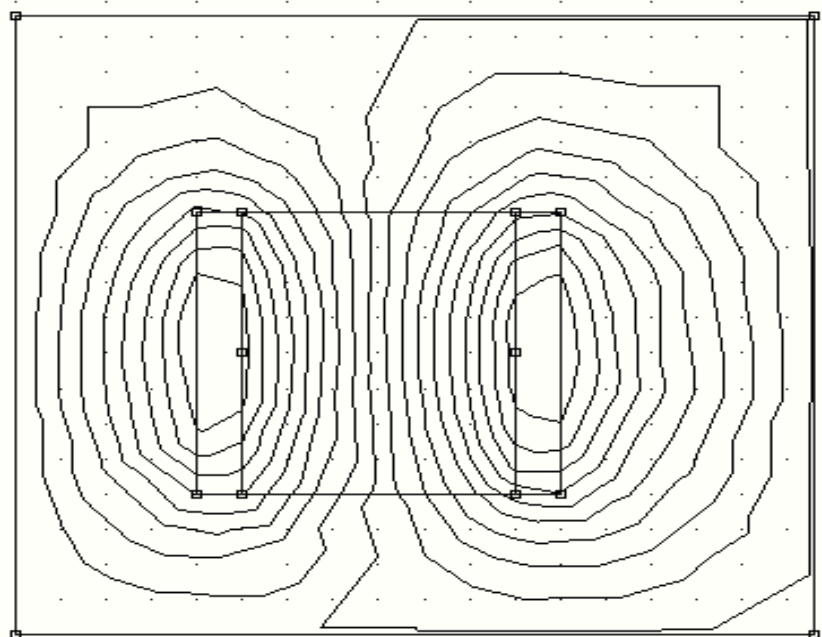


Fig. II.17 Cartographie des lignes de champs

Le programme de visualisation autorise de nombreux traitement mathématique, comme par exemple la répartition de l'induction le long d'un segment comme l'indique la **figure II.18**

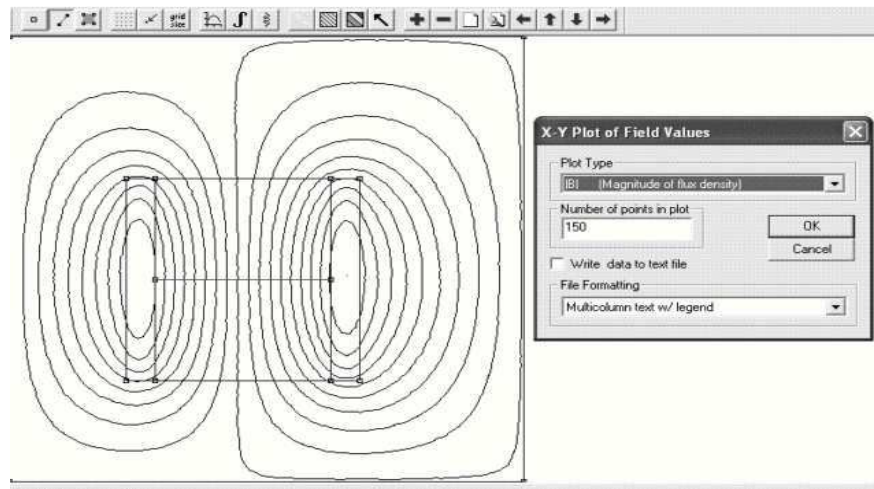


Fig. II.18 Répartition de l'induction sur un segment

II.10.2 Visualisation du résultat :

La figure II.19 représente l'induction magnétique au contour pré défini.

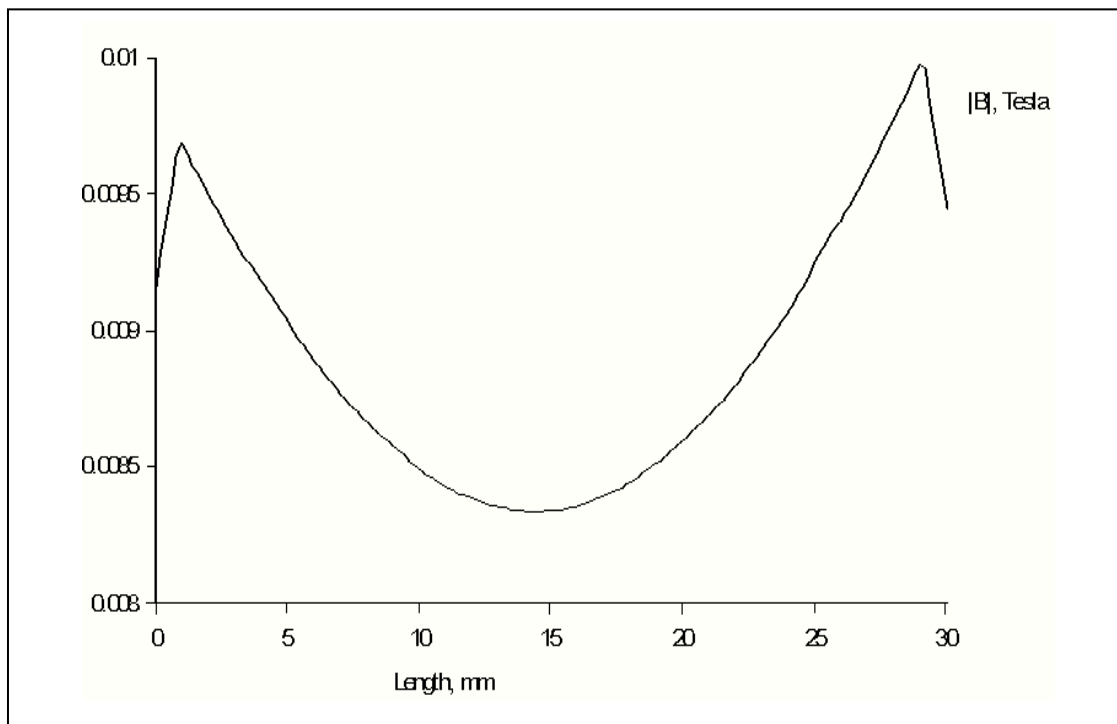


Fig. II.19 Induction magnétique

Conclusion :

Dans le but d'évaluer les champs électriques et magnétiques, nous avons décrit les équations générales régissant ces phénomènes .La résolution de ces équations permet de connaître l'évolution de ces champs en tout points de l'espace.

La méthode choisie pour résoudre ces équations, est la méthode des éléments finis dont nous avons eu un aperçu général sur son fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, nous allons mettre en évidence la méthode choisie pour l'étude d'un transformateur de puissance.

Introduction

La modélisation numérique a pour objectif de simuler numériquement le comportement de systèmes physique, en utilisant l'outil informatique. Les systèmes discrets présentés dans le chapitre précédant, seront traduits dans le programme de calcul.

La résolution d'un tel modèle, consiste à rechercher les évolutions spatiales et temporelles des champs magnétiques et électriques.

Dans ce chapitre nous mettrons en application un modèle de transformateur de puissance, dont nous allons présenter ces caractéristiques techniques. La démarche à suivre pour l'étude est la suivante :

Présentation de la géométrie et maillage du transformateur d'études ;

Sélection de la variable inconnue dont on cherche à évaluer les variables spatio-temporelles ;

Introduction des conditions aux limites.

Une deuxième partie de notre chapitre, consiste à étudier le comportement électromagnétique du transformateur en présence de la bobine de réglage et de son influence sur les grandeurs électriques.

III.1 Présentation du transformateur étudié :

III.1.1 Les caractéristiques géométriques :

La figure III.1 montre la géométrie du transformateur avec un circuit magnétique à trois enroulements avec une disposition concentrique

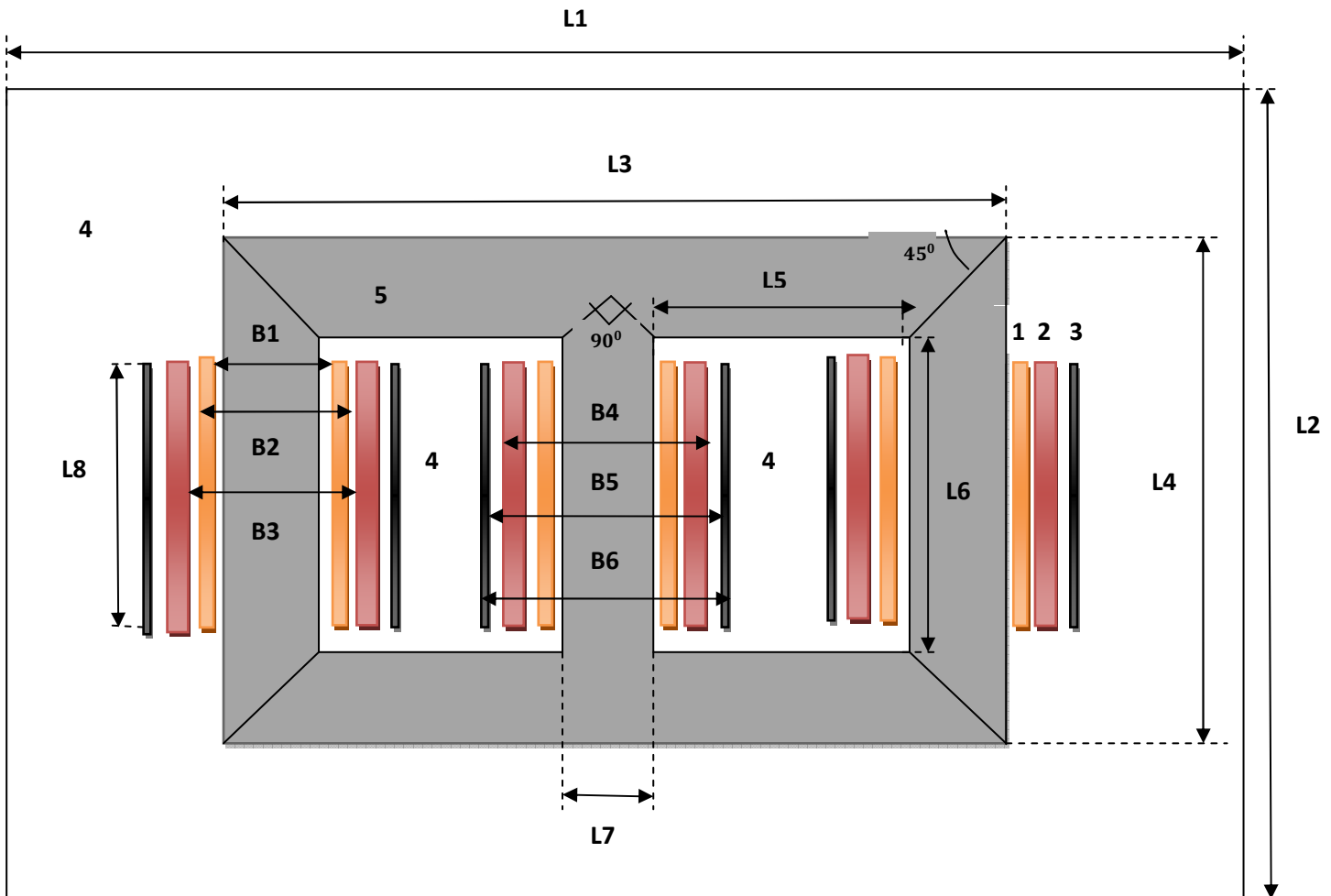


Fig.III.1 : Configuration géométrique transversale 2-D du transformateur

1 : représente l'enroulement secondaire (BT).

2 : représente l'enroulement primaire (HT).

3 : représente l'enroulement de réglage.

4 : représente l'Air.

5 : représente le circuit magnétique.

Le **tableau III.2** donne les dimensions du circuit magnétique et de différentes bobines du transformateur

Composantes	Signification	valeurs	Unités
L1	Longueur de la cuve	7700	mm
L2	Hauteur de la cuve	7650	mm
L3	Longueur du noyau	4180	mm
L4	Hauteur extérieur du noyau	3044	mm
L5	La distance entre deux colonnes	1130	mm
L6	Hauteur intérieur du noyau	2420	mm
L7	Largeur de la colonne du noyau	640	mm
L8	Hauteur des enroulements	1900	mm
B1	Diamètre intérieur de la bobine BT	925	mm
B2	Diamètre extérieur de la bobine BT	1040	mm
B3	Diamètre intérieur de la bobine HT	1300	mm
B4	Diamètre extérieur de la bobine HT	1600	mm
B5	Diamètre intérieur de la bobine de réglage	1610	mm
B6	Diamètre extérieur de la bobine de réglage	1640	mm

Tableau III .1 : caractéristiques géométriques du transformateur [9]

III.1.2 Les propriétés électriques et magnétiques du transformateur :

Régions	Conductivité électrique $\times 10^{-6} [\Omega m]^{-1}$	Perméabilité magnétique relative
Enroulement (cuivre)	58	1
Matériau magnétique	1.9	-
Air environnant	0	$4\pi 10^{-7}$

Tableau III.2 : propriétés électromagnétiques

III.1.3 Caractéristiques électriques du transformateur :

Les caractéristiques électriques du transformateur étudié sont groupées sur le **Tableau.III.3**

Caractéristiques	valeurs	Unités
Puissance apparente	125	MVA
Nombre de phases	3	
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Connexion des enroulements primaires	Etoile(Y)	
Connexion des enroulements secondaires	Triangle(D)	
Tension nominale au primaire	220	KV
Tension nominale au secondaire	15.75	KV
Courant nominale au primaire	328.03	A
Courant nominale au secondaire	2645.5	A

Tableau.III.3 : caractéristiques du transformateur

III.1.4 Courbe d'aimantation du matériau utilisé :

Le matériau du circuit magnétique est formé par des tôles magnétiques FeSi commercialisé sous le nom de **M15-Steel**. Elle présente les caractéristiques d'aimantation $B=f(H)$ montré sur la **figure III.2**

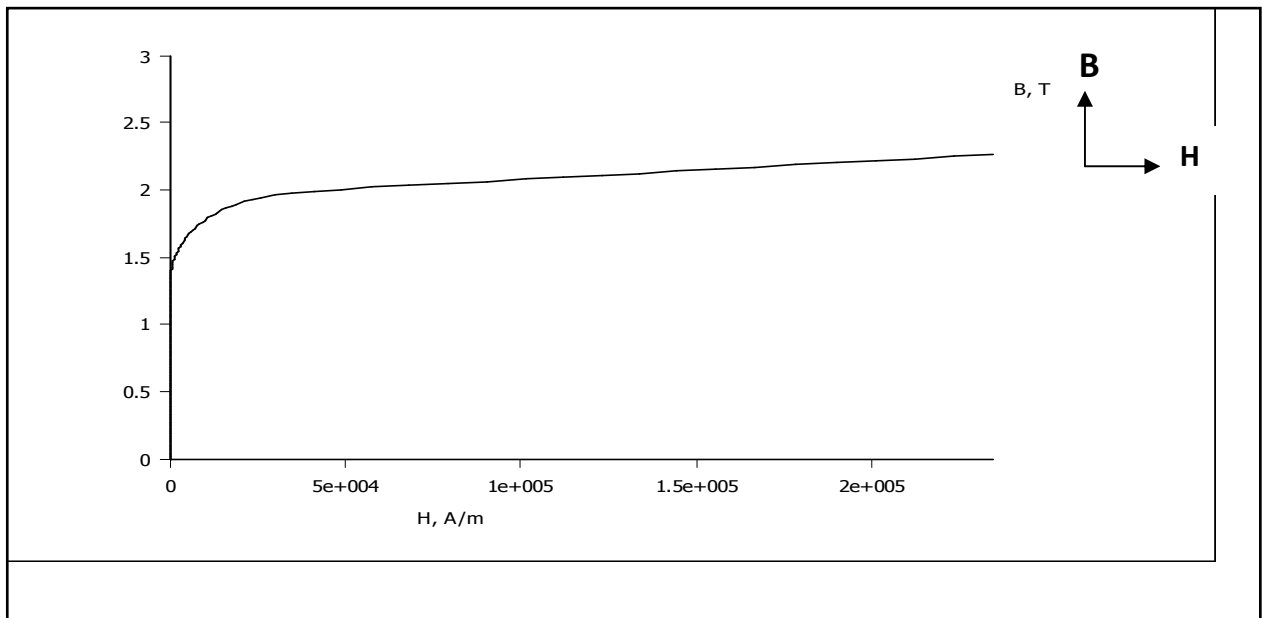


Fig.III.2 Caractéristique magnétique $B=f(H)$ de la tôle (**M-15 STEEL**)

III.1.5 Allure des courants d'alimentation de l'enroulement primaire et secondaire :

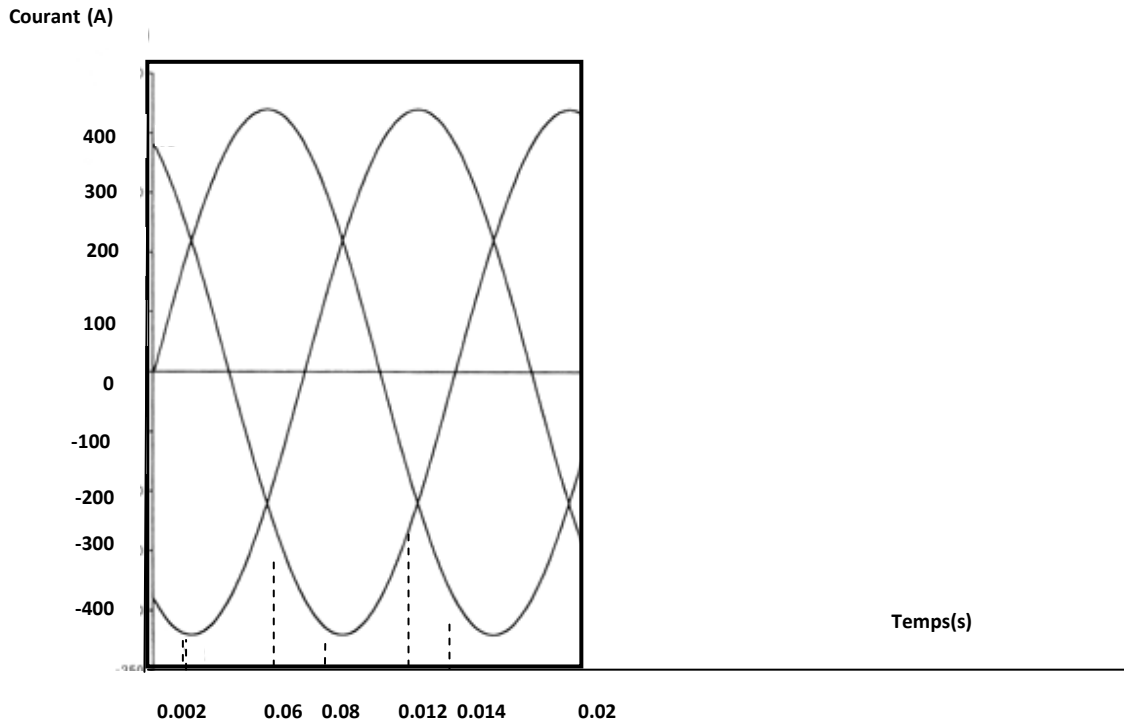


Fig. .III.3 Allure des courants d'alimentation de l'enroulement primaire (HT)

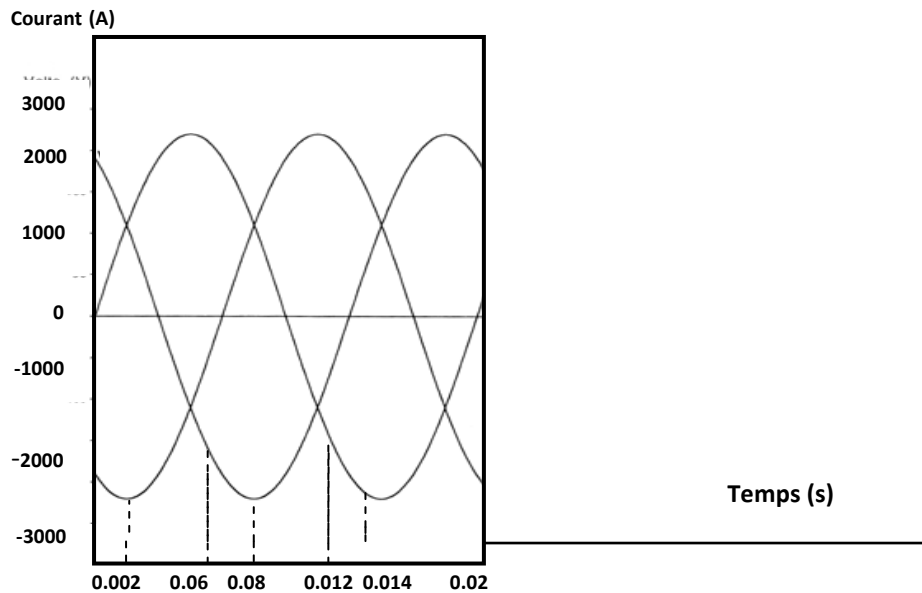


Fig. .III.4 Allure des courants d'alimentation de l'enroulement secondaire (BT)

III.2 Organigramme :

Le logiciel **FEMM**, que nous avons élaboré pour l'étude du transformateur peut être schématisé par l'organigramme ci-contre :

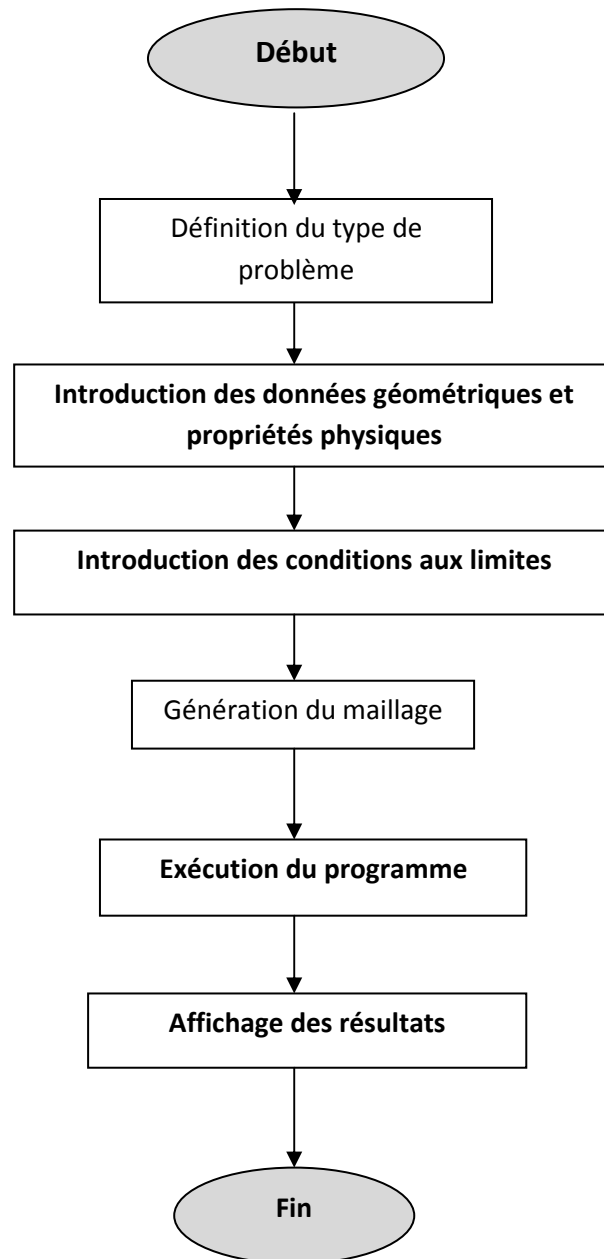


Fig.III.2 Organigramme de calcul utilisant la méthode des éléments finis

III.3 Introduction des propriétés physiques et des conditions aux limites au domaine d'étude :

Le tracé de la géométrie de la structure d'étude, est définis en **2D** (deux dimensions) [x, y].

Elle est réalisée à l'aide du logiciel FEMM qui est relativement simple à exécuter. Tandis qu'une grande précision est requise pour le calcul des dimensions à introduire dans le programme.

L'attribution des propriétés physiques et la nomination des régions du transformateur, sont établis dans cette première étape. [10]

Une condition aux limites de type Dirichlet ($\vec{A} = 0$) est imposé sur ABCD.

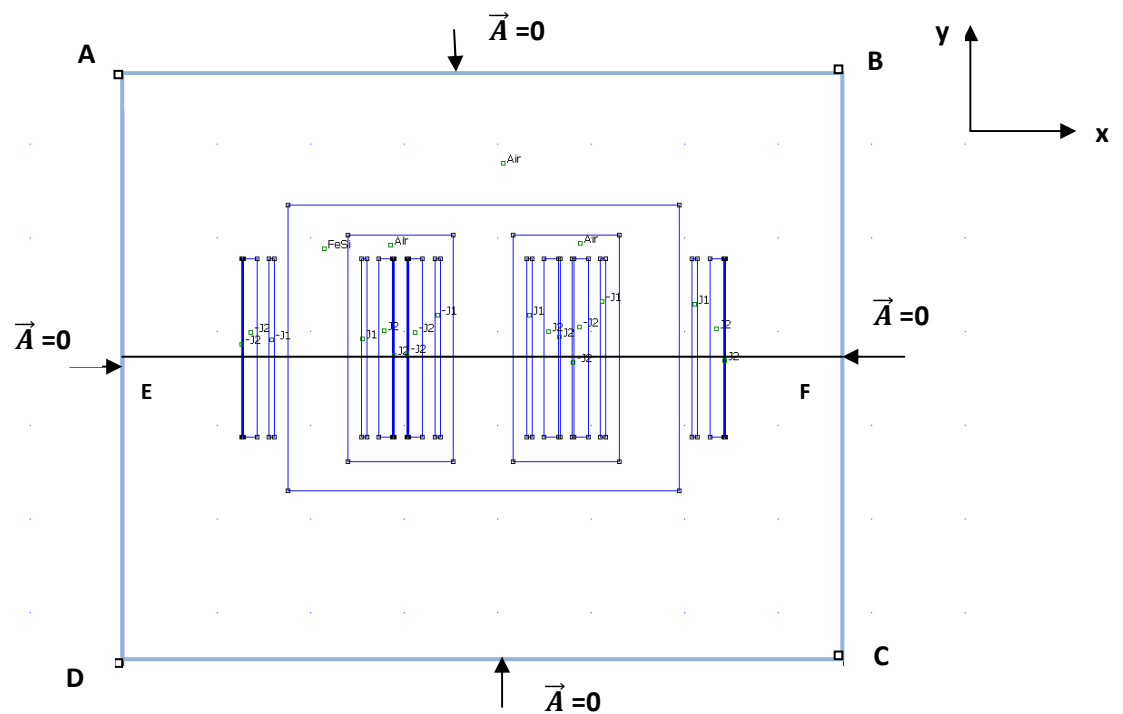


Fig. III.5 Domaine d'étude incluant les propriétés physiques et les conditions aux limites

III.4 Maillage de la structure :

Le maillage est identique dans toutes les parties du transformateur sauf dans les régions d'intérêt, elles sont resserrées autour de cette zone.

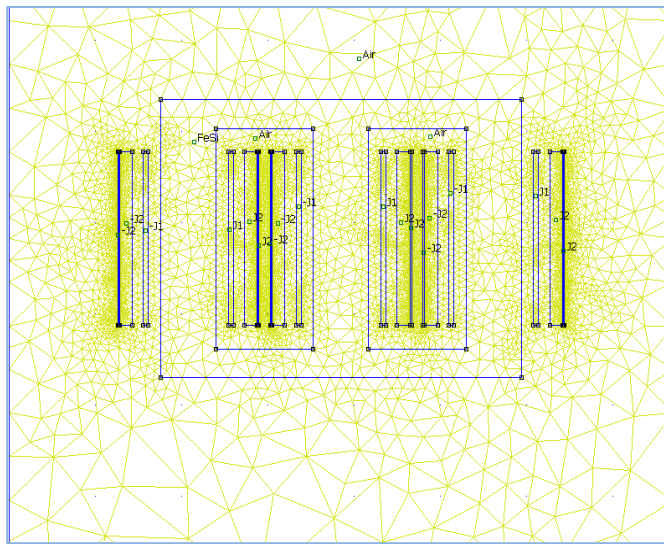


Fig.III.5 Maillage élément finis 2D du transformateur

III.5 Etude électromagnétique du transformateur :

Dans cette étude nous allons nous intéresser à la répartition de l'induction magnétique en fonction de la position des abscisses et à l'allure du potentiel vecteur magnétique ainsi que la densité de flux et leurs évaluations suivant le segment (EF) [10]

La résolution numérique, par la méthode des éléments finis, des équations électromagnétiques en imposant une condition aux limites de type Dirichlet ($\vec{A} = \mathbf{0}$) sur tout le contour du domaine d'étude, nous conduit à la connaissance de la distribution du potentiel vecteur magnétique ainsi que les inductions magnétiques dans toute la structure.

Dans cette partie nous allons nous intéresser à la simulation de deux cas de figures, l'un en considérant la bobine de réglage et l'autre en son absence. Une deuxième partie de ce que nous allons faire consiste à étudier l'influence de la bobine de réglage sur le transformateur et en fin procéder à l'identification des paramètres R, L et ainsi tirer une conclusion sur ce travail.

III.6 Modélisation sans présence de la bobine de réglage :

III.6.1 Calcul approximatif du nombre de spires n_1, n_2 :

Formule de Boucherot :

$$n_1 = \frac{U_{1n}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot B_{max}} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

S : Surface du circuit magnétique

f : Fréquence des courants d'alimentation

n_1 : Nombre de spires dans l'enroulement primaire

B_{max} : Induction maximale dans le noyau du circuit magnétique

U_{1n} : Tension nominale au primaire

$$M = \frac{U_{2n}}{U_{1n}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{III.2})$$

$n_1 = 1077$ Spires

De l'équation III.2 on déduit n_2

$n_2 = 77$ Spires

U_{2n} : Étant la tension nominale au secondaire et M le rapport de transformation

III .6.2 Calcul des densités de courant dans les bobines a t=8ms:

$$J_N = n \cdot \frac{I_N}{S_B} \quad (\text{III.3})$$

J_N : Densité de courant dans la bobine

I_N : Valeur du courant circulant dans la phase (conducteurs des bobines)

S_B : Section de la bobine

n :Nombre de spires de la bobine

III.6.3 Calcul des courants de chaque phase :

Avec :

$$I_1 = I_m \cos \omega t \quad (\text{III.4})$$

$$I_2 = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{III.5})$$

$$I_3 = I_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{III.6})$$

I_m :Valeur du courant maximal dans la bobine

J_{NB}	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Unité
Bobine HT	-1	1,13	-0,13	MA/m ²
Bobine BT	-1,5	1,7	-0,13	MA/m ²

Tableau III.4 : Valeurs des densités de courants des bobines de chaque phase (J_{NB})

NB : les valeurs obtenues dans le tableau ci-dessus correspondent à un sens de déplacement. En multipliant fois le signe (-) on aura les valeurs de $-J$

III.6.4 Simulation et interprétation des résultats :

Après l'insertion des valeurs précédemment calculées, la simulation de FEMM à $t=8\text{ms}$ nous donne les résultats suivants :

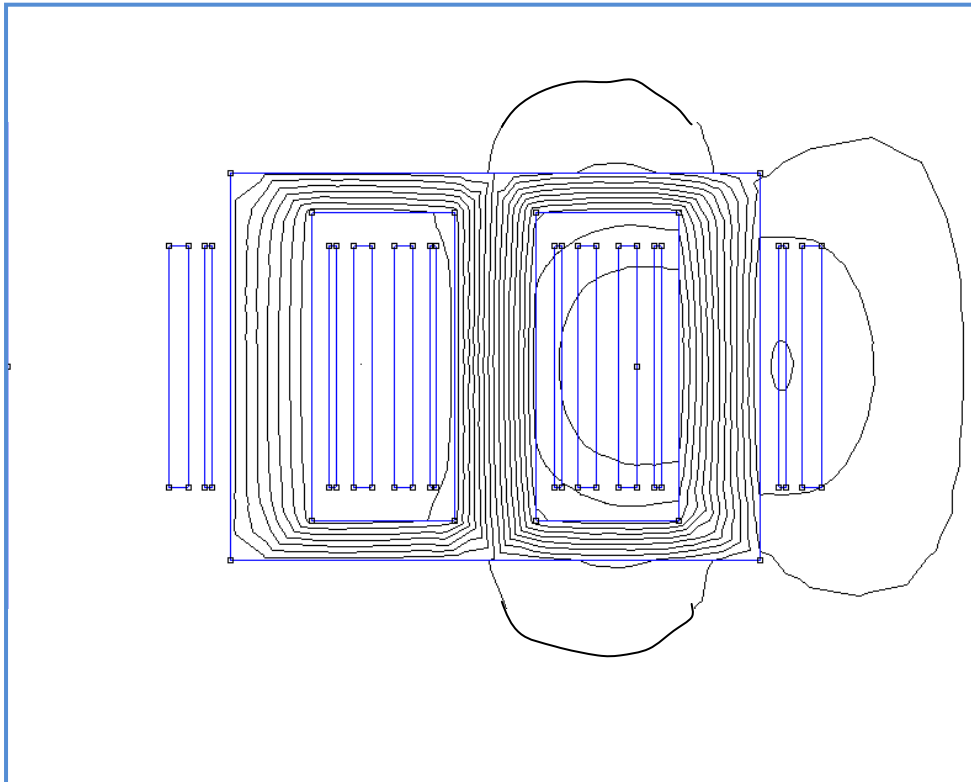


Fig.III.6 Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique à $t=8\text{ms}$

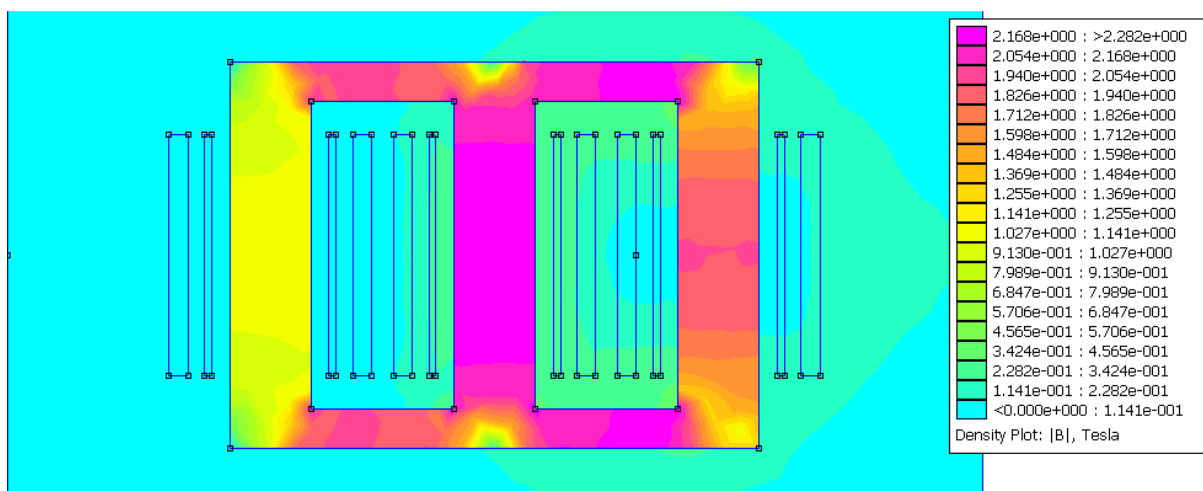


Fig.III.7 Répartition de l'induction magnétique dans le noyau à $t=8\text{ms}$

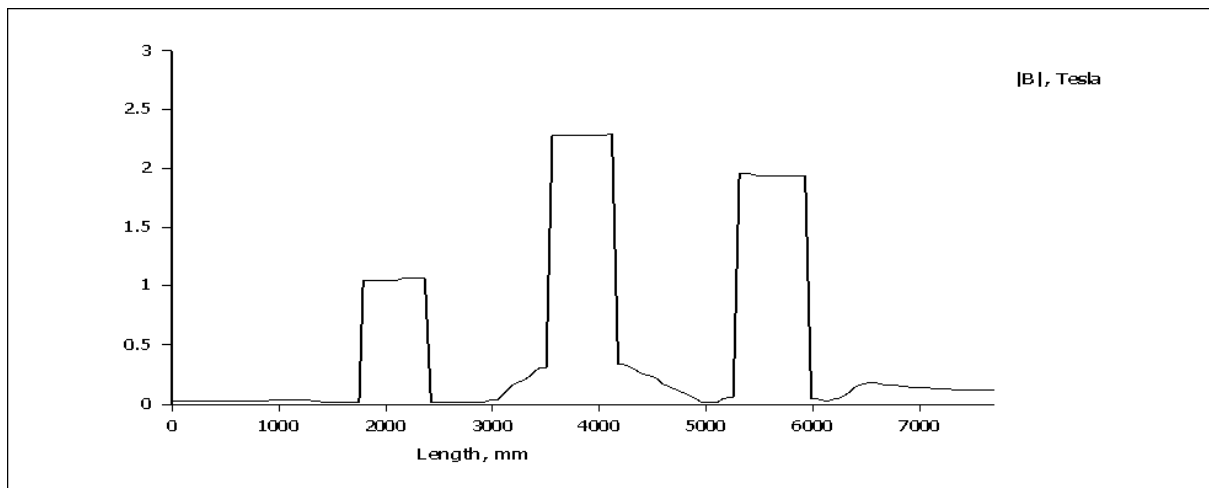


Fig.III.8 Allure de l'induction magnétique suivant le segment **EF** a **t=8ms**

III.6.5 Interprétation des résultats :

La **figure III.6** nous renseigne sur la répartition des valeurs du potentiel vecteur magnétique a travers le noyau et sa périphérie a **t=8ms**. En exploitant la cartographie montrant les lignes de champ magnétique, on constate qu'elles se resserrent dans la première et la deuxième colonne, en revanche elles s'éloignent dans la troisième.

La **figure III.7** montre que l'induction magnétique a atteint la valeur de **2,28 T** dans les deux colonnes. En se référant a la courbe $B=(H)$ on déduit que le matériau est saturé

On remarque aussi que les densités de courant dans les deux colonnes sont plus importantes, ce qui explique leurs influences sur la canalisation des champs magnétique dans ces régions.

Ces inégalités des valeurs du potentiel vecteurs magnétique et des densités de courants s'explique aussi du fait que les valeurs instantanées des courants d'alimentation dans les trois phases ne sont pas égales.

Suivant le segment **EF** comme le montre la **figure III.8**, la répartition du potentiel vecteur magnétique suit parfaitement l'allure du potentiel de la **figure III.7**

III.7 Détermination des paramètres R,L des enroulements :

III.7.1 Calcul des résistances des enroulements HT et BT

$$P_{NB} = R_{NB} \cdot I_{NB}^2 \quad (III.7)$$

Avec :

P_{NB} :pertes joules dans la bobine par phase.

R_{NB} :Résistance de la bobine par phase.

I_{NB} :Courant efficace traversant la bobine par phase.

R_{NB}	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Unité
Bobine HT	0.014	0.132	0.141	mΩ
Bobine BT	0.00185	0.0018	0.0019	mΩ

Tableau III.5 :Valeurs des résistances des bobines de chaque phase.

Les valeurs moyennes des résistances sont :

$$R_{Hmoy} = 0.093 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Bmoy} = 0.0018 \text{ m}\Omega$$

III.7.2 Calcul des inductances des enroulements HT et BT :

En utilisant la relation suivante on deduit L :

$$L_{NB} = \frac{\int A J dV}{I_{NB}^2} \quad (III.8)$$

Avec :

L_{NB} : Inductance de la bobine par phase.

$\int A \cdot J dV$:Energie electromagnetique.

I_{NB} : Courant par bobine et par phase.

L_{NB}	Phase 1	Phase2	Phase 3	Unité
Bobine HT	4.7	5.6	20.8	m H
Bobine BT	0.04	0.048	0.19	m H

Tableau III.6 : valeurs des inductances des bobines de chaque phase.

Les valeurs moyennes des inductances sont :

$$L_{Hmoy} = 3.44 \text{ mH}$$

$$L_{Bmoy} = 0.03 \text{ mH}$$

III.8 Modélisation avec bobine de réglage :

III.8.1 Etude de l'influence des bobines de réglage :

III.8.1.1 Recalcul du nombre de spires primaire :

L'ajout de spires dans l'enroulement primaire provoque une augmentation de 5% de la tension au secondaire

$$\hat{U}_2 = U_2 + 5\% U_2 \quad (\text{III.9})$$

\hat{U}_2 : représente la nouvelle tension engendré

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{III.10})$$

$$\hat{n}_1 = n_2 \cdot \frac{U_1}{\hat{U}_2} \quad (\text{III.11})$$

\hat{n}_1 : représente la nouvelle valeur du nombre de spires au primaire

III.8.1.2 Calcul du Nombres de spires de la bobine de réglage :

$$n_{BR} = \hat{n}_1 - n_1 \quad (\text{III.12})$$

J_{BR}	Phase 1	Phase 2	Phase3	Unité
Bobine de réglage	-0.48	0.54	-0.062	MA/m ²

Tableau III.7 Valeurs des densités de courant des bobines de réglage (J_{BR})

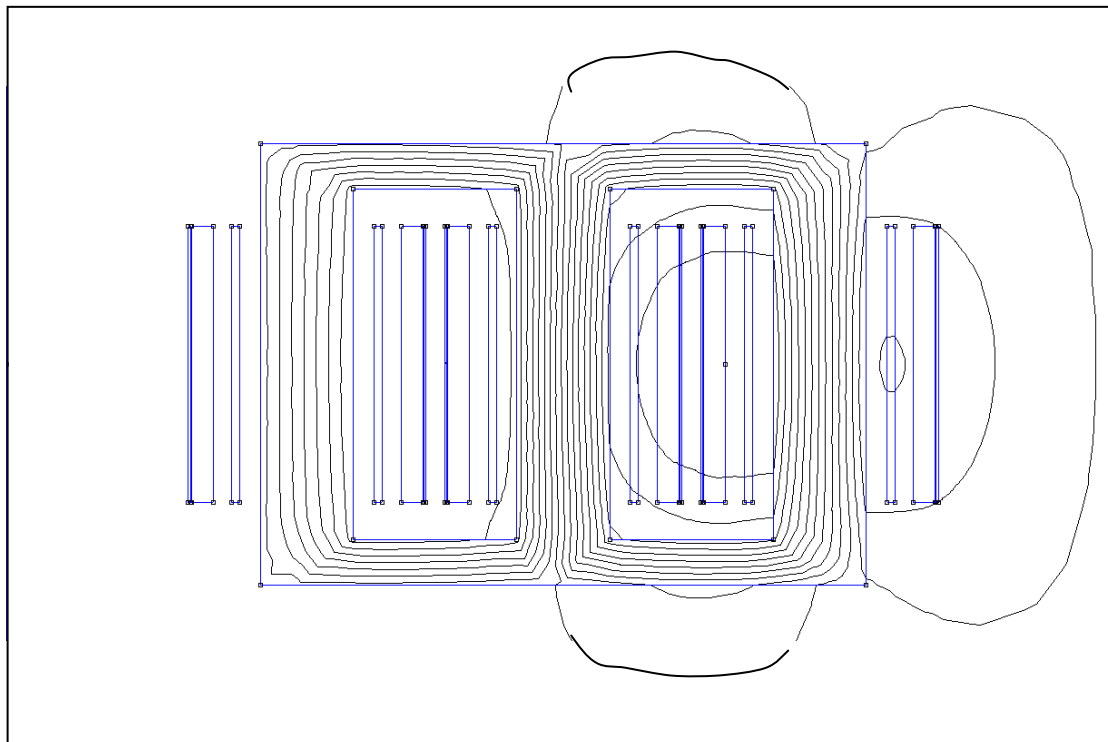


Fig.III.9 Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique à $t=8ms$

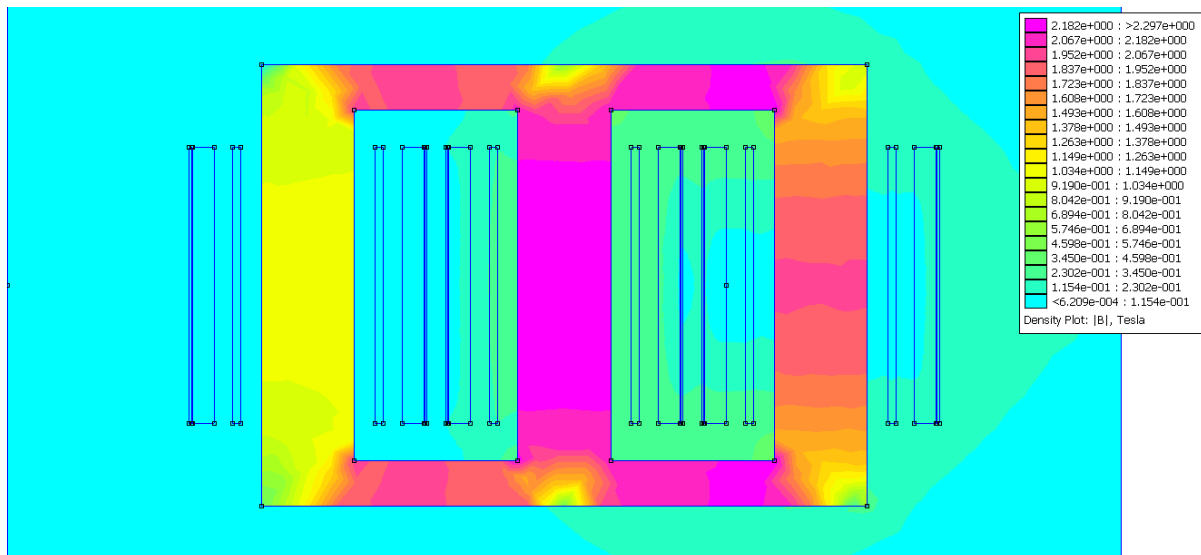


Fig.III.10 Répartition de l'induction magnétique dans le noyau a $t=8ms$

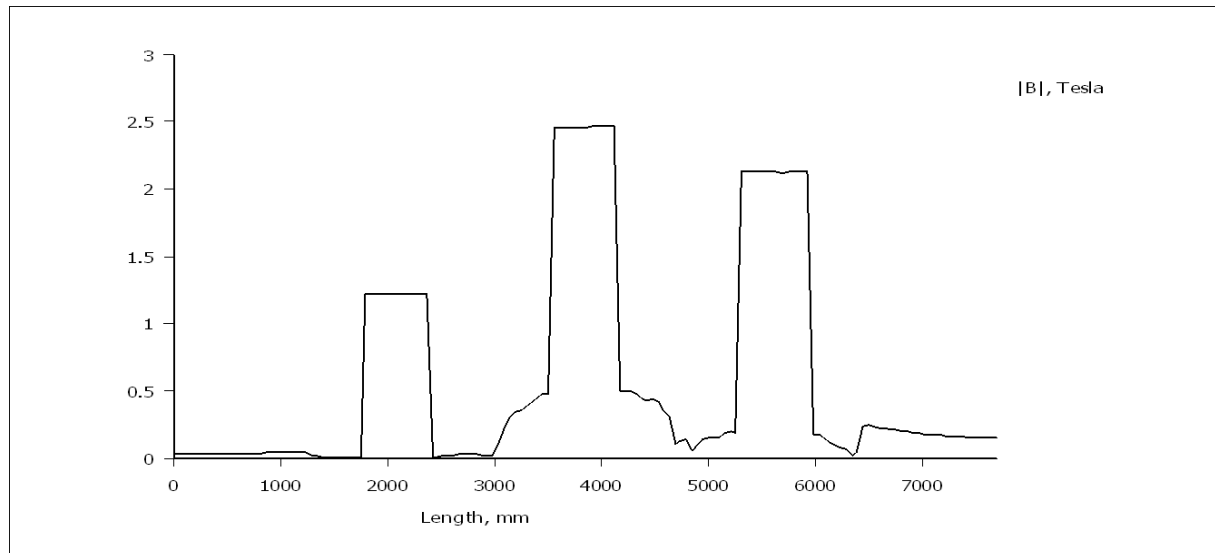


Fig.III.11 Allure de l'induction magnétique suivant le segment **EF** a **t=8m**

En comparant les résultats de simulation obtenus dans les deux cas étudiés, on constate que toutes les valeurs des grandeurs électromagnétiques sont modifiées. Ce qui nous ramène à confirmer l'influence de la bobine de réglage sur ces grandeurs.

III.9 Effets de la bobine de réglage sur les paramètre R,L :

III.9.1 Determination de L,R :

R_{NB}	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Unité
Bobine HT	0.89	0.128	3.05	mΩ
Bobine BT	0.002	0.0012	0.0012	mΩ

Tableau.8 :valeurs des resistances des bobines

$$R_{Hmoy} = 1.089 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Bmoy} = 0.0015 \text{ m}\Omega$$

L_{NB}	Phase 1	Phase2	Phase 3	Unité
Bobine HT	0.047	0.057	0.2	mH
Bobine BT	0.027	0.031	0.12	mH

Tableau.9:Valeurs des inductances des bobines

$$L_{HTmoy} = 0.1 \text{ mH}$$

$$L_{BTmoy} = 0.06 \text{ mH}$$

En ajoutant la bobine de réglage au primaire du transformateur HT on remarque que les valeurs des résistances et des inductances des enroulements augmentent .

Sachant que les deux paramètres R,L dépendent respectivement des pertes joules et de l'énergie électromagnétique dans les enroulements, on deduit que l'ajout de ces spires influent sur ces pertes d'énergies et donc sur les deux paramètres R et L.

La bobine de réglage joue un role important dans la stabilité de la tension, mais les pertes qu'elle engendre , dans les files conducteurs ,peuvent nuire au bon fonctionnement du transformateur.

III.10 Effets du matériau du circuit magnétique :

III.10.1 Détermination des paramètres R,L :

Pour savoir qu'elle est l'influence du circuit magnétique sur les paramètres R,L du transformateur. On remplace le matériau utilisé, à savoir le **M15-Steel**, par un autre matériau, ayant des nouvelles caractéristiques, (**Carpenter electrical iron**).

Nouveles proprités magnétique du transformateur :

Conductivité électrique $\times 10^{-6} [\Omega m]^{-1}$	Perméabilité magnétique relative
7.69	—

Tablau.III .10 :Proprietes electromagnetique

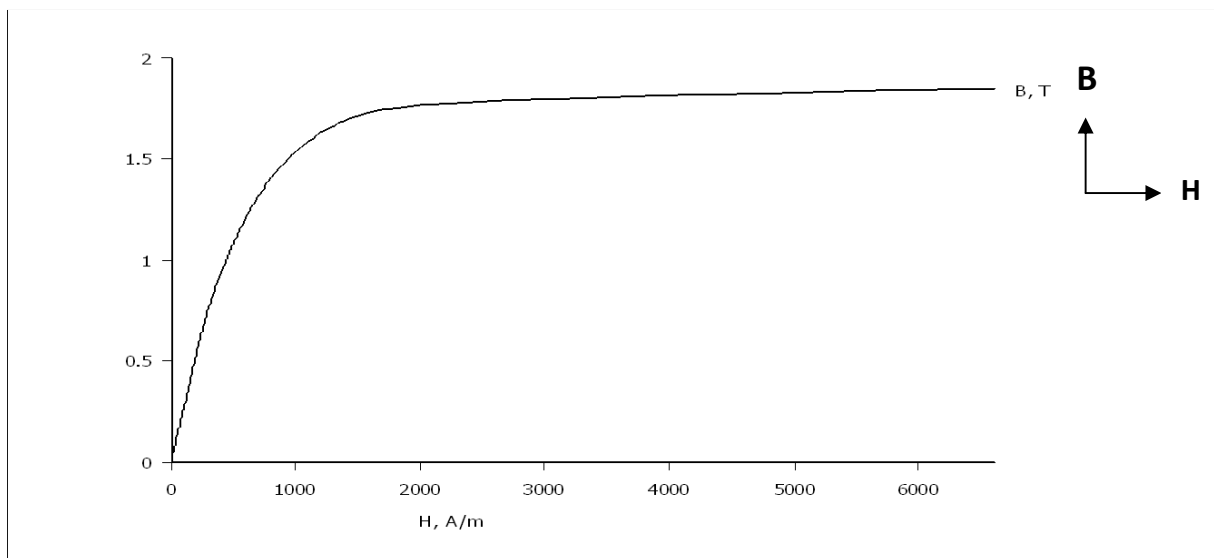


Fig.III.9 Caractéristiques magnétiques $B=f(H)$ de la tôle (**Carpenter electrical iron**)

Les résultats de calcul de **R,L** obtenues sont ceux des tableaux **III.10** et **III.11**

R_{NB}	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Unité
Bobine HT	0.09	0.4	4.5	mΩ
Bobine BT	0.006	0.008	0.009	mΩ

Tableau.III.10 : Valeurs des résistances avec le nouveau circuit magnétique

$$R_{Hmoy} = 1.66 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Bmoy} = 0.007 \text{ m}\Omega$$

L_{NB}	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Unité
Bobine HT	0.03	0.08	0.6	mH
Bobine BT	0.03.	0.09	0.3	mH

Tableau.III.11 : Valeurs des résistances avec le nouveau circuit magnétique

$$L_{HTmoy} = 0.23 \text{ mH}$$

$$L_{BTmoy} = 0.14 \text{ mH}$$

Après le remplacement du circuit magnétique par un nouveau matériau (**Carpenter electrical iron**) de caractéristiques autre que celles du **M15-Stell**, nous remarquons que les valeurs des résistances et des inductances sont très différentes, nous déduisons alors que la nature du matériau a une influence sur d'autres paramètres.

Conclusion :

Les résultats de la simulation nous a permis de constater l'évolution des grandeurs électromagnétique dans le transformateur. En opérant des changements sur les composants actifs du transformateur, comme l'ajout de bobine de réglage ou le remplacement du noyau magnétique, a modifié les valeurs des pertes joules et de l'énergie électromagnétique provoquant ainsi un changement évident des grandeurs électriques. Cette étude nous a conduit a déterminer les paramètres électriques des enroulements en fonction de l'évolution de ces grandeurs électromagnétique ayant un lien avec la disposition et la nature des composants.

Conclusion Générale

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à l'étude du comportement électromagnétique d'un transformateur de puissance en fonctionnant dans un premier temps sans bobine de réglage.

En jouant sur la disposition des enroulements nous avons déterminés, à partir des résultats de simulation, la répartition de l'induction magnétique et du potentiel vecteur magnétique. Ces grandeurs sont visualisées en choisissant un instant $t=8\text{ms}$.

Ensuite on a procédé au calcul des paramètres électriques tels que les résistances et les inductances des enroulements. Les résistances ont été calculées par les pertes par effet joules données par le logiciel FEMM.

Nous avons constaté que ces grandeurs varient en fonction de la variation des courants d'alimentation. L'énergie électromagnétique obtenue nous a donnée la possibilité d'évaluer les inductances des enroulements.

Au second lieu nous avons étudié le comportement de ses grandeurs en considérant la bobine de réglage d'une part et en jouant sur les caractéristiques du matériau du noyau magnétique. Nous avons constaté après simulation de ce deuxième cas, une modification dans la distribution des lignes équipotentielles et de l'induction magnétique et une augmentation significative des valeurs des grandeurs électriques.

Cette étude nous a permis de comprendre d'une manière précise le comportement électromagnétique des transformateurs en jouant sur les caractéristiques des matériaux et sur la disposition de ces composants.

Nous espérons que ce présent travail, pourra être un outil de base pour les futures investigations qui viendront compléter et améliorer la qualité de nos recherches et qui nous permettra de rechercher l'existence d'autres liens pouvant influencer sur le comportement des grandeurs électromagnétiques.

Références Bibliographiques

[1] :S. CHRIF, « Modélisation 2D par élément finis des transformateurs de distribution par couplage fort magnétique-circuit électrique et magnétique-densité de courant », Mémoire d'Ingénieurs, Université Mouloud MAMMRI, Tizi-Ouzou, [2008]

[2] :L. BELKACEMI, D. BOUABDELAH « Influences des résistances des enroulements du transformateur sur les surtensions », Mémoire, d'Ingénieurs, Université Mouloud MAMMRI, Tizi-Ouzou, [2009]

[3] : F. AOUD, F. LARABI « Calcul et dimensionnement d'un autotransformateur triphasé a trois enroulements 32 MVA. 230KV/12KV/38,5KV », Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud MAMMRI, Tizi-Ouzou, [2009]

[4] : Gouri. DAHTT, Gilbert. TAZOT, Emmanuel. LEFRANCOIS. « Méthode des Eléments Finis », [2005]

[5] : JEAN CLAUDE .SABANNADIÈRE, JEAN-LOUIS .COULOMB « Calcul des Champs Electromagnétiques », CAO en électrotechnique, [1987]

[6] : M.MEZIANI « Contribution a la Modélisation Analytico-Numérique des transformateurs de puissance »

Mémoire de Magister, Université Mouloud MAMMRI, Tizi-Ouzou, [2011]

[7] : Y. BELKHIR, « Modélisation des phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques couplé par la méthode des volumes finis. », Mémoire de Magister, Batna, [2004]

[8] : B. BELBECHAI « Etude des contraintes électriques dans un transformateur haute tension par la méthode des éléments finis. » Mémoire d'Ingénieurs, Université Mouloud MAMMRI Tizi-Ouzou [2000]

[9] : M .AFETOUCHE, T. ARAB, « Etude d'un transformateur de puissance triphasé par la méthode des éléments finis », Mémoire d'Ingénieurs, Université Mouloud MAMMRI, Tizi-Ouzou, [2009]

[10]: B. BELKESSAM, D. SADI, M. OULD-FELLA « Etude par la méthode des éléments finis d'une machine synchrone a aimant permanent en présence de défauts dû à la désaimantation », mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud MAMMRI, Tizi-Ouzou [2009]

Ce présent travail, est porté sur l'évaluation du comportement électromagnétique des transformateurs de puissance en utilisant la méthode des éléments finis. Ceci nous permettra d'avoir une approche des grandeurs locales au niveau du transformateur. La méthode des éléments finis est fortement développée, car elle s'adapte aux études des géométries complexes et non linéaires. En vu de sa capacité d'exécution, qui est relativement simple a mettre en œuvre, elle est l'objet de traitement de plusieurs domaines d'études.

Mots clés : Calcul électromagnétique, méthode des éléments finis, transformateurs de puissance, Equations de maxwell, modèles électromagnétiques.