

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**  
**FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**



# Memoire de fin d'études



**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES**

## Thème

**ETUDE COMPARATIVE DES PERTES DANS LES  
TÔLES MAGNETIQUES A PARTIR D'ESSAIS ET DU  
MODELE THEORIQUE**

**Proposé par:**

**M<sup>r</sup> : DJ .BELKACEMI**

**Dirigé par:**

**M<sup>r</sup> : M. IMACHE**

**Réalisé par:**

**M<sup>lle</sup>: Amari Fatima**

**M<sup>lle</sup>: Kaci Djouher**

**Promotion:2010/2011**

## ***Remerciements***

Nous tenons à remercier de manière très particulière et à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur BELKACEMI Djamel ingénieur d'état chef de département technique à l'entreprise Electro-Industries de nous avoir proposé et dirigé ce sujet, ainsi que pour sa disponibilité.

Nous tenons à remercier de manière très particulière et à exprimer notre profonde reconnaissance à Madame MEGHARBI .F et Monsieur IMACHE M'hand, professeurs à l'université de Tizi-Ouzou, pour leurs aide précieuse, et de nous avoir orienté pour l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont à tous les enseignants ayant contribué et participé à notre formation, ainsi que les membres du jury qui feront l'honneur d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous le personnel d'unité de fabrication de transformateurs et du laboratoire d'ELECTRO-INDUSTRIES.

## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail :

Ø A la mémoire de ma mère avec laquelle je n'aurais pas le plaisir de partager cet événement,

Ø A mon cher neveu « ADAM » ;

Ø A tous ceux qui me sont chers.

***FATIMA***

## ***Dédicaces :***

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers ; notamment à mes très chers parents qui m'ont donné la chance d'avancer dans la vie, et m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles.*

*A ma grand -mère djadati.*

*Merci infiniment mon frère Waheb.*

*A mon frère Karim et sa famille.*

*A mes adorables sœurs : Hadjira ; Sabrina et Dihia,*

*A ma sœur Nadia et son mari AMAR ;*

*A ma sœur Karima et son mari Kamal ;*

*Un grand merci à Fatiha et Si L'Hocine et toute l'équipe biomédicale dont l'aide été précieuse ;*

*Pour Amar et sa famille ;*

*A mes tentes, mes oncles et leurs enfants ;*

*A mon binôme et sa famille ;*

*A tous mes amis (es) : Nadia ; Kahina, Warda ; Noura. Mouloud, Salima ; Sabrina ; Djouher, Halim ; Khadi ; Ghania, Moh ; Zidane ; Myriem et Karima ; Cherif.....*

*A tous les étudiants (es)de notre promotion 2011.*

**DJOUHER**

## Présentation de l'entreprise :

Elle a été créée sous forme actuelle en janvier 1999, après la scission de l'entreprise mère ENEL (Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques).

Son activité de production remonte à 1986, dans les domaines de fabrications de Moteurs Electriques, Alternateurs et transformateurs.

**L'ELECTRO-INDUSTRIES** est composée de deux unités ; toutes situées sur un même site :

- Ø Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT
- Ø Unité de fabrication de Moteurs Electriques, Alternateurs et Prestation Techniques.

Les produits fabriqués par Electro-Industrie sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE.

La production actuelle d'Electro-Industrie est écoulee sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire de 1,8 Milliards de Dinars.

la capacité de production de transformateurs de notre entreprise couvre les besoins du marché à 70% environ.

Nos ventes de moteurs représentent 30% environ de notre capacité de production.

Il est à signaler qu'Electro-Industries est le seul fabricant de ces produits en Algérie.

L'entreprise emploie un effectif de 818 travailleurs dont 16% de cadres, 34% de maîtrise et 50% d'exécution.

En matière de qualité Electro-Industries dispose de ses propres laboratoires d'essai et mesure, de ses produits ainsi pour le contrôle des principaux matériaux utilisés dans sa fabrication.

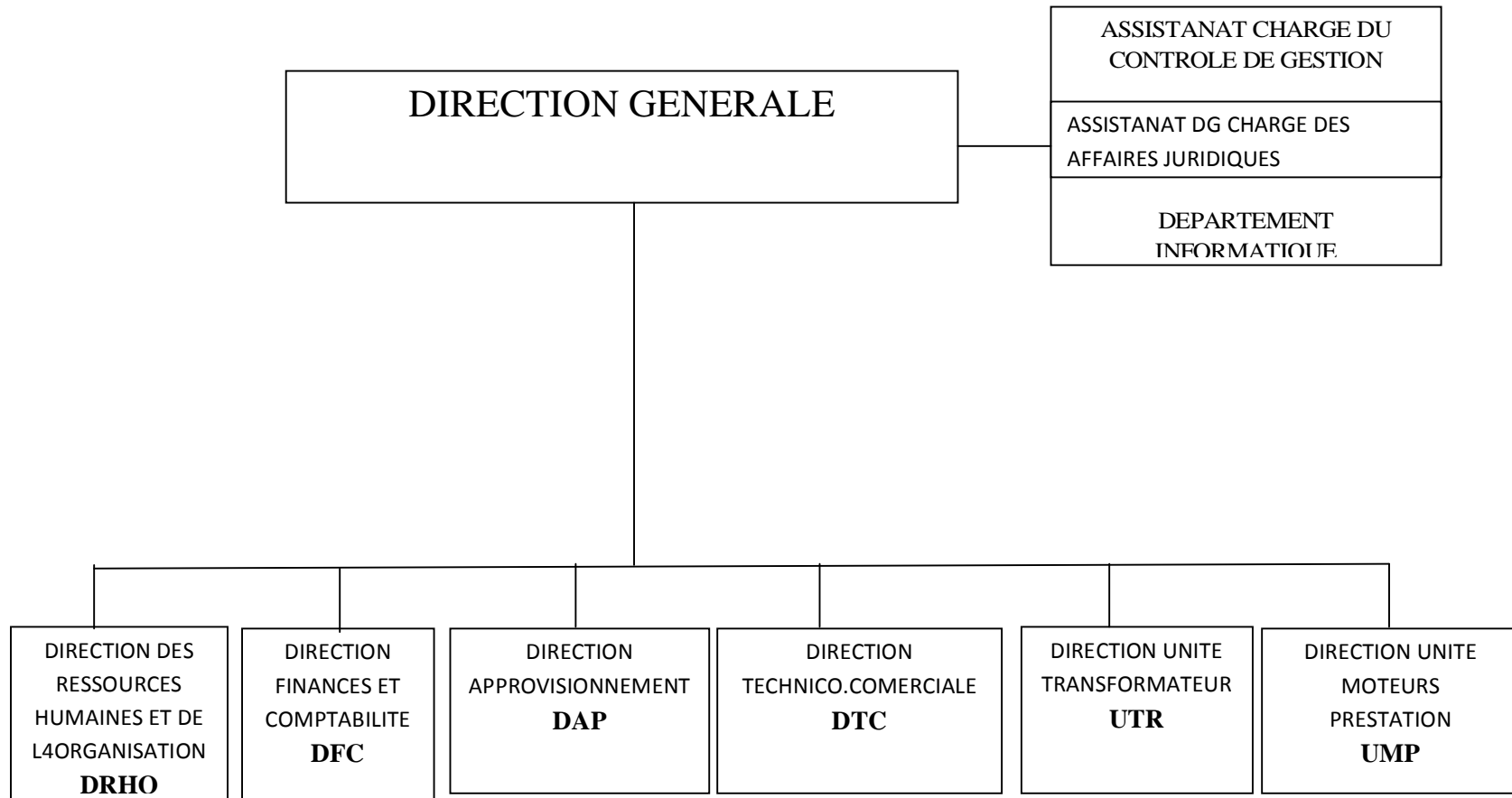
S'agissant du système documentaire, nous utilisons 252 normes internes en plus des normes DIN/VDE et CEI.

Les différentes valeurs d'essai et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôle.

L'Entreprise a procédé à la mise en place de son système Qualité en 2002 et a été certifiée par QMI Canada le 24.07.2004, ISO 9001 version 2000.

# ORGANIGRAMME DE L'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA

## AZAZGA





# Sommaire

---

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les transformateurs.</b>	
I-1- définition.	3
I-2- constitution.	4
I-2-1- la partie active.	4
I-2-2- la partie constructive.	6
I-3-couplage	7
I-3-1- couplage étoile	8
I-3-2- couplage triangle	9
I-3-3- couplage zig-zag	10
I-3-4- l'indice horaire	11
I-3-5-caractéristiques	12
I-4- circuit équivalent d'un transformateur.	13
I -5- type de transformateur.	13
I-5-1- transformateur de courant.	13
I-5-2- transformateur d'impédance.	14
I-5-3-transformateur de mesure.	14
I-5-4- transformateur d'impulsions.	14
I-5-5- transformateur d'isolement.	14
I-5-6- transformateur à l'écran.	14
I-5-7- transformateur de sécurité.	14
I-5-8- transformateur à point milieu.	14
I-5-9- autotransformateur.	14
<b>Chapitre II : Généralités sur les matériaux magnétique.</b>	
II-1-le fer.	15
II-2-classification des matériaux.	15
II-2-1-ferromagnétiques durs.	15

---



---

II-2-2-ferromagnétiques doux.	15
II-3-les alliages.	15
II-3-1-l'alliage Fe-Ni.	15
II-3-2-l'alliage Fe-Co.	16
II-3-3-l' alliage Fe-Si.	17
II-4-influences de silicium sur les propriétés magnétiques, physiques et métallurgiques.	18
II-5-actions des impuretés sur les propriétés magnétiques.	18
II-5-1-les impuretés et les défauts mécaniques.	18
II-5-2-influence de silicium sur les impuretés.	18
II-6-les différentes qualités de tôles élaborées en métallurgie.	19
II-6-1-les tôles Fe-Si à grains non orientés (No).	19
II-6-1-1-propriétés.	19
II-6-1-2-principe de fabrication de la tôle NO.	20
II-6-1-3-épaisseurs conventionnelles.	24
II-6-1-4-isolation de la tôle NO.	24
II-6-1-5-produits finis, produits semi finis.	24
II-6-1-6-caractéristiques magnétiques de tenues.	24
II-6-1-7-utilisation.	26
II-6-2-les tôles Fe-Si à grains orientés(GO).	26
II-6-2-1-propriétés.	26
II-6-2-2-principe de fabrication.	28
II-6-2-3-épaisseurs conventionnelles.	28
II-6-2-4-isolation des tôles à grains orientés.	28
II-6-2-5-caractéristiques obtenus.	28
II-6-2-6- tôles spécifiques.	29
II-7-les tôles magnétiques à haute perméabilité.	29
II-8-les tôles Fe-Si de faible épaisseur.	30
II-9-les tôles Fe-Si à fort % de Si.	31

---

---

**Chapitre III : Générales sur le magnétisme et les pertes.**

III-les grandeurs magnétiques.	32
III-1-1-l'induction magnétique.	32
III-1-2-le champ magnétique.	32
III-1-3-le flux magnétique.	32
III-1-4-l'aimantation.	32
III-1-5-la susceptibilité magnétique.	33
III-2-le comportement magnétique de la matière.	33
III-2-1-le magnétique atomique.	33
III-2-2-le moment magnétique.	33
III-2-3-diamagnétisme.	33
III-2-4-paramagnétisme	33
III-2-5-ferromagnétique.	34
III-2-6-le matériau antiferromagnétique.	35
III-2-7-le ferrimagnétique.	35
III-3- organisation de la matière.	36
III-3-1-l'énergie interne.	36
III-3-2- l'énergie d'échange $W_{ec}$ .	36
III-3-3- l'énergie d'anisotropie $W_{an}$ .	36
III-3-4- l'énergie magnétostatique $W_{mst}$ .	37
III-3-5- l'énergie magnétostrictive $W_{msc}$ .	37
III-4- les domaines élémentaires de Weiss.	38
III-5- le processus de polarisation.	39
III-6- la courbe de première aimantation.	40
III-7-le cycle hystérésis.	40
III-8-les pertes magnétiques.	40
III-8-1- les pertes par courant de Foucault.	41
III-8-2- les pertes d'hystérésis.	41

---

III-8-3- les pertes supplémentaires.	41
<b>Chapitre IV : Essais et normes.</b>	
IV-1-1- analyse chimique.	43
IV-1-1-identification de matériau.	43
IV-1-2-identification de la matière isolante	44
IV-2-analyse physique	44
IV-2-1- les essais magnétiques.	44
IV-3- les essais mécaniques.	45
IV-3-1- la magnétostriction.	45
IV-3-2- détermination de la résistance à la rupture, de la limite élastique et de l'allongement	46
IV-3-3 détermination de la dureté HV5	47
IV-4-essais électriques.	47
IV-4-1-détermination de la résistance superficielle de l'isolement.	47
IV-4-2-détermination de facteur de foisonnement.	48
IV-5-essais divers.	48
IV-5-1-contrôle dimensionnelle.	48
IV-5-2-épaisseur.	48
IV-5-3-largeur.	48
IV-5-4-nombre de pliages.	48
IV-5-5-densité.	49
IV-6-essais supplémentaires.	49
IV-6-1-différentes traitements thermiques.	49
IV-6-2-recuit d'homogénéisation ou de diffusion.	49
IV-6-3-recuit de régénération.	50
IV-6-4-recuit de normalisation.	50
IV-6-5-recuit d'adoucissement.	51
IV-6-6-recuit de restauration et de recristallisation.	51

---

---

IV-6-7-traitement de restauration.	51
IV-6-8-traitement de recristallisation.	52
IV-6-9-recuit de relaxation ou de dimensionnement.	52
IV-6-10-recuit de vieillissement.	53
IV-6-11-recuit complet.	53
IV-7-les normes mises en vigueur.	54
IV-7-1-les pertes spécifiques.	54
IV-7-2-la polarisation.	54
IV-7-3-l'anisotropie.	54
IV-7-4-désignation et nuances.	54
IV-7-5-autres caractéristiques.	54
IV-7-5-1-le facteur de foisonnement.	54
IV-7-5-2-le nombre de pliages.	54
IV-7-5-3-la résistance à la rupture, de la limite d'élastique et de l'allongement.	54
IV-7-5-4- détermination de la rupture HV5.	54
<b>Chapitre V : partie expérimental.</b>	
V- les mesures	56
V .I. Méthode du cadre d'Epstein	56
V-I-1-1 <sup>er</sup> échantillon (écha N°1)	58
V-I-1-1-Les courbes	58
V-I-2-2 <sup>eme</sup> échantillon (écha N°2)	59
V-I-2-1-Les courbes	61
V-I-3-3 <sup>eme</sup> échantillon (écha N°3)	62
V-I-3-1-Les courbes	64
V-I-4-Interprétation des courbes obtenues	66
V-II- Méthode analytique	68
V -II-1 -échantillon N° 1	69
V-II-1-1- Courbes tirées des valeurs du tableau	69
V-II-2- Echantillon N° 2	71

---

V-II-2-1- Courbes tirées des valeurs du tableau	72
V-II-3- - Echantillon N°3	74
V-II-3-1- Courbes tirées des valeurs du tableau	75
V-II-4-Interprétation des résultats	76
V-III- Recherche des courbes moyennes pour les trois échantillons	76
V-III-1- la courbe moyenne de l'échantillon N°1	77
V-III-2- la courbe moyenne de l'échantillon N°2	79
V-III-3- la courbe moyenne de l'échantillon N°3	81
V-III-4- la courbe moyenne des trois échantillons	83
V-III-5-Recherche d'un modèle mathématique pouvant Décrire globalement l'ensemble de ces phénomènes	85
V-III- 6- Tableau de vérification des équations trouvées	85
<b>Conclusion générale.</b>	86
<b>Références bibliographiques.</b>	87
<b>ANNEXE</b>	



# Introduction Générale

### *Introduction Générale*

L'étude des propriétés et comportements des matériaux magnétiques est toujours d'actualité à travers le monde, offrant toujours de nouvelles perspectives. Cette étude a commencé durant le moyen âge. A la fin du 16<sup>ème</sup> siècle le médecin anglais William Gilbert (1544-1633) réalisait une étude expérimentale d'une sphère aimantée qu'il amenait à assimiler la terre elle-même à un grand aimant sphérique.

Ces matériaux dits magnétiques ne se limitent pas qu'aux « aimants » et demeurent à notre époque les poumons de l'électrotechnique. Leur domaine d'application est très vaste, ils interviennent dans l'industrie automobile, les communications et l'information.

Certains matériaux magnétiques doux tels les alliages Fe-Si sont essentiels pour la production, le transport et la transformation de l'énergie électrique. Deux grandes familles de tôles magnétiques sont utilisées pour la réalisation des circuits magnétiques, des équipements électriques dont le principe de fonctionnement est basé sur l'action d'un champ magnétique :

- Ø La tôle à grains non orientés(GN) ;
- Ø La tôle à grains orientés(GO).

Ces tôles Fe-Si à grains orientés constituent les circuits magnétiques des transformateurs et peuvent réduire leurs pertes, ce qui permet d'obtenir d'excellents rendements et meilleurs fonctionnements.

Les pertes d'énergie dues à la variation de l'induction dans les matériaux ferromagnétiques dépendent de phénomènes très complexes :

- Ø Les pertes par hystérésis ;
- Ø Les pertes par courants de Foucault.

Notre travail consiste à évaluer les pertes magnétiques (pertes fer) de quelques échantillons de tôles Fe-Si mis à notre disposition par l'entreprise Electro-Industries d'AZAZGA.

Le présent travail est structuré de la façon suivante :

- Ø Chapitre I: Généralités sur les transformateurs ;
- Ø Chapitre II : Généralités sur les matériaux ;
- Ø Chapitre III : Généralités sur le magnétisme et les pertes ;
- Ø Chapitre IV : les essais magnétiques et les normes ;
- Ø Chapitre V : Partie expérimentale.

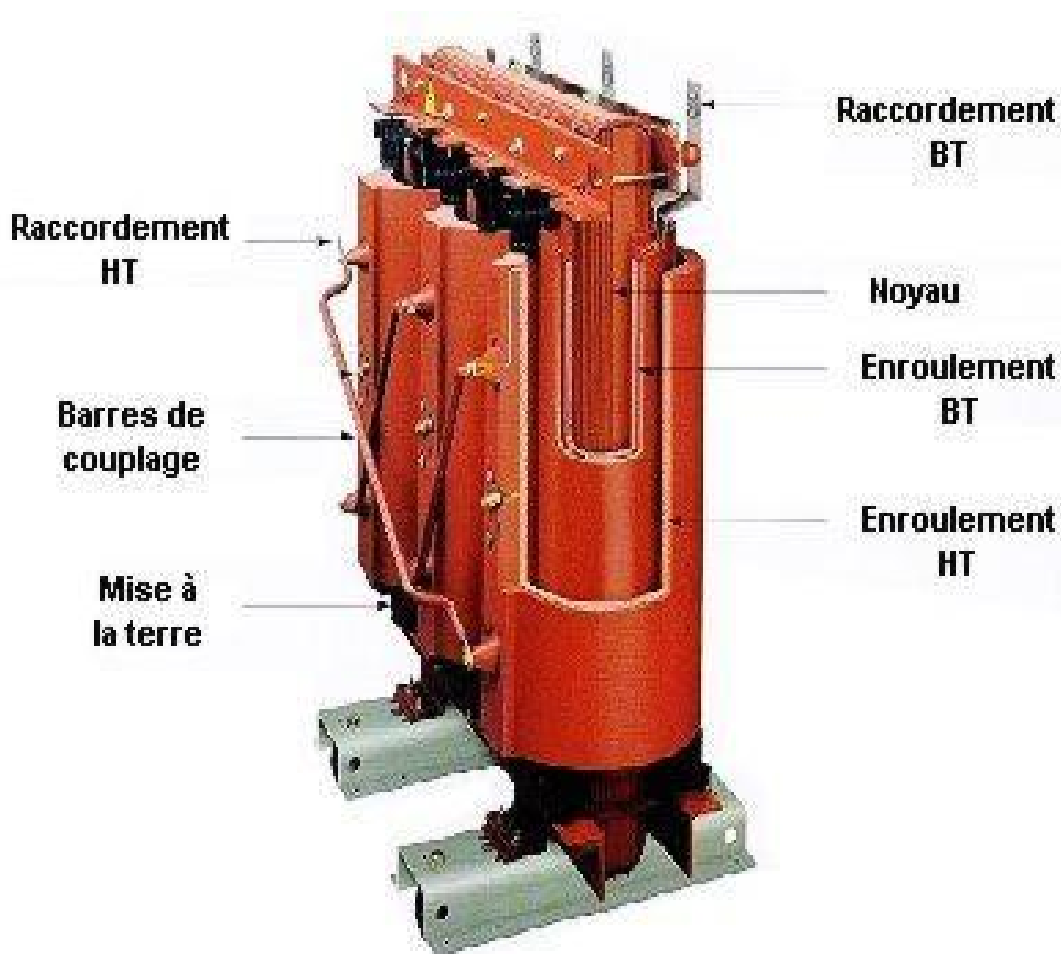


**I-1- Définition :**

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

Le transformateur est constitué en général d'un primaire et d'un secondaire : Le primaire est la bobine qui "envoie" le courant électrique et la tension, le secondaire est la bobine qui les "reçoit".

Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est plus basse que celle délivrée par le secondaire, le transformateur fonctionne en élévateur, dans le cas inverse en abaisseur.



**Figure -1-:** transformateur triphasé sec .

## I-2-Constitution :

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

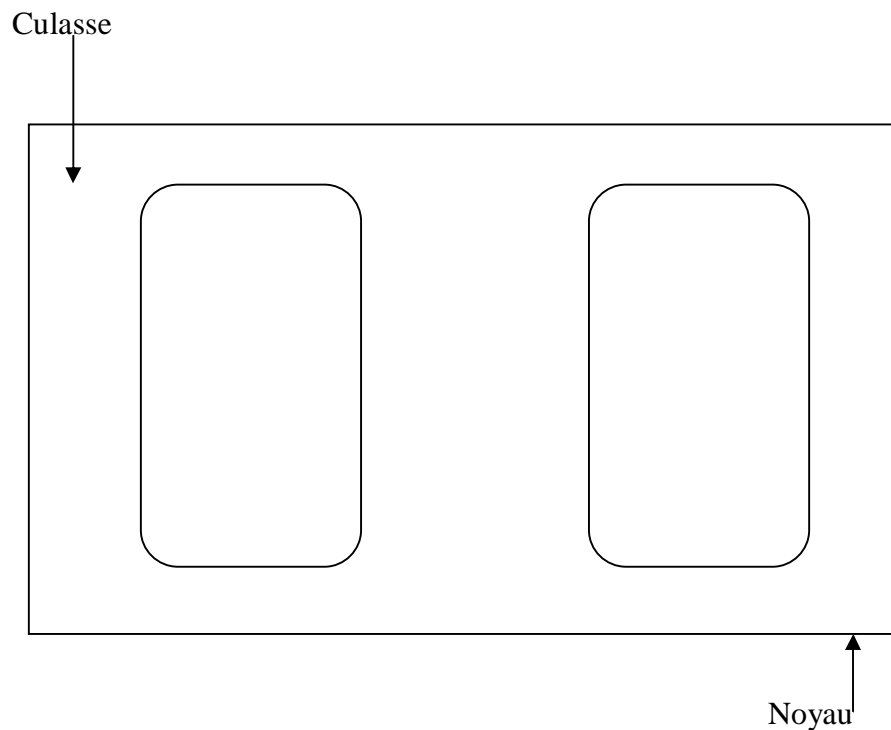
- Ø Partie active.
- Ø Partie constructive.

### I-2.1. La partie active :

Les composantes actives du transformateurs qui assurent la conversion d'énergie sont ; le circuit magnétique et les enroulements ;

#### Ø le circuit magnétique :

Le noyau est formé de trois colonnes réunies entre elles par deux culasses. Il est constitué de tôles d'acier à cristaux orientés, laminées à froid d'épaisseur égale à 0,3mm, le procédé est tel que, l'entrefer est réduit de moitié du fait qu'un enchevêtrement est appliqué lors de l'empilage par l'entreposage des pièces. Sa fonction principale est de canaliser le flux magnétique, en outre, il sert de support aux enroulements.



**Figure -2- :** circuit magnétique du noyau du transformateur.

### Ø Les enroulements :

Les enroulements sont réalisés à partir de conducteurs en cuivre de section rectangulaire ou circulaire, selon que l'enroulement considéré à fort courant ou à tension élevée, sa réalisation sera différente.



**Figure-3-** : enroulements d'un transformateur triphasés.

#### **1-L'enroulement secondaire :**

Comme l'intensité de courant électrique circulant dans l'enroulement secondaire est d'une valeur importante, cette valeur impose dans certains cas un nombre de spires et une section de conducteur relativement importantes.

Dans le cas où la section est très importante, des conducteurs élémentaires de faibles sections sont alors utilisés et réunis en parallèle par une connexion extérieure à l'enroulement. Ce procédé facilite la réalisation de l'enroulement, et de même il permet de réduire les pertes par courant de Foucault et par effet pelliculaire, importante dans un conducteur en cuivre méplat isolé en papier.

## 2-L'enroulement primaire :

L'intensité de courant circulant dans l'enroulement primaire est de faible valeur, contrairement à la tension. La faible valeur d'intensité de courant qui parcourt l'enroulement implique l'utilisation d'une section réduite et un nombre de spires important, on le réalise avec du fil en cuivre rond isolé au vernis pour le bobinage en couches, et du fil rond guipé (isolé en papier) pour le bobinage à galettes et en méplat de cuivre pour les enroulements alternés (grand ampérage)

### Ø La prise de réglage :

Les enroulements du primaire ou du secondaire peuvent avoir des connexions externes, appelées prises, à des points intermédiaires de l'enroulement afin de permettre une sélection de rapport de tension. Les prises peuvent être connectées à un changeur automatique de prises en charge pour le contrôle de la tension du circuit de distribution.

## I-2.2. La partie constructive :

Le transformateur comprend en plus des parties actives une série d'éléments mécaniques qu'on appelle pièces constructives, destinées à la fixation et au refroidissement de la partie active au branchement des enroulements sur le réseau électrique :

### Ø La cuve :

La cuve constitue l'enveloppe protectrice de la partie active ; elle doit :

- Avoir une bonne résistance mécanique pour éviter toute déformation sous l'effet du poids de la partie active et de l'huile de refroidissement.
- Être réalisée avec une grande surface d'échange de chaleur avec l'extérieur (cuve en tôle avec ailettes), elle assure un bon refroidissement de la cuve quand il s'agit d'une machine immergée dans l'huile.



**Figure -4-:** La cuve.

**Ø Le couvercle :**

Le couvercle est replié sur les côtés longitudinaux pour accroître la rigidité. Deux œillets de levage soudés servant à soulever le transformateur ou la partie active. il sert de support aux traversées et aux isolateurs ; comme pièces connexions aux réseaux, ainsi que d'autres organes (commutateur, thermomètre, mise à la terre, anneaux de suspension...).

**Ø Le liquide d'isolation :**

Le liquide d'isolation à une double fonction dans les transformateurs : isolation et refroidissement. Les liquides d'isolation doivent pouvoir résister aux variations de température, à l'oxydation et au refroidissement. En outre, ils ne doivent pas être corrosifs. Les transformateurs sous exigences particulières sont remplis habituellement avec de l'huile minérale conformément aux prescriptions internationales en vigueur.

**Ø les traversées :**

Les traversées ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle, la liaison électrique entre les extrémités des enroulements d'une part, les lignes d'arrivées et de départ d'autre part.

Ces traversées doivent satisfaire certaines conditions dont les principales sont :

- La résistance aux efforts mécaniques.
- L'isolement de la connexion par rapport au couvercle.
- La bonne répartition du champ électrique.
- La fixation étanche et robuste sur le couvercle.

**Ø Isolement :**

L'isolement des conducteurs entre eux est réalisé par l'isolement de chacun d'eux. L'isolement des bobinages HT, MT et BT entre eux et par rapport à la masse est obtenu par l'emploi d'écran d'une part, d'un diélectrique général d'autre part.

**I-3-Le couplage :**

Avant de choisir un couplage, on peut faire les remarques suivantes :

- Du point de vue dimensionnel des enroulements, on a toujours intérêt à choisir un couplage Y aux très hautes tensions et couplage triangle D pour les fortes intensités ;
- Avec le couplage étoile Y, chaque enroulement supporte une tension simple qui est :  
 $V=U/3$  ;

- Dans le cas de l'alimentation d'un récepteur déséquilibré, il faut choisir le couplage Zigzag car il permet de répartir le déséquilibre sur les trois colonnes du transformateurs ;
- Avec un couplage triangle D, l'intensité par enroulement est  $j=I/\sqrt{3}$

### I-3-1-Couplage en ETOILE :

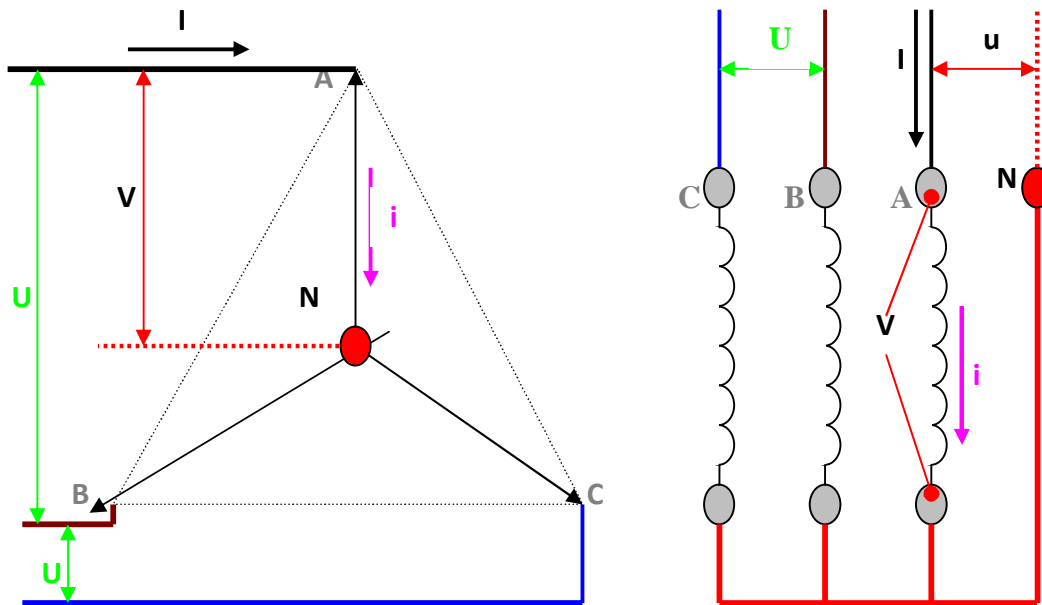


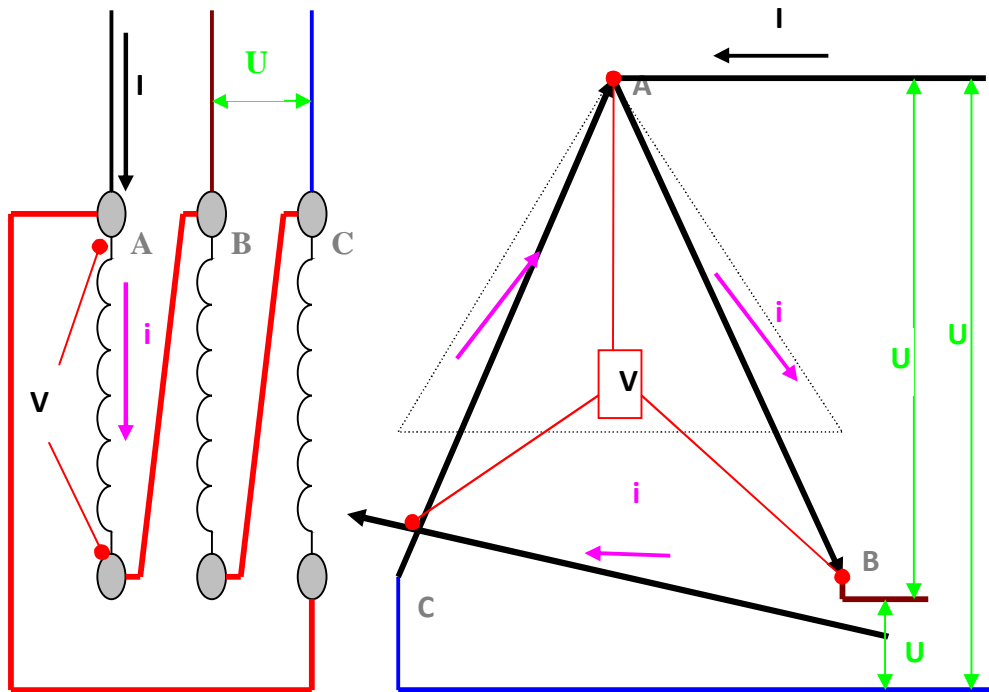
Figure -5- : Couplage étoile des enroulements du transformateur.

#### Ø Constatation :

Nous voyons que dans le cas du couplage étoile :

- La tension par enroulement est :  $V=U/\sqrt{3}$ .
- Le courant dans l'enroulement est :  $i=I$

### I-3-2-Couplage en TRIANGLE :



**Figure -6-** : Couplage Triangle des enroulements du transformateur.

#### Ø Constatations :

Nous voyons que dans le cas du couplage triangle :

-Le courant dans l'enroulement est :  $i = I / \sqrt{3}$ .

-La tension par enroulement est :  $V = U$ .

### I-3-3- Couplage en ZIG-ZAG:

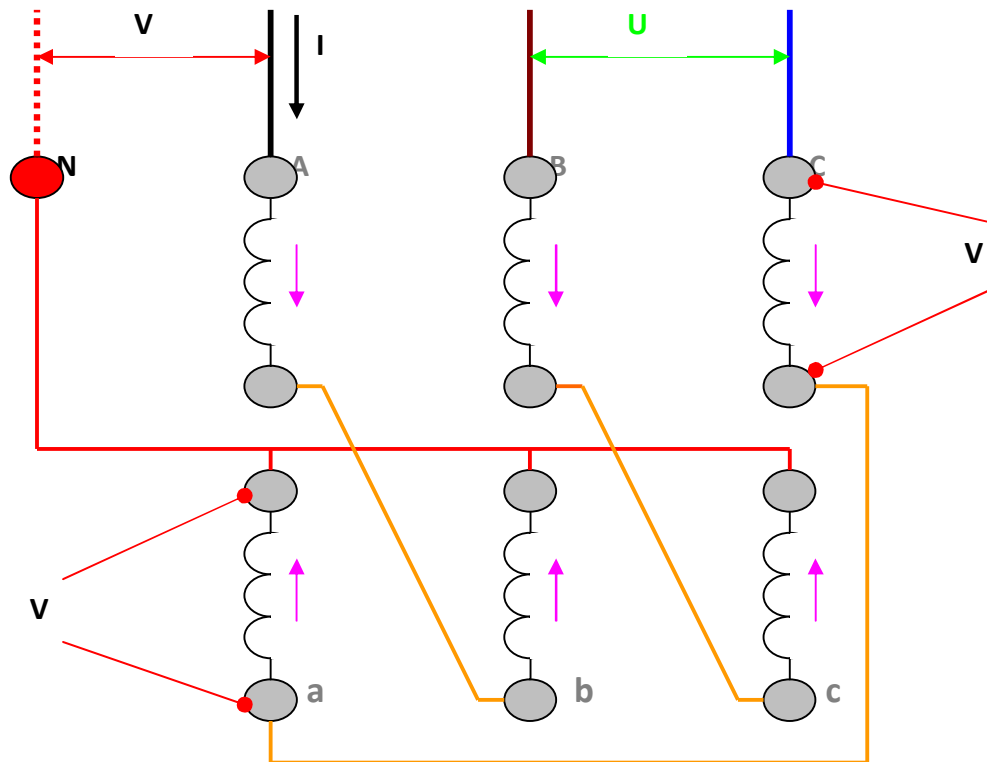


Figure -7- : Couplage Zigzag des enroulements du transformateur.

#### Ø Constatations :

Ce groupement est un cas particulier du groupement en étoile, où chacune des branches est constituée par deux demi-enroulements portés par des noyaux différents

Nous voyons que dans le cas du couplage Zigzag :

-Le courant dans l'enroulement est :  $i=I/\sqrt{3}$ .

-La tension par enroulement est :  $u=U/\sqrt{3}$ .



**I-3-4-L'indice horaire :**

L'indice horaire présente le déphasage électrique entre tensions primaires et secondaires. Il sert principalement lors de la mise en parallèle des transformateurs. Avoir deux indices horaires sur deux transformateurs permet d'être sûr que les tensions secondaires sont en phase et que la mise en parallèle peut être faite sans danger.

L'indice horaire se détermine en fonction du sens de bobinage des enroulements primaires et secondaires et du couplage des transformateurs.

**Nomenclature :**

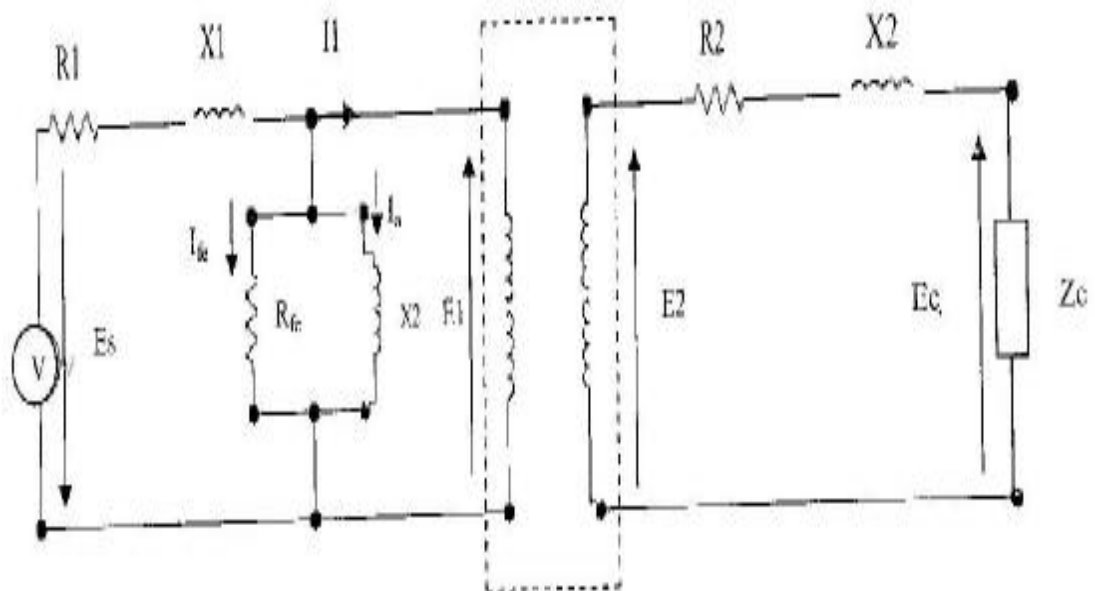
1ère lettre (majuscule) couplage primaire	Y	couplage étoile
	D	couplage triangle
	Z	couplage zig-zag (nécessite des enroulements à point milieu)
2ème lettre (minuscule) couplage secondaire	y, d ou z	idem
3ème lettre	N ou n	neutre sorti
Indice horaire	0, 1, 2, ..., 11	retard de la BT sur la HT exprimé en multiple de 30°

**I-3-5-Caractéristiques :**

Couplage	Rapport de transformation
Yy	$m = \frac{n_2}{n_1}$
Yd	$m = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{n_2}{n_1}$
Yz	$m = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{n_2}{n_1}$
Dy	$m = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$
Dd	$m = \frac{n_2}{n_1}$

**I-4-Circuit équivalent d'un transformateur :**

Une représentation d'un transformateur réel consiste en un transformateur idéal auquel se rattachent diverses et réactances.



**Figure-8- :** Circuit équivalent d'un transformateur.

$R_1, R_2$  : représentent les résistances respectivement des enroulements primaire et secondaire.

$R_{fe}$  : résistance du circuit magnétique, représente les pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

$X_1, X_2$  : représentent les réactances respectives des enroulements, primaires et secondaires (elles tiennent compte des flux de fuites).

$X_0$  : la réactance du circuit magnétique (tiens compte du courant d'excitation nécessaire pour produire le flux)

$E_s$  : la tension d'alimentation ;

$E_2$  : la tension secondaire ;

$E_c$  : la tension aux bornes de la charge.

A partir de ce circuit, on peut calculer les tensions, les courants et les puissances mises en jeu.

$$I'_2 = E'_c / Z_c.$$

$$E'_2 = E'_c + (R_2 + jX_2) \times I'_2$$

$$E'_1 = m \times E'_2.$$

$$I''_2 = I'_2 / m.$$

$$I'_m = E'_1 / Z_m.$$

$$I'_1 = I''_2 + I'_m.$$

$$E'_s = E'_1 + I'_1 \times (R_1 + jX_1).$$

Avec :  $Z_m = R_{fe} / jX_0$ .

- $m$  : rapport de transformateur.

## I-5-Types de transformateurs :

### I-5-1- Transformateur de courant :

Transformateur de mesure abaisseur de courant (donc élévateur de tension), soit :  $m > 1$ . On l'utilise notamment pour mesurer l'intensité d'un courant fort. Le primaire peut alors se réduire à une seule spire. Ce type de transformateur s'utilise avec secondaire en court-circuit (dans le cas contraire, la tension apparaissant au secondaire pourrait être très élevée).

**I-5-2-Transformateur d'impédance :**

Transformateur utilisé pour adapter l'impédance de deux circuits. Exemple : sortie d'un amplificateur basse fréquence (audio) dont la charge est un hautparleur d'impédance normalisée égale  $8\Omega$  à 1000Hz.

**I-5-3-Transformateur de mesure :** transformateur utilisé pour adapter la gamme et assurer l'isolation par rapport au dispositif mesuré d'un voltmètre ou d'un ampèremètre.

**I-5-4-Transformateur d'impulsions :**

Transformateur utilisé pour la commande (isolée) de gâchette des thyristors et des triacs. Il est important de respecter le sens de branchement des bobinages, puisque l'impulsion de courant que le transformateur transmet est orientée dans le sens de conduction des semi-conducteurs.

**I-5-5-Transformateur d'isolement :**

Transformateur tel que  $m = 1$ . Utilisé pour assurer une isolation galvanique entre circuits, ou encore adapter le régime de neutre (schéma de mise à la terre) aux besoins de l'installation.

**I-5-6-Transformateur à écran :**

Transformateur d'isolement incluant un écran électrostatique (utilisation : CEM).

**I-5-7-Transformateur de sécurité :**

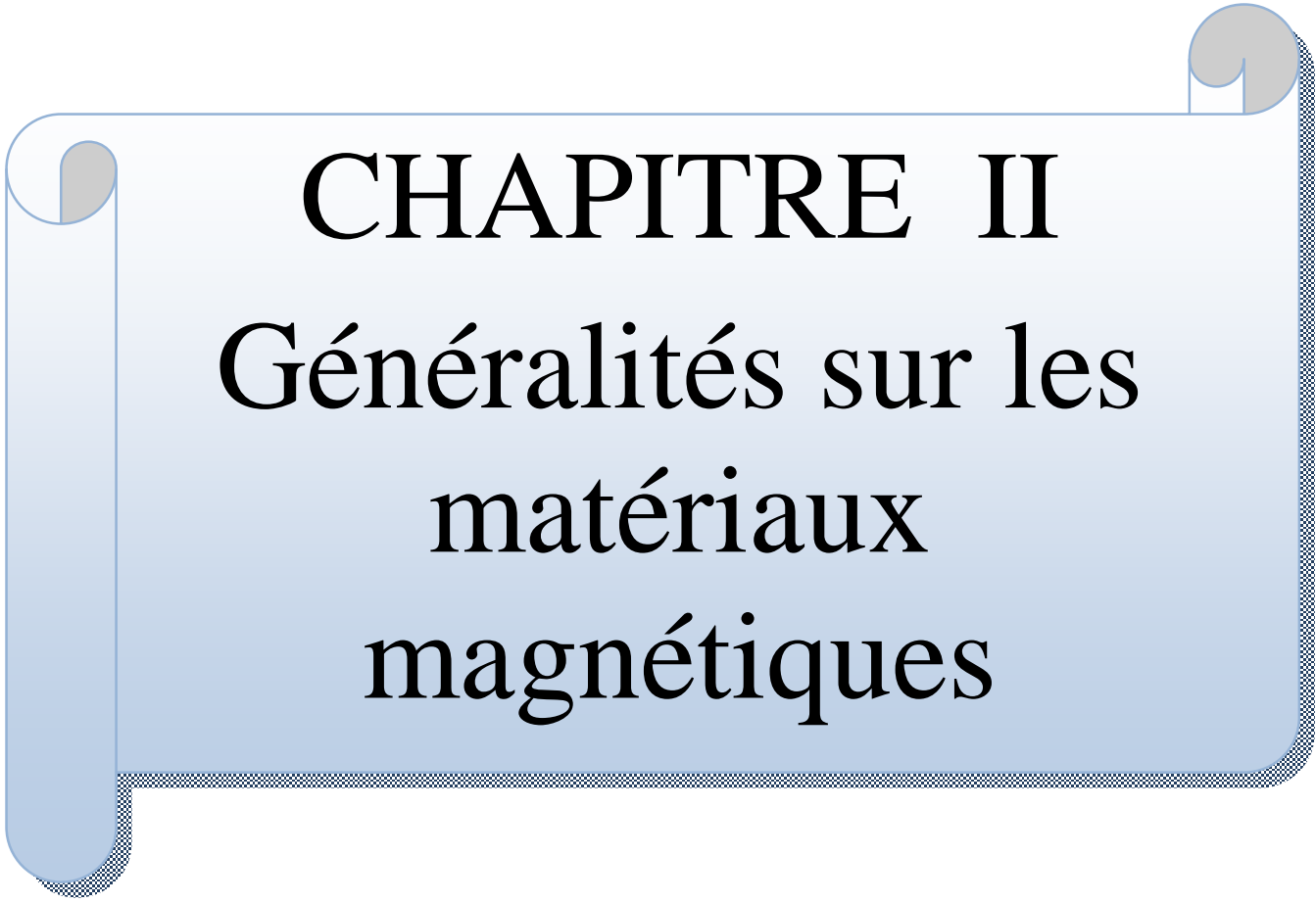
Transformateur à écran à isolation renforcée (utilisation : CEM et sécurité électrique).

**I-5-8-Transformateur à point milieu :**

Transformateur dont le primaire ou le secondaire possède une borne de connexion supplémentaire au milieu de l'enroulement. Permet un schéma symétrique

**I-5-9Autotransformateur :**

Transformateur simplifié à un seul enroulement. Ne permet pas l'isolation galvanique, mais autorise un réglage fin de la tension secondaire par déplacement du curseur servant de connexion de sortie sur l'enroulement.



# CHAPITRE II

## Généralités sur les matériaux magnétiques

**II-1- Le fer : [2]**

On entend par fer très pur, un métal contenant moins de 30p .p.m. (parties par million en poids) d'azote, et de carbone moins de 20p.p.m d'oxygène et moins de 10p.p.m de soufre.

Le fer pur a un comportement cristallographique compliqué puisqu'il change de structure cristalline entre 310°C et 1400°C il passe de l'état cubique centré (le fer  $\alpha$ ) à l'état cubique à faces centrées ( le fer  $\gamma$ ).

Bien que le fer pur soit un élément fondamental pour son moment magnétique intrinsèque, il n'est pratiquement jamais utilisé pour la construction électrique mais la plupart du temps en association avec d'autres éléments d'alliages.

**II-2-Classification des matériaux : [3]**

On classe généralement les matériaux ferromagnétiques en deux familles selon leur coercitivité, les matériaux ferromagnétiques durs et doux.

**II-2-1-Les ferromagnétiques durs :**

Ceux sont des matériaux à large cycle hystérésis caractérisés par une aimantation rémanente, ils sont destinés en général à la fabrication des aimants permanents utilisés dans les machines électriques tournantes, les haut- parleurs, les supports d'enregistrement bandes, disques magnétiques et moteurs génératrices ... etc.

Les matériaux typiques : alliages Alnico, ferrites durs, platine cobalt.

**II- 2-2- les ferromagnétiques doux :**

Ceux sont des matériaux à cycle d'hystérésis très mince et à faible aimantation rémanente, les matériaux présentant ces caractéristiques sont le fer, le nickel, le cobalt et leurs alliages.

Ces matériaux à l'état pur n'offrent pas un grand intérêt à leurs exploitations, souvent on fait recours à leurs alliages ou bien on leur ajoute des additifs comme le silicium.

Ils s'aimantent et se désaimantent facilement, on les utilise le plus souvent dans les applications où l'on cherche à maximiser le flux.

Applications : les transformateurs, inductances, électroaimants et les relais de protection.

Les matériaux typiques : Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co et les ferrites doux.

**II-3- Les alliages magnétiques doux :****II- 3-1-l' alliage Fe-Ni : [1]**

Les alliages Fe-Ni se présentent sous formes de composants tores, bandes et fils ... etc. Ils trouvent leurs applications dans les disjoncteurs, les transformateurs d'impulsions, les capteurs et les téléphonies ...etc.

Les alliages intéressants sont ceux dont le pourcentage de Nickel est compris entre 30% et 80%, en dessous de 30% de Ni, on a un mélange dont sa structure cristalline est composée de structure cubique à faces centrés (CFC) et cubique centré (CC) ce qui conduit à des mauvaises propriétés magnétiques ; au dessus de 80% de Ni ce n'est pas économiques car le Ni est un métal couteux.

Les alliages Fe-Ni cristallisent dans le système cubique à faces centrées (CFC) ce qui leur confère une grande malléabilité. On peut les laminier jusqu'à de très faibles épaisseurs (5 à 10  $\mu\text{m}$ ) et les recuire à toute température.

En jouant sur le pourcentage de Ni, on obtient diverses propriétés intéressantes.

### **II-3-2- les alliages Fe-Co : [3]**

Pour répondre aux besoins de miniaturisation et la diminution de l'encombrement dans les systèmes électromagnétiques, les alliages Fe-Co offrent une grande possibilité d'exploitation dans ce sens. En effet on les utilise dans de nombreux domaines tels : l'aéronautique, la technologie embarquée ...etc.

L'utilisation de Fe-Co diminue considérablement le poids des dispositifs électromagnétiques, impact direct sur la réduction de l'énergie stockée.

Les bienfaits du cobalt dans les matériaux sont nombreux, on peut citer comme exemple : L'augmentation d'aimantation à saturation (2.4T à 20°C) pour 35% en poids de Co, ce qui permet la réduction du volume des machines électriques.

Une température de Curie très élevée, elle peut atteindre 1040°C avec 94% de Co, possibilité d'usage dans les milieux à très hautes températures.

### **II-3-3- les alliages Fe-Si : [7]**

L'aimantation des substances ferromagnétiques constitue encore aujourd'hui la seule source d'induction magnétiquement acceptable. De ce fait la tôle magnétique Fe-Si est le matériau essentiel pour la production, le transport et la transformation de l'énergie électrique.

Deux grandes familles de tôles magnétiques Fe-Si sont utilisées pour la réalisation des circuits magnétiques des équipements électriques dont le principe de construction est basé sur l'action d'un champ magnétique :

- Ø La tôle à grains orientés GO.
- Ø La tôle à grains non orientés NO.

### **II-4- influence de silicium sur les propriétés magnétiques, physiques, mécaniques et métallurgiques : [4]**

L'avantage des alliages Fe-Si réside dans leur conductibilité électrique considérablement réduite. Ainsi par exemple par rapport à celle d'un fer pur, la conductibilité d'un alliage à 3.1% de Si est réduite d'un facteur supérieur à 4.

La diminution de la conductibilité thermique permet d'avoir une réduction des pertes (évacuations de chaleurs réduites), une bonne conductibilité thermique présente un critère favorable de l'alliage Fe-Si. On sait que ce sont les courants induits qui sont responsables des pertes dans la masse métallique car ils freinent le déplacement de parois Bloch durant le processus de l'aimantation et la désaimantation. La conductibilité thermique de l'alliage Fe-Si de 3.2% -3.5% de Si est 4 fois inférieure que celle de fer pur.

L'avantage métallurgique, le fer pur passe de la structure cubique centre (CC le fer  $\alpha$ ) à la structure cubique à faces centrées (CFC le fer  $\gamma$ ) à température 910°C, cette transition complique énormément les traitements à des températures élevées. L'ajout de 1.8% de silicium stabilise la phase  $\alpha$  à toute température, autorisant ainsi à toute une gamme de traitements métallurgiques sans transformation de phase (laminage, affinages et recristallisation).

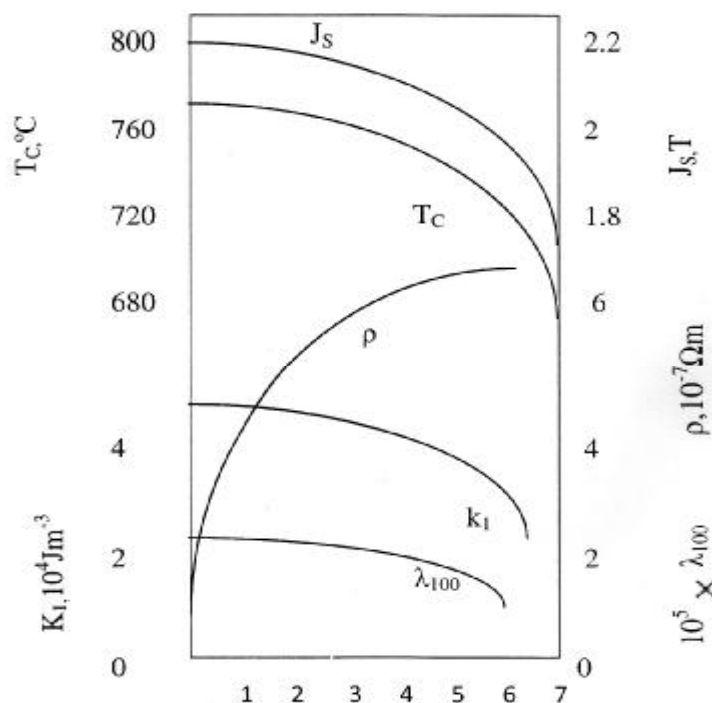
La constante  $K_1$  d'anisotropie magnéto cristalline à une température ambiante passe de  $4.8 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$  pour le fer pur à  $3.4 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$  pour l'alliage à 3.5% de Si. La rotation des moments s'entrouvrent donc facilement, ainsi que sa nucléation des nouveaux domaines aux joints de grain.

L'addition de silicium avec l'aluminium entraîne à un durcissement du métal, ce durcissement rend possible la découpe dans les tôles minces par poinçonnage et à des cadences élevées, de formes compliqués comme celles qu'utilisent les constructeurs des machines.

La présence de Si dans le fer présente cependant deux légers inconvénients puisque la polarisation à saturation et la température de Curie passent respectivement de 2.15T à 2T et 770°C à 760°C.

La constante magnétostriction  $\lambda_{100}$  passe de  $2 \cdot 10^{-6}$  à  $5 \cdot 10^{-6}$  environ.

La figure -1- montre les effets de l'addition de silicium sur les propriétés électromagnétiques de fer :



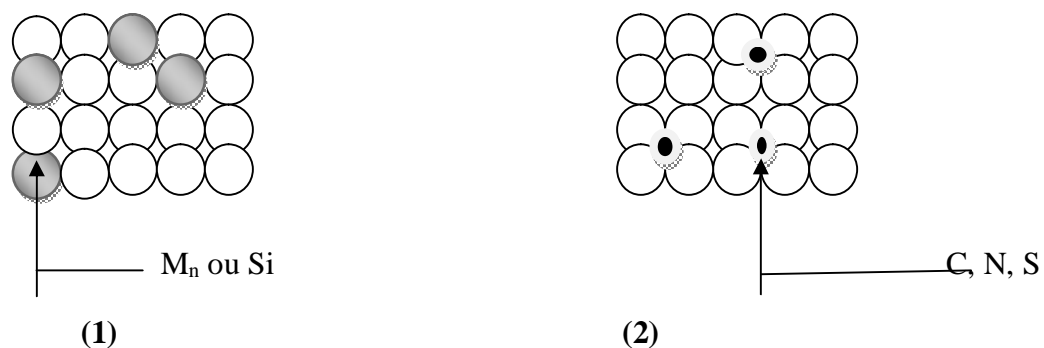
**Figure -9-** : Effets de l'addition de silicium sur les propriétés électromagnétiques du fer à 20°C.



## II- 5- action des impuretés sur les propriétés magnétiques : [7]

### II- 5-1- les impuretés et les défauts mécaniques :

Les aciers élaborés en métallurgie contiennent les impuretés qu'on doit réduire ou supprimer. Les impuretés les plus nuisibles sont le carbone, l'azote et l'oxygène auxquelles s'ajoutent le soufre, le phosphore, le manganèse...ct. Leurs présences dans le fer provoquent l'apparition d'inclusions diverse sous forme de Cémentite ( $Fe_3C$ ), les nitrures ( $Fe_4N$ ), d'oxyde de fer( $FeO$ ) et des composés ( $Fe S$ ).ces derniers influent sur les caractéristiques mécaniques (allongement, résistance, dureté, ductilité et plasticité) et dégradent ainsi la perméabilité. Elles abaissent la polarisation et freinent le déplacement des parois Bloch, ce qui produit des échauffements et des pertes par hystérésis.



**Figure-10- :** localisation des impuretés dans le réseau cristallin du fer.

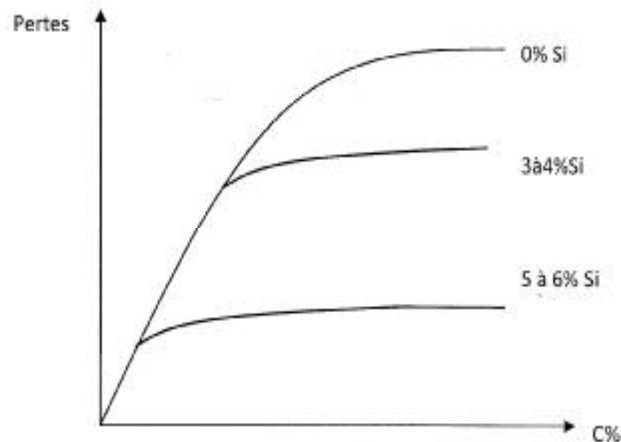
#### Les impuretés agissant en :

- (1) : Se substituant à des atomes du corps de base (fer), ce qui provoque la distorsion du réseau cristallin.
- (2) : Formant des précipités  $Fe_4N$ ,  $FeO$ ,  $Fe_3C$  ou en se fixant dans les interstices du réseau, ce qui accrochera les parois de Bloch et entrainera des efforts locaux importants.

### II-5-2- influence de silicium sur les impuretés : [8]

Le silicium réagit chimiquement sur toute oxyde présent dans le fer, il réduit les impuretés oxygène et forme des silicates  $SiO_2$ , le silicium provoque aussi la décomposition de la cémentite  $Fe_3C$  pour former du graphite  $SiC$ , qui est un carbone presque pur ,le silicium réagit aussi avec l' azote pour former des composés  $Si_3N$  moins nuisibles que les nitrures  $Fe_4N$  qui sont la cause essentielle du vieillissement magnétique.

La figure -3- montre l'évolution des pertes hystérésis en fonction de la concentration de carbone et de silicium ; plus on augmente le pourcentage de silicium plus les pertes seront réduites.



**Figure –11 -:** Influence des concentrations de carbone et silicium sur les pertes par hystérésis.

## II-6- les différentes qualités de tôles élaborées en métallurgie :

Les alliages fer silicium Fe-Si se divisent en deux grandes catégories suivant leur texture en grains orientés ou non :

### II-6-1-Les tôles Fe-Si à grains non orientés (NO) : [4]

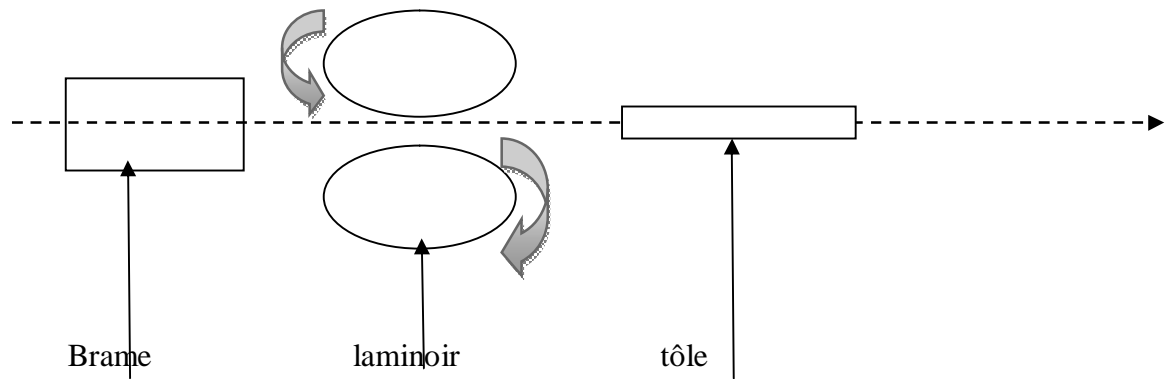
#### II-6-1-1- Propriétés :

Le teneur en silicium toujours inférieure à 3.5% limite au-delà de laquelle on ne peut plus laminier à froid, l'alliage Fe-Si devient fragile.

Le taux de l'aluminium voisin de 0.3%.

La teneur des impuretés (montant, nature, forme physique), qui traduit surtout les possibilités à l'aciérie, pour les qualités les plus performantes il faut pousser très loin l'épuration de la fonte.

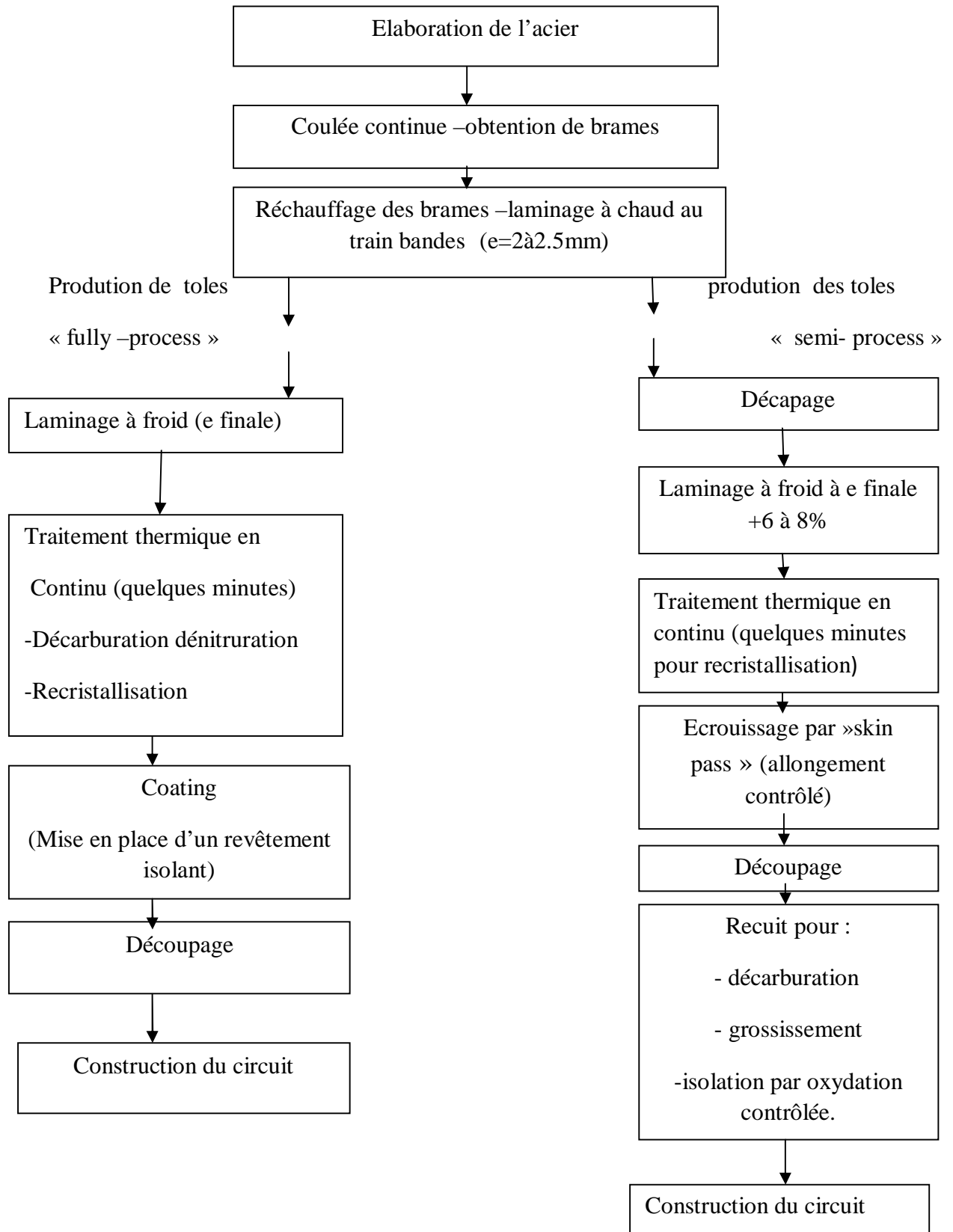
La cristallisation d'une part les joints de grains provoquent par effet magnétostatique l'ancrage des parois Bloch ; il est donc préférable d'avoir des cristaux d'assez grande de taille pour diminuer l'importance des joints des grains ; d'autres parts, les orientations des cristaux ne sont jamais exactement au hasard. Les traitements métallurgiques successifs et la présence inévitable d'impuretés conduisent la plupart du temps à une orientation sensible des grains dans la direction contre la direction de laminage. La conséquence est une anisotrope des pertes atteignant parfois 20%. La figure -4- montre les différentes étapes de laminage à chaud des brames de métal.



**Figure-12-** : laminage à chaud des brames de métal.

### II-6-1-2 principe de fabrication de tôle NO : [2]

Le principe de fabrication des tôles fer silicium Fe-Si à grains non orientés est présenté dans le tableau-I-.



**Tableau –Principe de fabrication des toles magnetiques non orientées selon les deux technologies en usage**

**II-6-1-3-épaisseurs conventionnelles : [2]**

Les épaisseurs utilisées varient de 0.7mm pour les qualités les moins nobles contenant peu de silicium jusqu'à 0.35mm pour les qualités les plus performantes. Les épaisseurs les plus utilisées en France sont 0.5mm et 0.65mm pour les gros moteurs.

**II-6-1-4-Isolation des tôles NO :**

Dans les applications en alternatif; il est nécessaire d'assurer l'isolation des tôles empilées pour éviter les pertes par courants de Foucault .les revêtements isolants des courants sont des revêtements organiques minces (épaisseurs = 2micrometres), ou des vernis phosphatant qui n'entravent pas la soudure des tôles quand elle est nécessaire et qui possèdent un pouvoir lubrifiant poinçon utilisé pour la découpe.

**II-6-1-5- produits finis, produits semi-finis :****Ø Produits finis « fully-process » :**

Les tôles recuites ayant reçu un revêtement, elles sont livrées a l'utilisateur prêtes à l'emploi donc il n'est pas nécessaire de faire un traitement thermique après découpage. Leur procédé de fabrication inclut un recuit à 800°C à une température décarburation permettant d'améliorer les propriétés magnétiques.

**Ø produits semi- finis « semi- process » : [2]**

Elles sont livrées à l'utilisateur sans l'excès de carbone et d'azote n'ait été enlevé et sans revêtement isolant. Elles sont par conséquent moins chères et sont principalement utilisées dans les petits moteurs à fonctionnement intermittent (électroménagères et accessoires automobiles).

**II-6-1-6- Caractéristiques magnétiques obtenues : [2]**

Les principales caractéristiques magnétiques obtenues des tôles à grains non orientés utilisées dans la construction des machines électriques sont consignées dans le tableau –II-.

	Epaisseur Nominale (mm)	Pertes spécifiques (w.Kg <sup>-1</sup> pour B=1.5T)	Induction minimale (en T) pour un Champ (en A.m <sup>-1</sup> )			Utilisation principale	Dénomination normalisée
			2500	5000	10000		
<b>Qualité Fully-process</b>	0.35	2.50	1.49	1.60	1.71	Grosses Machines	Fe V250-35 HA
	0.50	2.70	1.49	1.60	1.71	Grosses Machines tournantes	Fe V270-50HA
	0.50	4.70	1.52	1.62	1.73	Moteurs de moyenne puissance	Fe V470-50HA
	0.65	6.00	1.54	1.64	1.75	Petites moteurs	FeV600-65HA
	0.65	8.00	1.58	1.68	1.76	Relais appareillage Domestique	FeV800-65HA
<b>Qualité Semi-process</b>	0.50	3.90	1.54	1.64	1.75	Moteurs de Moyenne Puissance	Fe V390-50HE
	0.50	6.60	1.60	1.70	1.80	Petits moteurs	Fe V600-50HD
	0.65	5.20	1.55	1.65	1.76	Relais	FeV520-65HE
	0.65	10.00	1.58	1.68	1.79	Appareillage Domestique	Fe V1000-65HD

**Tableau --:** caractéristiques magnétiques normalisées de quelques qualités de Tôles non orientés.

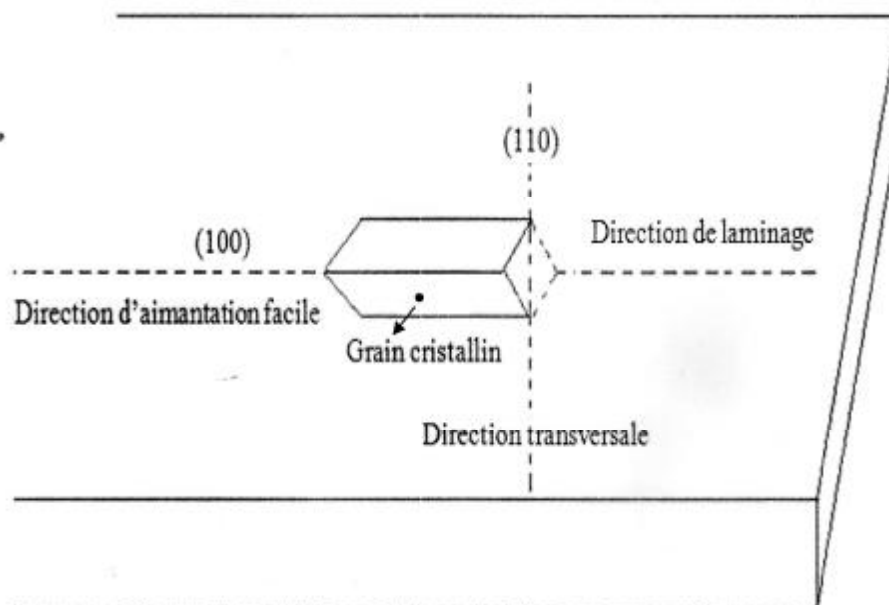
**II-6-1-7-utilisation :**

Ces tôles sont utilisées pour la construction de tous les circuits magnétiques feuilletés, fonctionnant en régime induction variable à fréquence industrielle (à l'exclusion des noyaux des transformateurs de puissances, pour lesquels on utilise des tôles à grains orientés). On les trouve dans tous types de moteurs, les petits moteurs d'essuie-glace, en électroménager, aux dans les plus gros alternateurs hydrauliques, dans les relais, les ballasts pour l'éclairage fluorescent, ...etc.

**II-6-2-les tôles fer –silicium Fe-Si à grains orientés (GO) : [4]****II-6-2-1-propriétés :**

Teneur en silicium à 3%.

Le caractère spécifique de ces tôles réside dans leur texture cristalline .tous les cristaux cubiques centrés que compte la tôle (ils sont de très grand taille ; son diamètre dépasse toujours un centimètre) ont des orientations très voisines d'une orientation idéale, qu'on appelle orientation de Gauss, ou(110) (001) en notation de Miller figure-4-. Ainsi la direction de laminage, dans le plan de la tôle, est toujours très voisine d'une arête du cubique, qui est aussi une direction de facile aimantation.il apparaît alors dans la tôle une structure en domaines spéciaux réguliers en bandes parallèles, d'aimantation alternées, séparés par une paroi de Block à 180° très mobiles. cette tôle acquiert donc facilement une aimantation importante parallèlement à sa direction de laminage et ses pertes sont faibles.

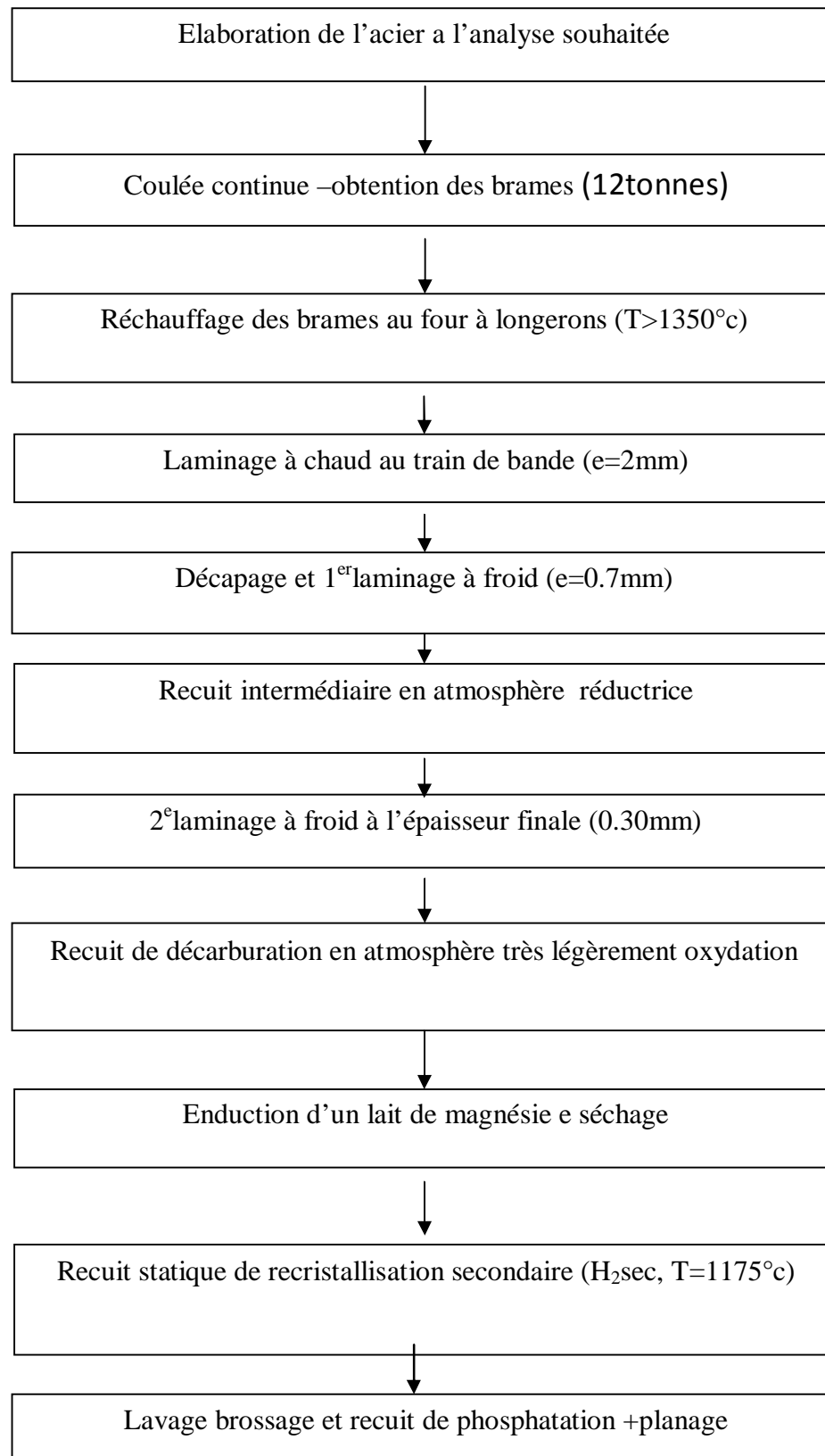


**Figure-13- : orientation des grains dans la tôle de type GO.**

D.L désigne la direction de laminage et D.T la direction transversale : cas d'une orientation de Gauss idéale ou (110) (001).

**II-6-2-2- principe de fabrication : [2]**

Le principe de fabrication des tôles à grains orientés est présent sur le diagramme suivant :



**Tableau- - :** principe de fabrication des tôles magnétiques a grains orientés.



**II-6-2-3- épaisseurs conventionnelles :**

Les épaisseurs disponibles varient respectivement de 0.23 à 0.35mm (aciers classiques) et de à 0.23 mm à 0.30 mm (l'acier a haute perméabilité). Les tôles classiques d'épaisseurs 0.23mm sont commercialisées depuis plusieurs années.

Les tôles à haute perméabilité de même épaisseur sont encours de développement industriel et commercial en Europe. La réduction de l'épaisseur nécessite une maîtrise plus grande de l'orientation des grains.

**II-6- 2-4- isolation des tôles à grains orientés (GO) :**

Les tôles à grains orientés sont destinées en propriétés à la construction des noyaux des transformateurs, qui fonctionnent très souvent dans un bain d'huile minérale pour l'isolation et le refroidissement du système .l'isolant propre des tôles doit indéfiniment rester parfaitement neutre et chimiquement stable vis-à-vis de ce milieu. À cet effet, les tôles à grains orientés reçoivent un revêtement minéral isolant.

Pour les tôles classiques, il s'agit d'un silicate de magnésie appelé forstérite( $Mg_2SiO_4$ ), qui a subit une phosphatation. Parce qu'il est fabriqué par voie chimique à haute température au cours des dernières étapes du processus industriels, ce revêtement isolant est à la fois mince (2à5 $\mu m$ ) et très adhérent.

**II-6-2-5-caractéristiques magnétiques obtenues : [1]**

Les caractéristiques magnétiques essentielles de quelques qualités de tôles à grains orientés qui diffèrent par leurs épaisseurs et l'acuité de leurs textures respectives sont rapportées sur le tableau IV suivant.

Pour une épaisseur donnée, toute amélioration de la texture entraine une diminution sensible des pertes spécifiques et une légère amélioration de la polarisation  $J_{800}$  obtenue dans un champ d'excitation alternatif d'amplitude 800A/m.

	<b>Epaisseur Normale (mm)</b>	<b>Pertes spécifiques <math>\hat{J}=1.7T, 50Hz</math> (en w.kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Puissance apparente Spécifique <math>\hat{J}=1.7T, 50Hz</math> (en VA/Kg)</b>	<b>Polarisation <math>J_{800}</math> (en T)</b>
<b>Tôles « classiques »</b>	0.35(M6)	1.50	3	1.75
	0.30(M5)	1.25	2.7	1.84
	0.23(M3)	1.07	2.6-2.7	1.84
<b>Tôles à « haute Perméabilité »</b>	0.30	1.05	1.40	1.92
	0.27	1.03	1.40	1.92
	0.23	0.85	1.40	1.90
	« scratché »			

**Tableau : caractéristiques de quelques tôles fer-silicium à grains orientés.**

#### **II-6-2-6-tôles spécifiques :**

Il existe de nouveaux besoins en construction électriques, parmi ces besoins essentiels ; une grande aimantation sous un champ faible et la réduction des pertes, pour cela on a introduit des nouvelles technologies qui nous permettent d'avoir des tôles plus performantes.

#### **II-7- les tôles magnétiques à haute perméabilité : [2]**

Les tôles magnétiques à haute perméabilité peuvent atteindre des inductions de près de 2T sous un champ d'excitation de 800A/m et des pertes massiques sensiblement égales à 1W/Kg pour des inductions de travail de 1.7T.

Ces techniques de perfection sont dues notamment à l'addition des nouveaux éléments d'alliage, comme l'aluminium, le cuivre ou l'étain on le traitement par faisceau laser de la surface de la tôle.

A titre indicatif, pour une tôle de 0.30 mm d'épaisseur, le conducteur garantit (norme CE 404-8-7), des pertes maximales de 1.05W/Kg sous une induction de 1.7T et une induction minimale 1.92T sous un champ de 800A/m.

### II-8- les tôles Fe-Si de faible épaisseur :

Lorsque la fréquence de travail s'accroît (ce qui est le cas de beaucoup de dispositifs d'électroniques et de l'électrotechnique aujourd'hui), l'utilisation des tôles trop épaisses conduirait à des pertes électromagnétiques et à des échauffements inadmissibles dans les machines par conséquent le choix de l'épaisseur d'une tôle se fait en tenant compte de sa fréquence de travail. Celui-ci étant elle-même lié directement à la profondeur de peau noté  $\delta$  qui constitue une donnée essentielle présidant au choix d'épaisseur de tôle.

La profondeur de peau, peut être calculée à partir de l'expression :

$$\delta = \left[ \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot F}} \right] \quad (\text{m})$$

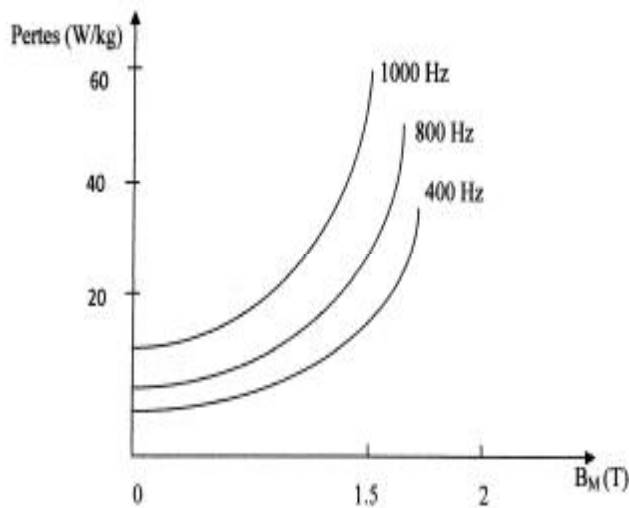
$\rho$  : résistivité électrique en ( $\Omega \cdot \text{m}$ ).

$\mu$  : perméabilité magnétique en ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

F : fréquence en (Hz).

En générale on choisit une épaisseur de tôle « e » voisine de l'épaisseur de peau, cette condition permet d'avoir une répartition sensiblement uniforme de l'induction magnétique à travers l'épaisseur de la tôle.

Les tôles à faibles épaisseurs trouvent leurs applications dans les machines spéciales à grandes vitesses fonctionnant aux fréquences allant de 400hz à 10KHz. les pertes spécifiques de ces tôles dépendent de la fréquence. Elles évoluent comme indique la figure -5- ci-après qui représente les pertes en fonction de l'induction magnétique pour différents fréquences.



**Figure-14-** : pertes spécifiques d'une tôle Fe-Si GO de 0.1 mm d'épaisseur en fonction de l'induction B.

Les valeurs des pertes spécifiques pour quelques épaisseurs sont représentés dans le tableau suivant : [2]

Types de tôles	Qualités à grains orientés Si 3%	Qualités à grains non orientés Si 3.2%
<b>e = 0.05mm</b>	Pertes spécifiques à 400Hz et B= 1.5T (en w/Kg)	Pertes spécifiques à 400Hz et B= 1T (en w/Kg)
	19	/
<b>e = 0.10mm</b>	15	14
<b>e =0.15mm</b>	16.5	15
<b>e =0.20mm</b>	/	15

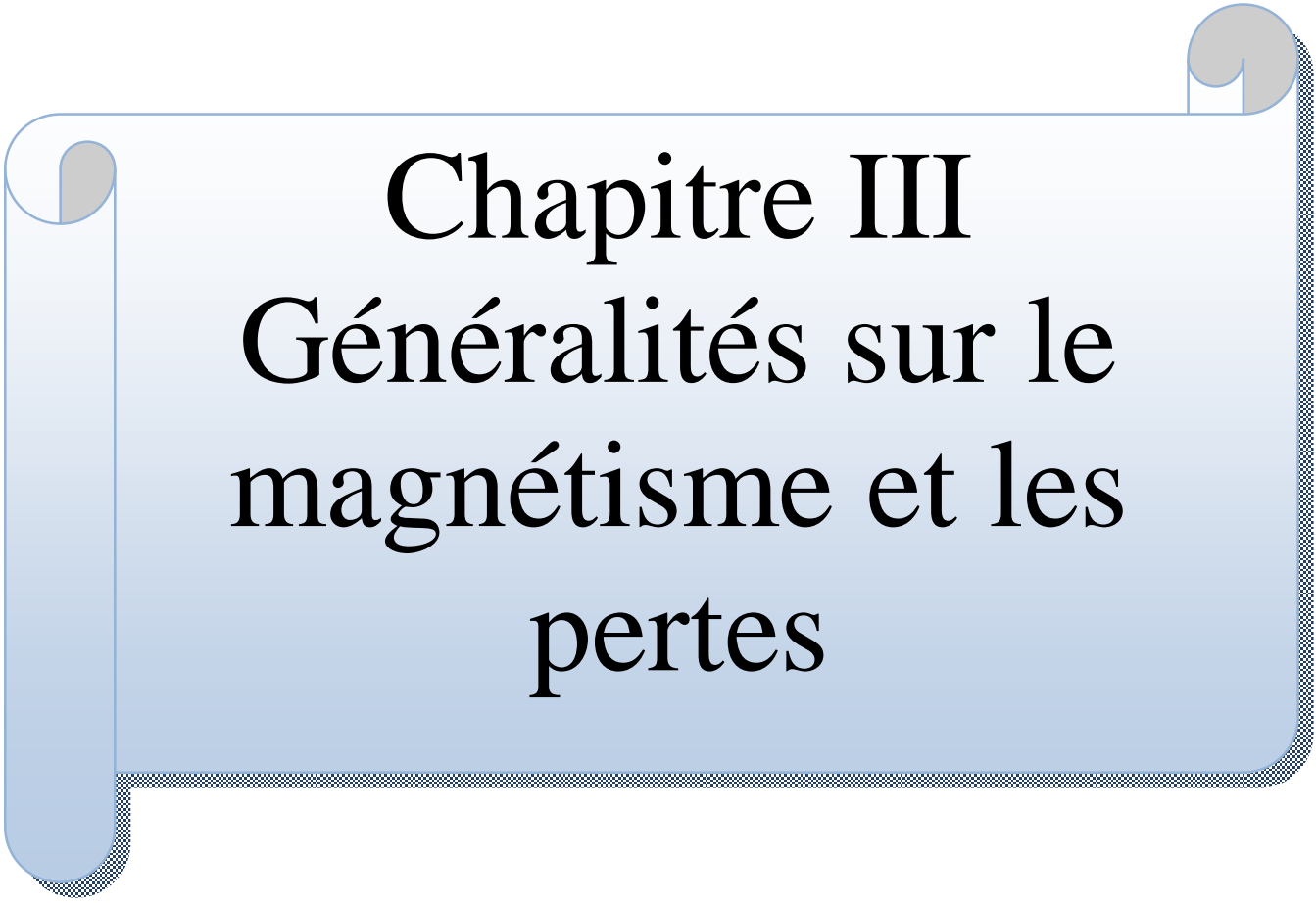
**Tableau –V-:** pertes spécifiques des tôles fer silicium minces à 3% de silicium.

### II-9- les tôles Fe-Si à fort % de Si : [4]

On sait depuis longtemps qu'une teneur en silicium voisine de 6.5% optimise les caractéristiques électromagnétiques de l'alliage Fe-Si. Cette composition correspondre en effet à l'annulation de la magnétostriction, tandis que la résistivité et l'anisotropie magnéto cristalline évolue aussi de façon favorable, passant respectivement de  $10^{-7}$  à  $7 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$  et de  $4.8 \cdot 10^4$  à  $2 \cdot 10^4 J/m^3$ . Ce qui conduit à des pertes magnétiques diminuées de 20 à 30% par rapport à celles des machines conventionnelles.

Un autre avantage est la réduction de l'effet de vieillissement. Mais au dessous de 3.5% de Si ; l'alliage Fe-Si présente une fragilité qui interdit sa mise en formes par les moyens conventionnelles (laminage par exemple). Deux nouvelles technologies sont alors utilisées pour obtenir des alliages Fe-Si contenant un excès de silicium.

- La solidification rapide de l'alliage sur la fonte d'une roue froide tournant à une grande vitesse ; elle procure directement des rubans métalliques de faibles épaisseurs qui s'avèrent être très flexibles.
- L'enrichissement en Si des tôles magnétiques industrielles à 3% de Si ; à partir d'un dépôt chimique en phase vapeur, ce qui préserve la géométrie et la texture initiale.



# Chapitre III

## Généralités sur le magnétisme et les pertes

**III-Les grandeurs magnétiques :****III-1-1-L'induction magnétique : [1]**

En présence matière, le champ  $\vec{H}$  induit dans cette matière une polarisation magnétique  $\vec{J}$  (une orientation et une agitation des molécules ou des atomes de la matière) dont les effets s'ajoutent à ceux de  $\vec{H}$  et on est conduit à définir un nouveau vecteur, l'induction magnétique :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

B : induction magnétique [T].

$\mu_0$  : perméabilité magnétique du vide sa valeur est égale à  $4.\pi 10^{-7}$  [H/m].

$\mu_r$  : perméabilité magnétique relative [H/m].

J : polarisation magnétique [T].

H : champ magnétique [A/m].

**III-1.2. Le champ magnétique :**

Le champ magnétique  $\vec{H}$  est créé dans le vide par toute charge électrique en mouvement ou par un aimant permanent. Le champ magnétique  $\vec{H}$  dépend de la source, il s'exprime en A/m.

Le calcul du champ magnétique fait appel au théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^N N \cdot I$$

N : nombre de spires.

I : le courant [A].

**III-1-3 .Le flux d'induction magnétique :**

Souvent noté  $\phi$ , le flux est une grandeur physique mesurable caractérisant l'intensité et la répartition spatiale du champ magnétique. Cette grandeur est égale au flux du champ magnétique  $\vec{B}$  à travers une surface orientée  $\vec{S}$ .

Son unité d'expression est le weber [wb].

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}.$$

**III-1-4. L'aimantation :**

L'aimantation M est une grandeur physique qui décrit dans quelle mesure le matériau est affecté par un champ magnétique mais également le champ que le matériau lui-même est capable de générer. Son unité est A/m.

Un champ magnétique d'excitation lui donne naissance et elle disparaît après retrait de celui-ci. Cependant, certains matériaux possèdent la capacité de retenir l'aimantation, c'est notamment la vectrice aimantation est définie par :

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{mA}}{V}$$

- $m_A$  : moment magnétique atomique [ $A \cdot m^2$ ].
- $V$  : volume [ $dm^3$ ].
- $M$  : aimantation [ $A/m$ ].

### III-1.5. La susceptibilité magnétique :

Notée  $\chi$ , est la faculté d'un matériau à s'aimanter sous l'action d'une excitation magnétique, la réaction est de deux types : aimantation du matériau s'accompagnant de l'apparition d'une force mécanique.

La susceptibilité magnétique relative est définie par :

$$\chi_r = \frac{M}{H} [\text{sans unité}] .$$

### III-2-Le comportement magnétique de la matière :

#### III-2.1. Le moment magnétique atomique $m_i$ :

Il est constitué d'un moment orbital qui est la rotation des  $e$  autour du noyau et d'un moment de spin qui est la rotation des électrons sur eux-mêmes.

#### III-2.2. Le moment magnétique :

Lorsque la matière est soumise à un champ magnétique, elle s'aimante, c'est-à-dire que chacun de ces éléments de volume  $dv$  est équivalent à une petite boucle de courant, donc on définit le moment magnétique  $\vec{dm}$  :

$$\vec{dm} = I \cdot \vec{ds}$$

-  $I$  : intensité du courant circulant dans la boucle [ $A$ ].

-  $ds$  : est l'aire de la surface limitée par la boucle.

-  $\vec{dm}$  : le moment magnétique  $m$  s'exprime en [ $A \cdot m^2$ ]

Un matériau magnétique apparaît donc, comme un ensemble de moments magnétiques élémentaires (les atomes) interagissent entre eux en un réseau cristallin :  $\mathcal{M} = \sum m_i$

Et selon le comportement de cet ensemble, on distingue les types de magnétisme.

#### III-2.3. Diamagnétisme : [10]

Les matériaux diamagnétiques ont une susceptibilité magnétique  $\chi$  négative, pratiquement constante et très faible de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ . Un matériau diamagnétique offre une grande résistance au passage du champ magnétique. Les lignes d'excitation magnétiques  $\vec{H}$  ne pénètrent pas le matériau. La perméabilité est donc nulle.

La magnétisation induite dans le corps diamagnétique par une excitation magnétique  $\vec{H}$  sera dans la direction opposée à  $\vec{H}$ .

Exemples de matériaux diamagnétiques : l'eau, le cuivre, le graphite, le Bismuth, etc.

#### III .2.4. Paramagnétisme :

Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont paramagnétiques.

Ils possèdent une susceptibilité magnétique  $\chi$  positive, pratiquement constante est très faible de l'ordre  $10^{-6}$  à  $10^{-3}$ . Dans un matériau paramagnétique chaque atome possède un moment atomique non nul.

Comme pour le diamagnétisme, il s'agit d'un phénomène faible et temporaire. Contrairement au diamagnétisme la réponse d'un matériau paramagnétique vise à renforcer l'action de l'excitation  $\vec{H}$  extérieure.

Notons que ce phénomène diminue avec l'augmentation de la température puisque l'agitation thermique désoriente les dipôles magnétiques élémentaires.

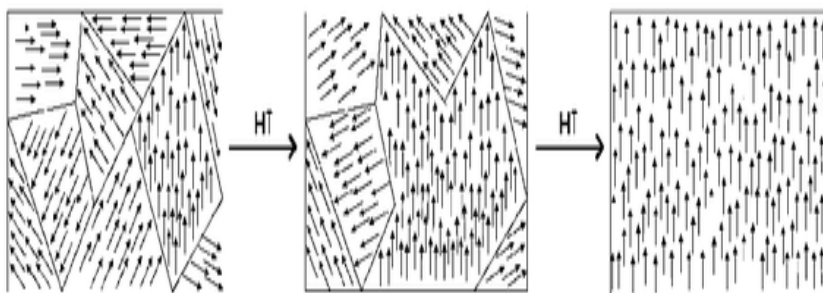
Exemple de matériaux paramagnétiques: l'air (1atm), l'oxygène (1atm), l'aluminium et le platine.

### III.2.5. Ferromagnétisme :

Les matériaux ferromagnétiques possèdent une susceptibilité magnétique  $\chi$  extrêmement grande et variable. La magnétisation d'un matériau correspond à l'orientation des dipôles élémentaires dans une même direction.

A la différence des paramagnétiques cette orientation peu se faire spontanément, en l'absence d'une excitation  $\vec{H}$  extérieur.

La région de l'espace dans laquelle tous les moments magnétiques sont orientés selon une même direction s'appelle un domaine (de Weiss), et les limites entre ces domaines, les parois (de Bloch), les moments magnétiques sont dirigés dans le même sens.



**Figure 15- : Représentation très schématique de l'évolution des domaines de Weiss avec un champ magnétique extérieur croissant**

L'organisation en domaines résulte avant tout de la minimisation de l'énergie interne  $W_i$ .

Si on place un matériau ferromagnétique dans une excitation  $\vec{H}$  extérieure, les parois vont se déplacer de manière à renforcer l'excitation  $\vec{H}$  extérieure. Si  $\vec{H}$  augmente beaucoup, le domaine favorable orienté occupera tout le volume du matériau qui est alors magnétisé à saturation.

Les ferromagnétiques possèdent une température dite de Curie, au dessus de laquelle ils deviennent paramagnétiques leurs susceptibilité suivant alors la loi de Curie Weiss est :

$$\chi_r = \frac{C}{T - T_c}$$

C : constante de Curie ;

$T_c$  : température de Curie [K].



Exemples de matériaux ferromagnétiques : le fer, le magnétite, le cobalt, le nickel et certains de leurs alliages (aciers, ferronickels).

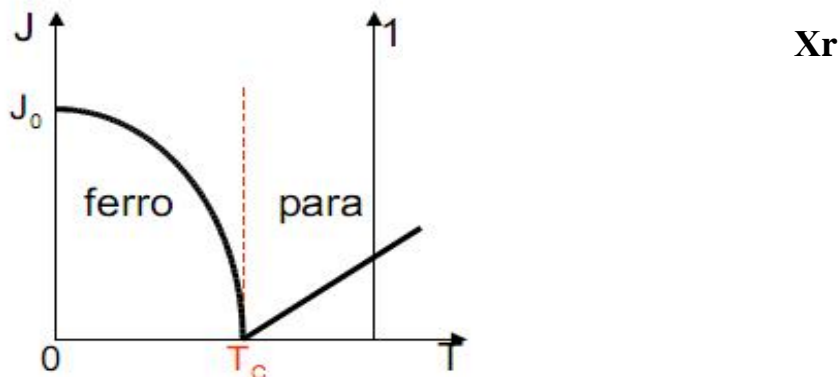


Figure-16- : Variation de l'aimantation en fonction de la température [K].

### III.2.6. Les matériaux antiferromagnétiques : [9]

Dans ce type de matériau les moments magnétiques sont répartis en deux réseaux opposés, et le moment magnétique résultant est très faible ou nul.

### III.2.7. Les ferrimagnétiques :

Dans ce type de matériaux la répartition directionnelle des moments est semblable à celle du ferromagnétique, dans ce cas il n'y a pas de compensation et le moment résultant n'est pas nul, de plus ils possèdent une résistivité importante 1 Ohm par rapport au fer pur, donc la réduction des pertes, les ferrites présentent un intérêt dans l'électrotechnique, ils sont utilisés dans plusieurs applications comme : les aimants permanents.

Le magnétisme à l'échelle microscopique : [9]

Du point de vue microscopique, une tôle est constituée d'atomes; ces atomes possèdent un noyau et un certain nombre d'électrons satellites. La charge équivalente de ce noyau est une charge positive, celle des électrons est négative. Les électrons dotés d'énergie tournent autour du noyau. Cette rotation donne naissance à une force centrifuge qui tend à éloigner les électrons du noyau, mais ils ne peuvent s'en éloigner car la force de Coulomb (liant deux charges électriques) les retient et s'oppose à cette force centrifuge comme représenté dans la figure suivant. La rotation des électrons autour du noyau de l'atome signifie le mouvement d'une charge électrique et se traduit par la naissance d'un courant électrique.

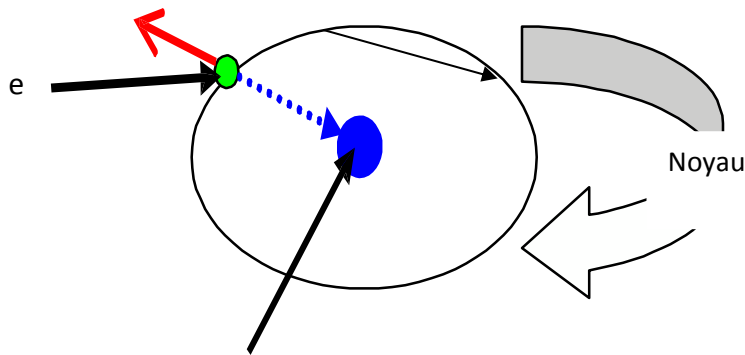


Figure-17- : Représentation atomique

...► *Force de Coulomb*

➤ Force centrifuge

### III.3. Organisation de la matière : [10]

#### III-3-1-L'énergie interne :

Un ferromagnétique soumis à l'action d'un champ magnétique extérieur  $\vec{H}$  doit son énergie à l'action collective de ce champ appliqué et de son propre champ aux quels peuvent s'ajouter des contraintes physiques ou mécaniques. La configuration des domaines est alors déterminée par l'énergie totale du corps.

L'énergie totale ou interne  $W_i$  associée à la structure en domaines comprend quatre termes :

$$W_i = W_{ec} + W_{an} + W_{mst} + W_{msc}$$

$W_i$ : énergie interne [ $J/m^3$ ].

$W_{ec}$ : énergie d'échange [ $J/m^3$ ].

$W_{an}$ : énergie d'anisotropie [ $J/m^3$ ].

$W_{mst}$ : énergie magnétostatique [ $J/m^3$ ].

$W_{msc}$ : énergie magnétostrictive [ $J/m^3$ ].

#### III-3-2-L'énergie d'échange $W_{ec}$ :

Les solides ferromagnétiques ont une structure telle qu'on aura à la fois l'arrangement géométrique des atomes et l'arrangement directionnel des moments.

Dans un cristal ferromagnétique l'énergie d'échange impose l'ordre directionnel des moments atomiques, cette énergie s'exprime :

$$W_{ec} = -\frac{1}{2} \sum_{ij} A_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

$A_{ij}$ : l'intégrale d'échange;

$S_i, S_j$ : les moments de spin des atomes  $i$  et  $j$ .

#### III-3-3-L'énergie d'anisotropie :

L'énergie d'anisotropie c'est l'énergie dissipée ou fournie pour faire tourner l'ensemble des moments magnétiques par rapport aux axes de facile aimantation vers une direction donnée. Les directions de facile aimantation sont les directions dans les quelles cette énergie dépensé  $W_{an}$  est minimale.

Pour un cristal cubique l'énergie  $W_{an}$  est présentée par :

$$W_{an} = K_0 + K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots \quad [J/m^3].$$

Pour un cristal de structure hexagonale l'énergie  $W_{an}$  est présentée par :

$$W_{an} = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \quad \dots \quad [J/m^3].$$

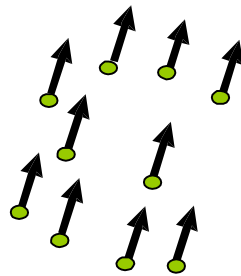
$K_0, K_1, K_2$  : sont les constants d'anisotropie, sont positives ou négatives sont variables avec la température s'exprime en  $[J/m^3]$ .

$\theta$  : l'angle entre l'axe hexagonal et l'aimantation  $\vec{J}_s$  ;

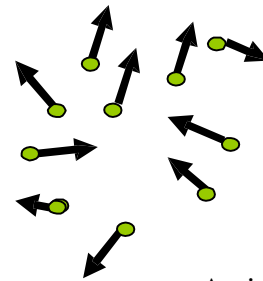
$\alpha_i$  : sont les directeurs qui caractérisent la position de la vectrice polarisation spontanée par rapport aux axes cristallins de référence.

**III-3-4-L'énergie magnétostatique  $W_{mst}$  : [9]**

Cette énergie résulte des interactions entre chaque moment atomique et le champ local où est placé ce moment, ce champ local est la combinaison du champ créé par les atomes voisins et du champ magnétique extérieur. Dans ce premier cas, l'énergie magnétostatique est importante (son influence sur l'atome victime est importante) dans le deuxième cas, l'énergie magnétostatique est pratiquement nulle.



Action globale importante

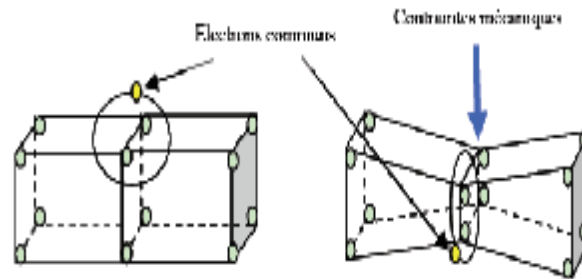


Action globale faible

**Figure-18- : Illustration d'énergie magnétostatique.**

**III-3-5-L'énergie magnétostrictive  $W_{msc}$  :**

C'est l'énergie mécanique associée aux déformations et aux contraintes que les domaines magnétiques exercent les uns sur les autres, le cristal peut s'allonger ou se contracter selon la direction de la polarisation par rapport à la déformation. D'autres effets magnéto élastiques peuvent également apparaître dans un matériau, ce sont les déformations libres qui donnent lieu à des allongements spontanés les causes sont d'origines diverses (contraintes résiduelles de fabrication, contraintes thermiques, etc....) comme le montre le schéma suivant :



**Figure -19-: Exemple schématise l'influence d'une contrainte mécanique.**

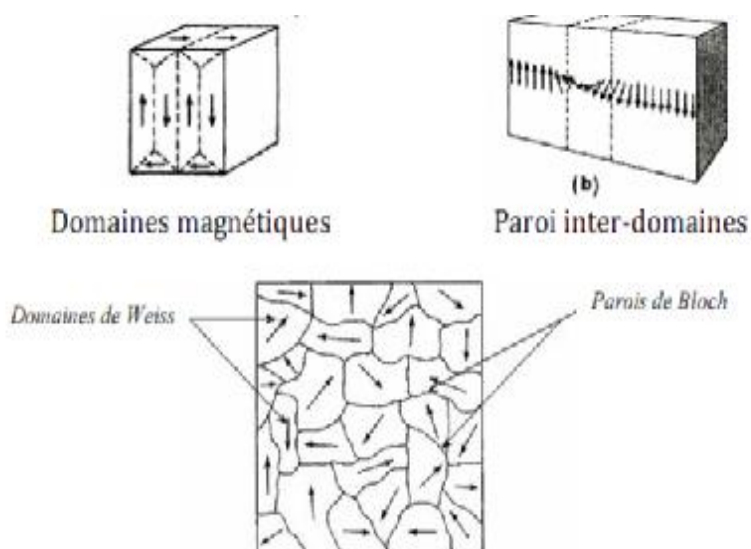
#### III-4-Les domaines élémentaires de Weiss : [11]

Un ferromagnétique sera divisé en plusieurs domaines élémentaires qui s'appellent "domaines de Weiss". L'unité de division en domaines est introduite par P. Weiss en 1907 où il explique l'existence d'un champ fort à l'intérieur de ce ferromagnétique appelé "champ moléculaire" qui oriente spontanément magnétiques et les aligne.

Cette hypothèse ne fut justifiée qu'en 1928 par le calcul de terme d'échange formulé par la théorie quantique. En l'absence du champ magnétique extérieur un bloc de matériau ferromagnétique présente généralement une aimantation faible ou nulle malgré le champ fort moléculaire, cela conduit Weiss à diviser le matériau en plusieurs domaines élémentaires qu'on appelle les domaines de Weiss. Chaque domaine est constitué environ  $10^{-8} \text{cm}^3$  pour le volume.

Tous les moments magnétiques atomiques sont maintenus parallèles de telle sorte que chaque domaine présente un petit volume aimanté à saturation.

Les frontières des domaines s'appellent parois de Bloch.



**Figure-20-: Structure en domaine d'un ferromagnétique**

### III-5-Le processus de polarisation : [10]

Un échantillon d'un monocristal de fer sans défaut dans lequel les domaines magnétiques se présentent comme suit :

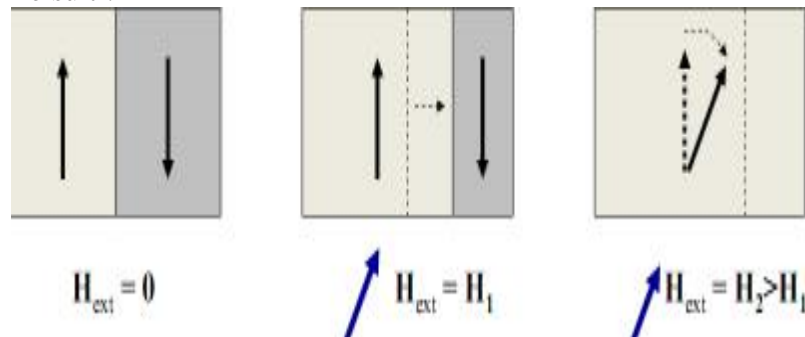


Figure 21- : Structure en domaine d'une substance au cours du processus de polarisation.

Lorsqu'on applique un champ magnétique  $H$ , les moments magnétiques  $\vec{m}$  ont un comportement collectif ce qui permet l'augmentation de l'énergie dans le ce domaine. La condition de l'énergie minimale dans l'échantillon entraîne alors une diminution de volume des domaines. Pour un champ magnétique  $H$  croissant la structure des domaines prendra alors un seul domaine orienté selon la direction du champ appliqué  $H$ . La courbe de première aimantation et le cycle d'hystérésis :

### III-6-La courbe de première aimantation :

Un matériau magnétique est initialement démagnétisé (pas d'aimantation).Lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur  $H$  régulièrement croissant, on obtient la courbe  $B=f(H)$  qui est représentée par la figure suivante :

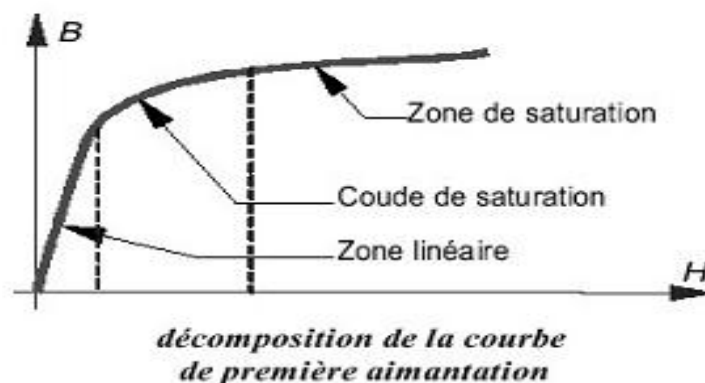


Figure-22- : courbe de première aimantation.

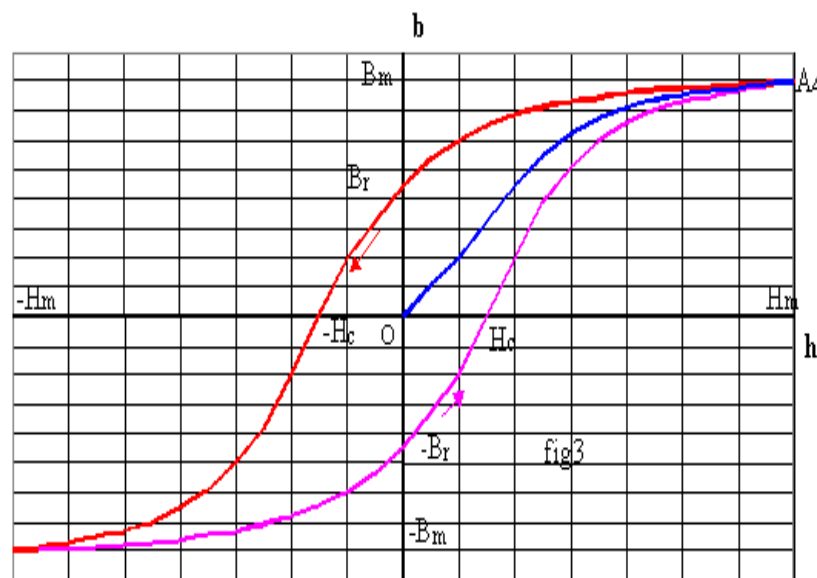
La zone linéaire : les grandeurs  $H$  et  $B$  varient proportionnellement,  $B=\mu H$ ,  $\mu$  : la perméabilité, elle est constante, c'est cette zone qui est utilisée pour les transformateurs et les machines tournantes.

Le coude de saturation : dans cette zone les grandeurs  $H$  et  $B$  ne varient plus proportionnellement, le matériau tend vers la saturation.

La zone de saturation :  $H$  et  $B$  ne varient plus proportionnellement. On a toujours  $B=\mu H$  mais  $\mu$  n'est plus constante ; on dit que le matériau est saturé.

### III-7-Le cycle d'hystérésis : [9]

Lorsque le matériau ferromagnétique possède déjà une aimantation, on le soumet à un champ dont l'intensité varie entre deux limites se traduit par le cycle hystérésis suivant :



**Figure -23- : forme de cycle hystérésis d'un matériau magnétique.**

La forme de cycle hystérésis d'un matériau magnétique se caractérise par :

L'aimantation rémanente  $B_r$  : c'est la valeur de l'induction subsistant en supprimant  $H$ .

Le champ coercitif  $H_c$  : c'est le champ qu'on applique au matériau (en sens inverse) pour annuler  $B_r$ .

$B_m, H_m$  : amplitudes de l'induction et du champ magnétique.

Le parcours de ce cycle d'hystérésis entraîne le matériau des pertes appelées pertes magnétiques ou bien pertes fer.

### III-8-Les pertes magnétiques :

Les pertes magnétiques sont composées de trois termes : les pertes par hystérésis, les pertes par courant de Foucault (pertes dynamiques) et les pertes supplémentaires.

La relation entre les trois types de pertes est :

$$P_{\text{fer}}=P_h+P_F+P_{\text{sup}}$$

$P_h$  : pertes par hystérésis [J].

$P_F$  : pertes par courants de Foucault [J].

$P_{sup}$  : pertes supplémentaires [J].

### III.8.1. Les pertes par courants de Foucault $P_{CF}$ :

Les matériaux ferromagnétiques ont souvent des propriétés conductrices de courant électrique, en présence d'un flux variable, ces matériaux sont le siège de courants induits qui circulent dans la masse de ces matériaux. L'effet joule dissipe l'énergie sous forme de chaleur appelée « pertes classiques par courants induits ».

Ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence, elles peuvent être calculées en connaissant la nature du matériau, ses dimensions, sa résistivité électrique  $\rho$  ou bien sa conductivité électrique.

Ces pertes sont dissipées par effet joule sous forme de chaleur appelée classiques par courant induit :

$$P_{CF} = \frac{K.e^2.f^2.B^2m}{\rho}$$

-e: l'épaisseur du ferromagnétique [m].

-f : fréquence du réseau [Hz].

- $\rho$  : la résistivité électrique [ $\Omega.m$ ].

-K : le coefficient de Steinmetz ;  $5.10^{-5} < K < 4.10^{-2}$  avec l'induction  $0,2T < B < 1,5T$  pour des fréquences  $f < 100Hz$ .

### III.8.2. Les pertes par hystérésis :

Les pertes sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois de Bloch en mouvement durant les processus d'aimantation et de désaimantation, elles correspondent au travail nécessaire parcourus complètement, la boucle d'hystérésis complète.

La loi selon Steinmetz est :

$$P = K.f.B.M^n$$

\* $n= 2$  pour les tôles Fe-Si.

\* $n= 1,6$  pour les tôles fer ordinaires.

F : la fréquence [Hz],  $f < 100Hz$ .

$B_M$  : l'induction crête [T],  $0,2 T < B < 1,5T$ .

K : le coefficient de Steinmetz,  $5.10^{-5} < K < 4.10^{-2}$ , il varie selon le pourcentage d'alliage et la nature du matériau.

### III.8.3. Les pertes supplémentaires ou par excès :

Les pertes supplémentaires peuvent être considérées comme des pertes résiduelles ou anormales dues au non sinusoidalité de l'induction B, plus les pertes par trainage dues au retard de l'induction par rapport au champ appliqué. Les pertes supplémentaires sont obtenues par la différence entre les pertes dynamiques et les pertes par courant de Foucault :

$$P_{dy} = P_{fer} - P_h$$

$$P_{dy} > P_{CF}$$

Si l'induction est sinusoïdale :  $P_{dy} = \eta P_{CF}$  .

Avec  $\eta$  : coefficient d'anomalie des pertes.

Si l'induction est non sinusoïdale :  $P_{dy} = \eta (F/F_s)^2 \cdot P_{CF}$  .

F : le facteur de forme de l'induction non sinusoïdale ;

$F_s$  : le facteur de forme de l'induction sinusoïdale ;

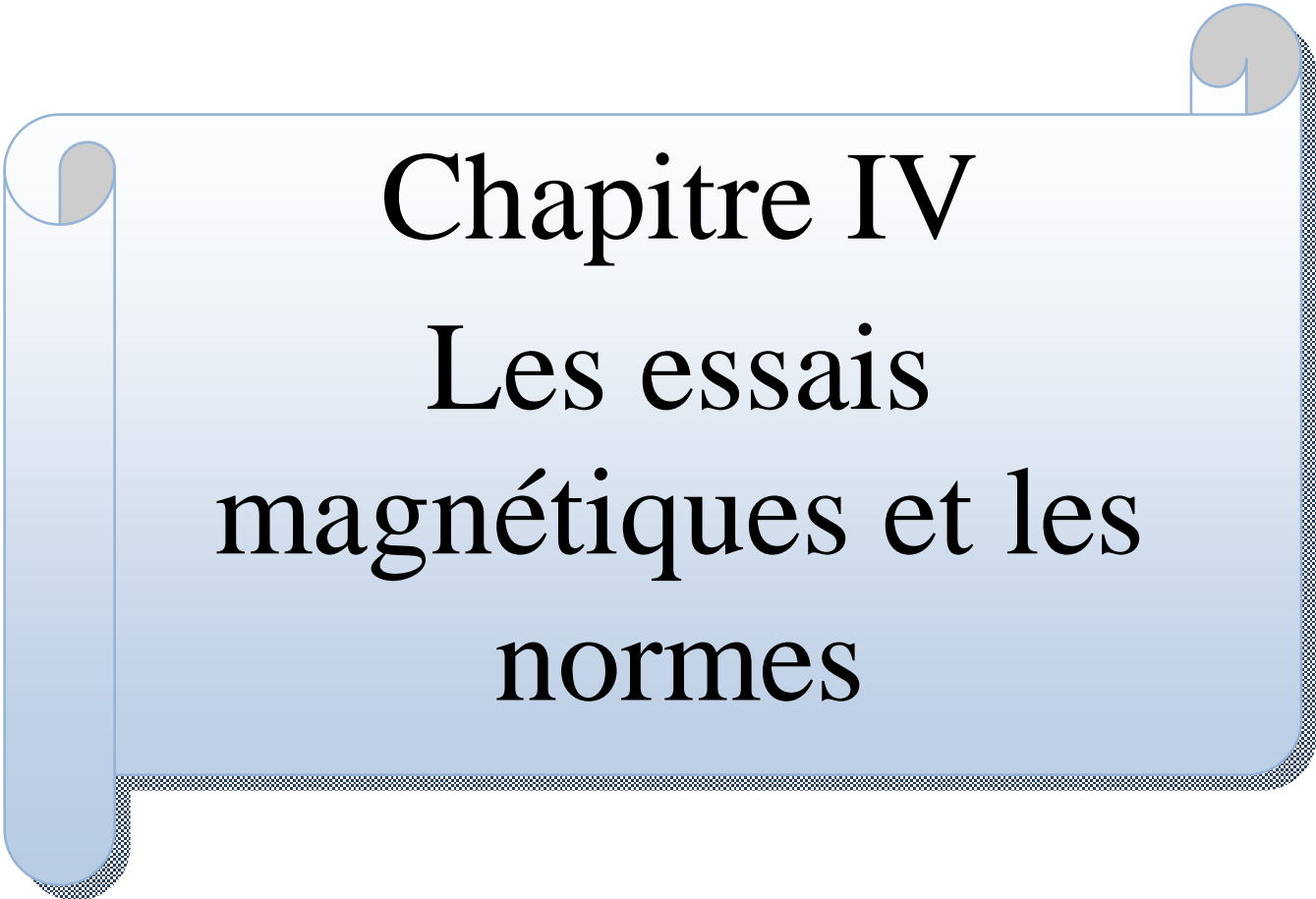
$\eta$  : le coefficient d'anomalie des pertes.

Ceci conduit à une approximation des pertes supplémentaires, selon Bertotti pour une induction sinusoïdale donnée par :

$$P_{sup} = K_{sup} \cdot (B_n \cdot F)^{3/2} .$$

$K_{sup}$  : constante supplémentaire.





# Chapitre IV

## Les essais magnétiques et les normes

Afin d'étudier les propriétés des tôles magnétiques, on effectue des essais de nature physique et chimique.

- Ø L'analyse chimique se caractérise par l'identification du matériau et de la matière isolante.
- Ø L'analyse physique est un ensemble des essais magnétiques, mécaniques, électriques et des essais supplémentaires.
- Ø Les essais magnétiques consistent à déterminer les pertes et les inductions magnétiques.
- Ø Pour déterminer la résistance à la rupture, la limite d'élasticité ainsi que l'allongement on effectue des essais mécaniques.
- Ø Mais pour évaluer la résistance de la courbe superficielle d'isolement et le facteur de foisonnement on réalise des essais électriques.
- Ø On a d'autres essais supplémentaires qui ont pour le but de déterminer la densité, le nombre de pliages ; ainsi que le contrôle dimensionnel et de recuits.

#### **VI-1-Analyse chimique : [5]**

L'analyse chimique comprend :

##### **I V-1-1-Identification de matériau :**

C'est l'analyse quantitative des constituants chimiques (C, S, P, Si, Mn) du matériau, qu'on réalise comme suit :

##### **Ø Préparation d l'échantillon :**

On prélève un échantillon de la tôle ou feuillard magnétique qu'on découpe en petits morceaux selon sa teneur.

##### **Ø Procédé et mesure :**

On fait dissoudre dans une fiole jaugée l'échantillon de tôle dans de l'acide, puis on réalise un volume à un litre. La mesure de la teneur en carbone (C) et en soufre (S) est donnée par un doseur C-S (carbone – soufre), par contre pour le restes des éléments notamment le phosphore (P), le silicium (Si) et le magnésium (Mn), elle est donnée par un A .A.S (spectrophotomètre Absorption Atomique à flamme).

On donne la composition chimique standard des éléments cités auparavant selon la norme CEI dans le tableau ci-dessous :

<b>Constituants chimiques</b>	<b>C</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>
<b>Teneur maximale en %</b>	0.05	0.03	0.03	3.00	0.20

**Tableau I : la composition chimique standard des différents éléments.**

**IV-1-2-Identification de la matière isolante :**

Le précède étant le même que celui utilisé pour l'identification du matériau, néanmoins il y a lieu de préciser que les teneurs des éléments constituant la matière isolante sont données par un A.A.S, l'élément le plus désigné et le silicate de magnésium.

**IV-2-les essais magnétiques : (cadre d'Epstein 25cm) :****Détermination de l'induction et des pertes magnétiques :**

Lors des essais on prépare d'abord l'échantillon à étudier puis on passe à la mesure de l'induction et les pertes magnétiques.

**Ø Préparation de l'échantillon :**

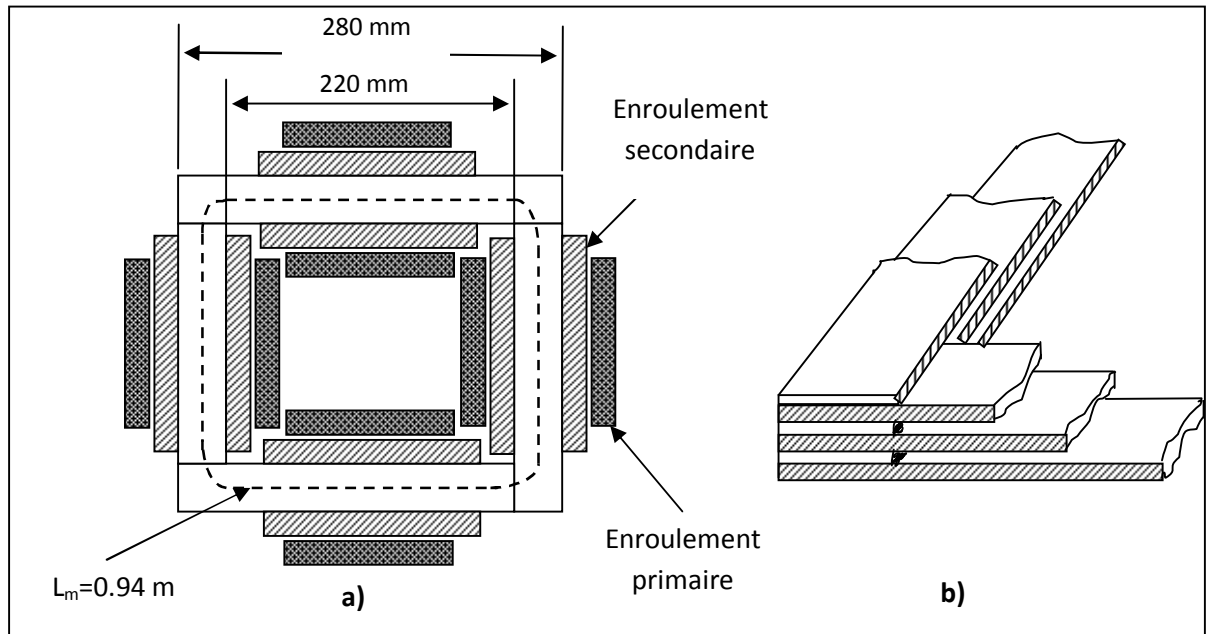
On prélève les bandes plates (coupe franche et sans bavures) à partir des tôles en feuillards magnétiques. La largeur des bandes doit correspondre à celle du caniveau (30mm) et la longueur doit être au minimum égale au côté extérieure(280) du cadre Epstein. Le nombre de N bandes constituant l'éprouvette doit être au moins égale à 16 et sera un multiple de quatre ; on utilise les bandes environ 0.5Kg à 1.0Kg de matière par noyau magnétique.

Les bandes sont assemblées en un circuit carré, avec des joints à recouvrement de telle sorte que le périmètre de noyau vaut exactement 1m.

**Ø procédé et mesure :**

Le cadre d'Epstein de 25cm se compose de quatre solénoïdes dans lesquels sont introduites les N bandes constituant l'éprouvette, de façon à former un circuit magnétique fermé.les bandes sont découpées aux cotés précises et sans bavures dans la tôle qu'il s'agit d'évaluer, soit parallèlement à la direction de laminage s'il s'agit d'une tôle à grains orientés, soit pour moitié seulement dans la direction de laminage et pour moitié dans la direction travers s'il s'agit d'une tôle ordinaire. Voir figures suivantes :





**Figures24 : Cadre Epstein, a) dimensions, b) joints de recouvrement**

On procède de prime à bord au paramétrage de l'analyseur Epstein puis on opère un contrôle sur les valeurs de référence du champ, de l'induction et des pertes spécifiques ( $U=0$ ,  $I=0 \rightarrow B=0$ ,  $H=0$ ,  $P_s=0$ ).

L'analyseur d'Epstein possède deux modes de fonctionnement, selon que l'on soit sur l'automatique ou sur le manuel, on pourra alors lire sur l'écran de l'analyseur les différentes mesures de  $B$ ,  $H$ ,  $\mu_a$ ,  $P_s$ ,  $S_s$  ainsi obtenues.

### IV-3- essais mécaniques :

#### IV-3-1- la magnétostriction : [5]

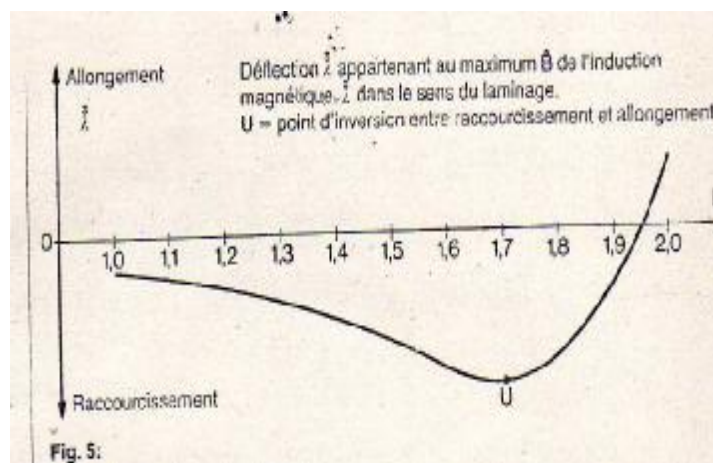
Les effets de la magnétostriction, légères déformations statiques, dans un cristal ferromagnétique, accompagnent une variation de l'aimantation, présentent une forte analogie avec ceux de l'électrostriction ou le piézo-électrique.

C'est –à-dire le changement de la configuration d'un corps magnétisable dans le champ magnétique, conduit aux changements périodiques de la longueur d'un corps dans le champ magnétique alternatif. Il en va de même pour les tôles à grains orientés GO. La fréquence de cette magnétostriction dans le champ alternatif est deux fois celle du champ d'excitation, par exemple l'excitation d'une tôle magnétique par 50Hz donne une fréquence fondamentale de la magnétostriction de l'ordre de 100Hz. la variation de longueur en fonction de l'induction n'est pas strictement linéaire, de sorte que la magnétostriction dans le champ alternatif présente, mis à part l'oscillation fondamentale, des oscillations harmoniques dans le cas d'une induction alternée .

Les harmoniques des oscillations de la magnétostriction sont indésirables car elles sont génératrices de bruit, se situant dans une fourchette de fréquence à laquelle l'oreille humaine

est particulièrement sensible. C'est pourquoi il convient de réduire au minimum tout effet oblique ou transversal et aussi d'éviter des amplitudes d'induction très élevées dans le sens de laminage pour les tôles utilisées dans la fabrication de transformateurs.

Normalement, pour des tôles à grains orientés GO exemptes de contraintes, la magnétostriction présente une tendance négative croissante dans le cas d'une aimantation dans le sens du laminage pour une induction de d'ordre 1.7T environ, c'est-à-dire la tôle se raccourcit de façon continue au fur et à mesure que l'induction augmente. Au delà de ce point, le procédé est inversé et la tôle s'allonge, s'atteignant sa longueur originale entre 1.8 et 2.0T. En augmentant l'induction, la magnétostriction qui en découle devient maintenant positive. Le schéma suivant présente l'influence de l'induction magnétique sur la longueur de la tôle.



**Figure-25 - : l'influence de l'induction sur la longueur d'une tôle magnétique.**

**- Les principaux usages de la magnétostriction concernent :**

- ü l'émission de sons à basse fréquence en milieu sous-marin (sonar)
- ü la génération d'ultrasons (applications médicales ou industrielles)
- ü la réalisation de moteurs linéaires (utilisé par exemple sur machine-outil)
- ü la mesure de force ou de couple
- ü le contrôle actif du bruit et des vibrations, en utilisant simultanément l'effet inverse pour la mesure des vibrations, et l'effet direct pour effectuer l'action correctrice.

**IV-3-2- détermination de la résistance à la rupture, de la limite élastique et de l'allongement :**

**Ø Préparation de l'échantillon :**

On prélève un échantillon de tôle de 210mm de longueur. L'éprouvette revête une forme particulière qui délimite une plage à l'abri de toutes contraintes mécaniques ou efforts d'essais.

Les essais sont réalisés par une machine d'essai électromécanique communément appelée machine de traction universelle.

La vitesse de traction est fonction de la nature de l'essai et de l'élasticité de l'acier, elle varie de 3 à 10mm/mn.

**Ø Procède et mesure :**

On fixe l'éprouvette de la tôle entre les têtes de traction autoserrante de la machine puis on l'attire jusqu'à rupture, on prélève alors les valeurs de différentes mesures affichées par la machine notamment :

- $R_m$  (charge à la rupture).
- $R_e$  (charge à la limite élastique).
- $A\%$  (allongement).

**IV-3-3- détermination de la dureté HV5 :**

**Ø Préparation de l'échantillon :**

On prélève un échantillon de tôle ou feuillard magnétique identique à celui utilisé pour le cadre d'Epstein.

A l'aide de papier –verre, un polissage est effectué sur une partie de l'échantillon afin d'obtenir une surface lisse, plane et sans bavure sur laquelle s'appliquera la charge. La charge appliquée est en fonction de l'épaisseur d'éprouvette et de la qualité de surface.

**Ø Procédé et mesure :**

L'éprouvette est fixée sur la machine de dureté ou duromètre à l'aide d'une serre pièce. Une charge de 5Kg est appliquée à travers pénétrateur en forme de pointe en diamant .

Après que le temps d'application de la charge soit écoulé, la projection de l'empreinte apparaît sur l'écran optique.

Pour la lecture de l'empreinte, on dispose de d'une réglette de mesure graduée en correspondance, c'est le procédé VICKERS.

**IV-4-essais électriques :**

**IV-4-1- détermination de la résistance de la couche superficielle d'isolement :**

**Ø Préparation de l'échantillon :** on prélève un échantillon de 10 éprouvettes issues d'une seule tôle magnétique.

Les dimensions de ces éprouvettes (longueur et largeur) doivent être supérieures à celles de l'ensemble des 10 contacts métalliques que comporte l'appareil de FRANKIN. Pour un meilleur résultat plus représentatif, les éprouvettes doivent être prélevées sur toute la largeur de la tôle.

**Ø procède et mesure**

Le principe de mesure s'appuie sur, et inclus, la méthode décrite a l'origine par FRANKLIN qui permet de caractériser une seule face revêtue a la fois.

L'échantillon est comprimé entre un plateau et l'ensemble de contacts. Une force de 1290 N est appliquée alors graduellement.

La mesure de la résistance de la couche superficielle d'isolement est évaluée par la mesure des courants traversant les 10 contacts.

#### **IV-4-2- détermination de facteur de foisonnement :**

##### **Ø Présentation de l'échantillon :**

On prélève 100 bandes des tôles magnétiques .Elles doivent avoir une largeur d'au moins 20mm et une surface de 50mm<sup>2</sup> et doivent être soigneusement ébavurées avant l'essai.

##### **Ø Procédure et mesure :**

Les éprouvettes sont placées sur les plateaux d'une presse et sont soumises à une pression de 100N/cm<sup>2</sup>. On mesure sous cette pression la hauteur du paquet au voisinage du milieu des deux cotés.

Le facteur de foisonnement est alors calculé suivant la forme :  **$f = m/v \cdot d$**

Avec :

- **m**: masse du paquet de tôles [kg].
- **V** : volume de paquet de tôles [m<sup>3</sup>].
- **d** : densité volumiques [kg/m<sup>3</sup>].

#### **IV-5- essais divers :**

##### **IV-5-1- contrôle dimensionnel :**

La tôle magnétique fournie en rouleaux est soit livrer, en largeur de fabrication ou divisée en largeur d'utilisation.

##### **IV-5-2- épaisseur :**

Le mesurage de l'épaisseur doit être effectué en un point quelconque situé à plus de 40mm des rives. Pour les matériaux de largeur inférieure à 80mm, le mesurage de l'épaisseur doit être effectué dans l'axe longitudinal de la tôle.

Ce mesurage doit être effectuée en utilisant un micromètre ayant une résolution de 0.001 mm.

**IV-5-3- largeur :** la largeur de la tôle doit être mesurée perpendiculairement à l'axe de longitudinale du produit.

**IV-5-4- nombre de pliages :** le principe de l'essai est d'apprécier la ductilité de la tôle

##### **Ø Préparation de l'échantillon :**

On prélève un échantillon d'au moins 20mm de largeur perpendiculaire au sens de laminage à une distance d'au moins 40mm de la rive et du milieu.

**Ø Procédé de fabrication :**

Le principe de l'essai consiste à plier l'éprouvette de **90°** alternativement de chaque coté de sa position initiale. Le rayon de pliage choisit est de 5mm.

Un pliage de **90°** à partir de sa position initiale avec retour compte pour une unité. Le nombre de pliages est déterminé dès l'apparition de la première fissure visible à l'œil nu.

**IV-5-5-densité :** on prélève un échantillon de tôle magnétique identique à celui utilisé en pour le cadre d'Epstein.

On réalise une pesée de l'échantillon afin d'obtenir une masse réelle, puis on calcule son volume. Connaissant la mase et le volume on pourra donc déduire la densité à travers la formule suivante :

$$d = m / v$$

-**d** : la densité volumique **kg/dm<sup>3</sup>**.

-**m** : la masse de la tôle pesée **en kg**.

-**v** : le volume de la tôle en **dm<sup>3</sup>**.

La masse volumique des produits ne fait pas l'objet de garantie. Sauf convention particulière, la valeur conventionnelle de base pour la détermination des caractéristiques magnétiques est égale à **7.65Kg/dm<sup>3</sup>**.

**IV-6- essais supplémentaires :**

Le traitement thermique consiste à chauffer l'acier à une température approprié et lui faire subir des transformations de structure grâce a des cycles déterminés de chauffage et de refroidissement afin d'améliorer les caractéristiques magnétiques et mécaniques : d'affiner le grain, d'adoucir l'acier, dureté, ductilité ; limite d'élasticité ...

**IV-6-1-Différents traitements thermiques :** les divers types sont : **[6]**

**IV-6-2-Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :**

Lors de la première solidification (acier bruts de coulée, aciers moulés) se manifestent des phénomènes de ségrégation mineure : les éléments alliés et le carbone sont répartis de manière hétérogène à l'échelle du grain austénitique. Cette homogénéité chimique qui se conserve plus au moins lors des transformations ultérieures, manifeste pour les propriétés de métal.

Pour éliminer (ou au moins réduire) cette hétérogénéité on fait appelle à un recuit une homogénéisation.

La température du traitement d'homogénéisation par diffusion est en générale comprise entre 1000 et 1200°C.

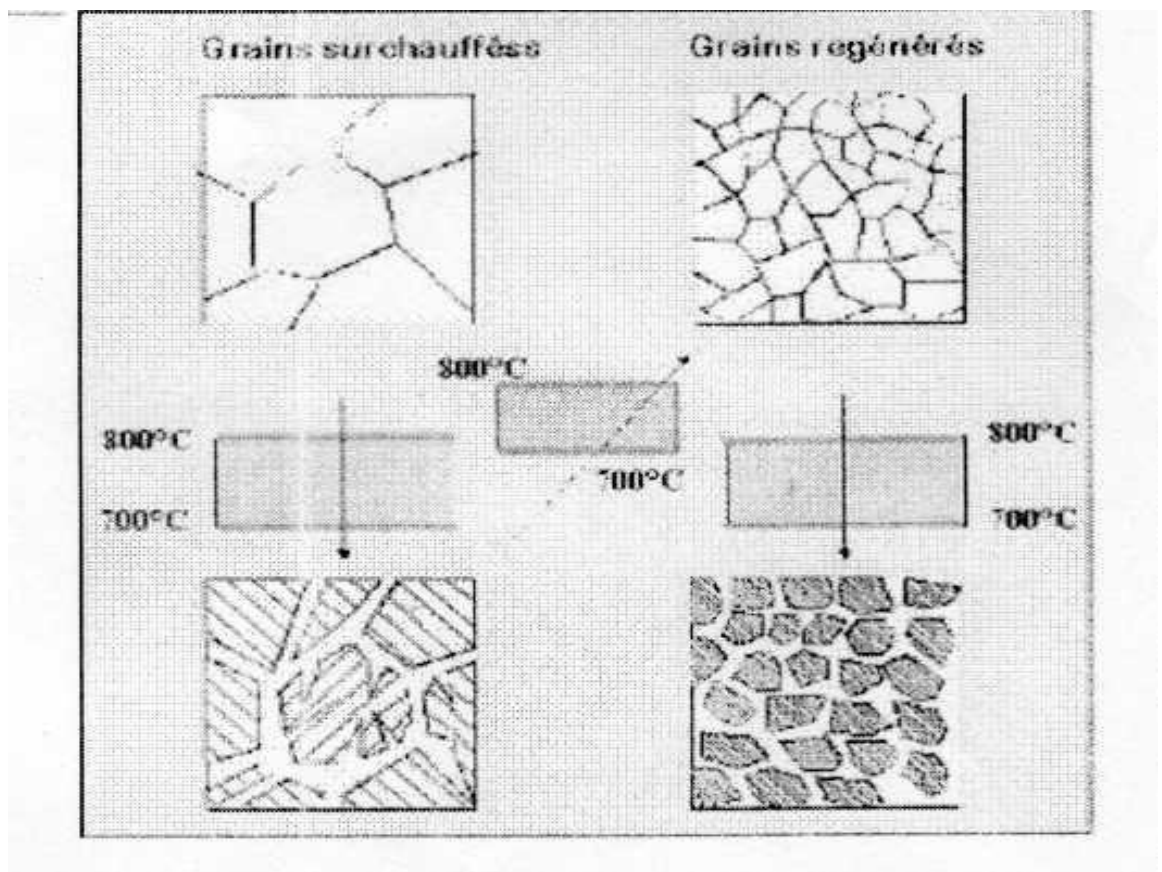


### IV-6-3-Recuit de régénération :

Les pièces ayant subi un traitement d'homogénéisation par diffusion, les moulages d'acier les zones voisines des joints de soudés, les pièces forgées à haute température ont souvent des structures surchauffées.

Le recuit de régénération comprend :

- Un chauffage sans maintien prolongée, à une température comprise entre 750°C et 850° c suivant la nuance de l'acier, de manière à obtenir une austénite a grain fin.
- Un refroidissement à vitesse convenable conduisant ferrite-perlitique. Le refroidissement ne doit pas être trop lent aux alentours de 750- 600°c le grain ferritique ayant tendance à grossir dans cette zone, surtout dans le cas des aciers doux. La figure- II- montre les grains d'une tôle magnétique sous température.



**Figure 26 :** les grains d'une tôle magnétique soumis sous différentes températures.

### IV-6-4-Recuit de normalisation :

Ce traitement comme le recuit complet conduit à des structures ferrite-perlite. Cependant la température de maintien est plus élevée. En outre le refroidissement à l'air calme utilisé est plus rapide que dans le cas du recuit complet. Les structures Ferrite-perlitique obtenues correspondent donc à des grains ferritiques fins et de faibles espacements lamellaires dans la perlite. Ces microstructures très homogènes peuvent être recherchées dans certaines

applications mécaniques et constituent un état initial pour le traitement d'austénitisation avant trempe.

#### **IV-6-5-Recuit d'adoucissement :**

C'est un recuit effectué quelques dizaines de degrés au dessous de 700°C environ avec un refroidissement consécutif lent pour obtenir un état suffisamment adouci et aussi exempt de contraintes que possible.

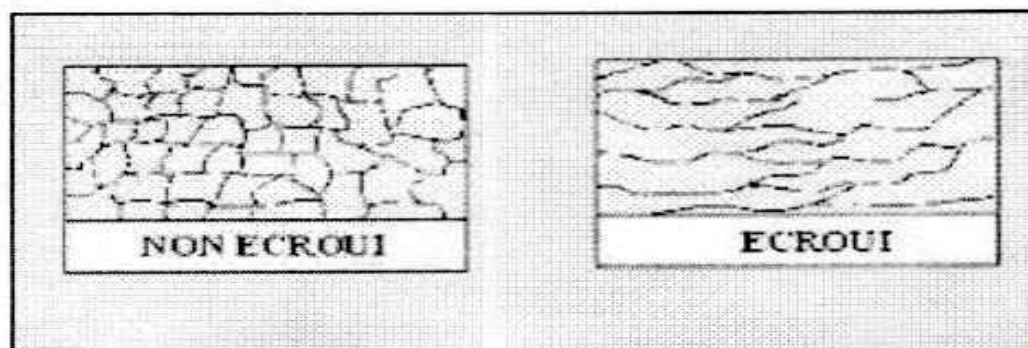
Ce traitement a pour but d'améliorer l'usinabilité où l'aptitude à la déformation à froid, dans le cas où seule la contrainte d'écoulement plastique est importante (et non la capacité de déformation).

#### **IV-6-6-Recuit de restauration et de recristallisation :**

Le travail à froid d'un métal par déformation plastique (laminage par exemple) conduit à un écrouissage du métal. Le métal écroui devient fragile et il est souvent nécessaire de procéder à des traitements pour utiliser le métal ou pour pouvoir continuer le travail à froid.

#### **Ecrouissage :**

Ce précède de déformation à froid (par écrasement) modifie le réseau cristallin, ce qui augmente considérablement la limite élastique et diminue la malléable. Ce phénomène se nomme « écrouissage ». Le coefficient d'écrouissage a plusieurs définitions, mais la plus répandue est définie par la diminution de section. La figure –II– montre un échantillon de tôle magnétique écroui avant l'écrouissage.



**Figure 27 :** la tôle avant et après l'écrouissage.

#### **IV-6-7-Traitement de restauration :**

Recuit effectué en dessous de la température de recristallisation. Il permet de restaurer en partie tout au moins les propriétés physiques et mécaniques sans modification apparente de la structure. Il n'y a pas formation de nouveaux grains et le processus se déroule régulièrement.

**IV-6-8-Traitement de recristallisation :**

Recuit dans la zone de recristallisation située au-dessus d'une température qui dépend de la nuance de l'acier et de son degré d'écroutissage. La structure distordue et écroutie par le travail mécanique à froid est accompagnée d'une nouvelle structure à grains reformés. Cette transformation est accompagnée d'une diminution importante de  $R_m$  (résistance à la traction),  $R_e$  (limite d'élasticité),  $H$  (dureté) et d'une augmentation d' $A\%$  (allongement) et  $K$  (résilience).

**IV-6-9-Recuit de relaxation ou dimensionnement : [5]**

En cas de déformation plastique il est recommandé de faire subir aux tôles à grains orientés un recuit de relaxation car celui-ci rétablit largement la qualité magnétique d'origine. En fonction de l'usage prévu de la tôle, le recuit de relaxation est à prévoir en atmosphère libre pour un recuit d'une courte durée, ou sous atmosphère inerte pour un circuit de durée prolongée.

Pour le recuit des tôles utilisées dans les noyaux empilés, le recuit d'une courte durée dans un four à rouleaux s'est imposé ces dernières années. Il ne dure que quelques minutes, le séjour étant de 1-2 minutes et la température de séjour pouvant être de 860 °C maximum. Puisque le recuit est effectué dans l'air, les bords coupés subissent une oxydation qui leur confère une couche isolante. La graisse et l'huile des étapes de transformation antérieures sont brûlées, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas nuisibles, tout au moins en petites quantités. Le recuit de courte durée n'entraîne aucune détérioration de la planéité des tôles, et la résistivité de la couche isolante des tôles à grains orientés ne diminue en aucun cas.

Le recuit de durée prolongée est recommandé pour les noyaux bobinés il est réalisé dans un four à moufle. Pour une isolation courante la température maximum de séjour est de 820°C (pour un fil de silicate est de 1000°C maximum). La durée de chauffage de séjour et de refroidissement dépend largement de la taille de four et de la quantité de tôles à recuire. Pour éviter tout gauchissement lors de bobinage la durée de chauffage et de refroidissement ne devra pas être trop courte. La durée de séjour doit être telle qu'est les tôles à recuire atteignent partout la température de séjour. Il est recommandé d'utiliser l'azote comme gaz inerte. Des traces d'oxygène sont inoffensives. Par contre il ne doit absolument pas y avoir d'apport d'hydrogène. Les tôles à recuire doivent être exemptes de graisse, d'huile et d'autres substances organiques susceptibles de provoquer une carburation des tôles.

**IV-6-10-Recuit de vieillissement : [4]**

Les performances magnétiques d'un matériau, au bout de 10, 20 et 30 années de fonctionnement ne sont plus celles qu'ils possédaient lors de son élaboration en métallurgie.

Le temps influence négativement sur les caractéristiques magnétiques celles-ci se dégradent progressivement durant les différentes étapes du fonctionnement du matériau. C'est la température qui joue un rôle important dans ce processus.

Les modifications inhérentes à ce phénomène que l'on appelle vieillissement magnétique, se traduisent par une augmentation permanente des pertes. Ce processus de dégradation est la conséquence de l'échauffement des tôles magnétiques ainsi que les alternances d'aimantation et de désaimantation.

Les échauffements du matériau durant les fonctionnements normaux favorisent l'accumulation des impuretés C, O, N. La diffusion de l'azote forme des inclusions  $Fe_4N$  (nitrures) qui s'accroissent avec le temps, rendant les processus de dégradation irréversibles.

#### IV-6-11-Recuit complet : [6]

Ce traitement consiste à chauffer l'acier à une température appropriée et à traverser en suite le domaine de transformation par un refroidissement lent effectué de préférences dans le four ou toute autre installation bien isolée thermiquement. Il provoque une recristallisation et une variation notable de la malléabilité. Ce recuit se fait après un traitement mécanique exemple les opérations d'érouissage et de soudage que le métal a subit préalablement. Le but de ce recuit est d'affiner le grain, d'adoucir l'alliage, d'améliorer l'usinabilité.

**Tableau II** : Exemples de température de recuits pour quelques métaux :

Métal	Recuit détente (°c)	Recuit complet (°c)
Cuivre	150-300	400-700
Laiton (Cu Zn 10)	300-400	600-700
Laiton (Cu Zn 40)	275-350	700-800
Fe-Si	200-225	800-850
Nickel	200-700	700-900
Maillechort (Cu Zn Ni)		700
Aluminium	100-350	350-450
Plomb et Etain	/	20-50
Zinc	/	150
Argent	/	650
Or	/	650

#### IV-7- Les normes mises en vigueur : [5]

Les principaux fabricants Européens de tôles magnétiques (Allemagne, France, Italie) font accompagner leurs produits d'un certain nombre de garanties répondant à des critères de normalisation bien définis.

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) coordonne et homologue les normes de comités nationaux telles les normes Françaises (NF), les normes allemandes (DIN) ... etc.

Les principales garanties portent sur :

**IV-7- 1-Les pertes spécifiques** : mesurée en sinusoïdal à la fréquence industrielle de 50Hz (60Hz) et pour induction de 1, 1.5 ou 1.7 Tesla.

**IV-7-2-La polarisation** : acquise pour un champ magnétique d'excitation défini.

**IV-7-3-L'anisotropie** : c'est exprimé en % qui caractérise, pour les tôles magnétiques, la différence entre les pertes mesurées respectivement suivant le sens de laminage et suivant la direction perpendiculaire.

**IV-7-4-Désignation et nuances** : la désignation conventionnelle de différentes qualités prend en considération la nuance de l'acier (faiblement ou fortement allié), la nature du laminage (à chaud ou à froid), mode de livraison (état fini ou semi- fini avec ou sans recuit finale).

**IV-7-5- ON peut rajout d'autres caractéristiques :**

**IV-7-5-1-le facteur de foisonnement** : le facteur de foisonnement nous renseigne sur la qualité de l'usinage des tôles.

Les valeurs normatives (selon la norme CEI) : **f= 0.96**

**IV-7-5-2-le nombre de pliage** : le nombre qui garantie combien de pliages alternés à 90°c peut subir une tôle avant l'apparition de la première fissure.

Les valeurs normatives : Nombre de pliage : supérieur ou égale à 01.

**IV-7- 5-3-la résistance à la rupture, de la limite d'élastique et de l'allongement** : il n'existe pas des normes précises concernant ce genre d'essais et ce en raison des divers domaines d'utilisations de la tôle et par conséquent de l'effort a appliqué, néanmoins, dans notre cas ; connaissant son domaine d'utilisation on peut fixer une plage sur sa recevabilité suivant des caractéristiques données par la norme **CEI** :

Charge à la rupture (**R<sub>m</sub>**) : 330-340 N/mm<sup>2</sup>.

Charge à la limite élastique (**R<sub>e</sub>**) : 315-320 N/mm<sup>2</sup>.

Allongement (**A%**) :12-14 %.

**IV-7- 5-4- Détermination de la rupture HV5 :**

D'après les caractéristiques et la formule de calcul de VICKERS donnée par la norme, nous pouvons fixer une plage d'évolution de la dureté.

**Dureté** : 140-160 HV5.

**En 10107** : cette norme à pour objectif sur la définition de qualité des tôles magnétiques en acier a grains orientés de 0.23mm, 0.27mm, 0.30mm, 0.35mm d'épaisseur.

**En 10251** : cette norme utilisé pour décrire les méthodes d'essais à utiliser pour la détermination des caractéristiques géométriques suivantes : Planéité, courbe résiduelle, rectitude et la hauteur de bavures des rives cisailées.

Dérivation par apport à la ligne de cisailage due aux tensions internes.

Ces normes appliquées sur les tôles magnétiques en acier destinées à la construction du circuit magnétique.

**CEI 404 : 2<sup>eme</sup> édition 1992** : la 3<sup>eme</sup> partie de cette norme a pour objet de présenter les méthodes de mesure de caractéristiques mécaniques et la perméabilité magnétique à l'aide de l'essai sur la tôle magnétique.

**CEI 404 : 1<sup>er</sup> édition 1989 :** l'objet de cette norme est de définir les qualités des tôles en acier à caractéristiques mécaniques et la perméabilité magnétique garantie. Elle donne également les caractéristiques technologiques et magnétiques des tolérances dimensionnelles ainsi que les conditions réception.

**Partie 8 :** de cette norme présente des spécifications pour les matériaux particuliers section 5 de cette norme présente les spécifications des tôles en acier à caractéristiques mécaniques et perméabilités magnétiques garanties.

**CEI 404 : édition 1988 :** cette norme a pour objet de définir les qualités des tôles magnétiques à grains orientés de 0.23mm, 0.27mm, 0.30 mm, 0.35 mm. Elle donne en particulier les prescriptions générales les caractéristiques magnétiques, caractéristiques géométriques et les caractéristiques technologiques ainsi que les procédures de contrôle.

**La section 7 et la 8<sup>ème</sup> partie :** présente les caractéristiques pour les matériaux particulières : tôles magnétique à grains orientés laminées à froid et livrées à l'état fini.

**CEI 404 : 1<sup>ER</sup> édition 1987 :** cette norme a pour objet de définir les méthodes d'essai à utiliser pour la détermination des caractéristiques géométriques des tôles magnétiques en acier. Cette norme s'applique à tôles magnétiques destinées à la construction de circuits magnétiques.

**La 9<sup>ème</sup> partie :** présente la méthode de détermination des caractéristiques géométriques des tôles magnétiques en acier.

**CEI 404 : 1<sup>er</sup> édition 1988 :** la norme est applicable aux tôles et feuillard magnétiques en acier destinées à la construction des circuits magnétiques utilisés aux fréquences comprises entre 400Hz et 1000Hz.

Elle a pour objet de définir la terminologie et la spécifier les méthodes de mesure des propriétés magnétiques des tôles et feuillard magnétique en acier.

La deuxième partie de cette norme porte sur les méthodes de mesure des propriétés magnétiques à fréquences moyennes des tôles et feuillard magnétique en acier.

**CEI 404 : première édition 1991 partie 11 :** cette partie a pour objet de définir une méthode de mesure pour la détermination des caractéristiques de résistance d'isolement superficielle des tôles et feuillard magnétique en acier.

**CEI 404 : première édition 1992 partie 12 :** la présente partie de CEI 404, utilisé comme guide, est en première lieu applicable à l'évaluation de l'isolation intermédiaire des tôles et feuillard magnétiques définis par les sections de la CEI 404 – 8.



# Chapitre V

## Partie expérimentale

Cette partie consiste en la mesure des pertes à vide de trois transformateurs 160KVA/30KV ; 400KVA/30KV et 1000KVA/30KV par deux méthodes de mesures :

- Ø Méthodes du cadre d'Epstein.
- Ø Méthodes analytique.

Pour cela, trois échantillons de tôles Fe-Si à grains orientés de 0.30mm d'épaisseur ont été mise à notre disposition.

- Ø 1<sup>er</sup> échantillon : Congent 2004 un lot de 64 pièces.
- Ø 2<sup>eme</sup> échantillon : Congent 2006 un lot de 64 pièces.
- Ø 3<sup>eme</sup> échantillon : Ase Métal 2011 un lot de 64 pièces.

## **V- les mesures :**

### **V .I. Méthode du cadre d'Epstein :**

La définition et le principe de fonctionnement du cadre sont mentionnés dans le chapitre (IV) paragraphe II. 1.

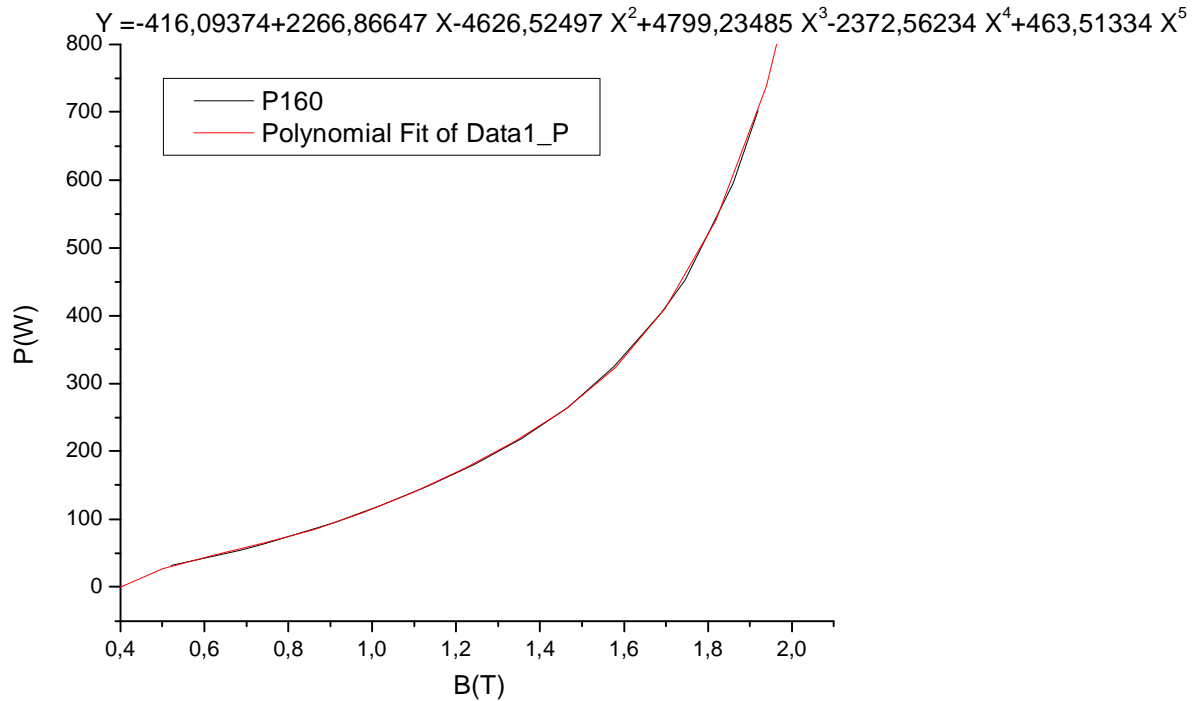
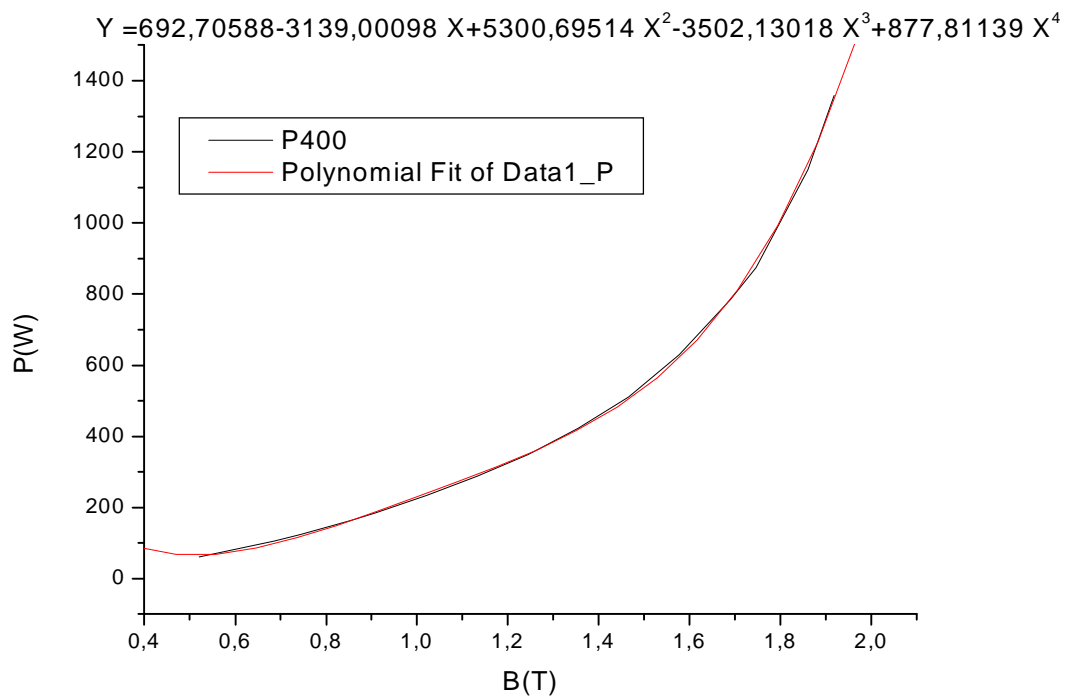
#### **V-I-1-1<sup>er</sup> échantillon (écha N°1) :**

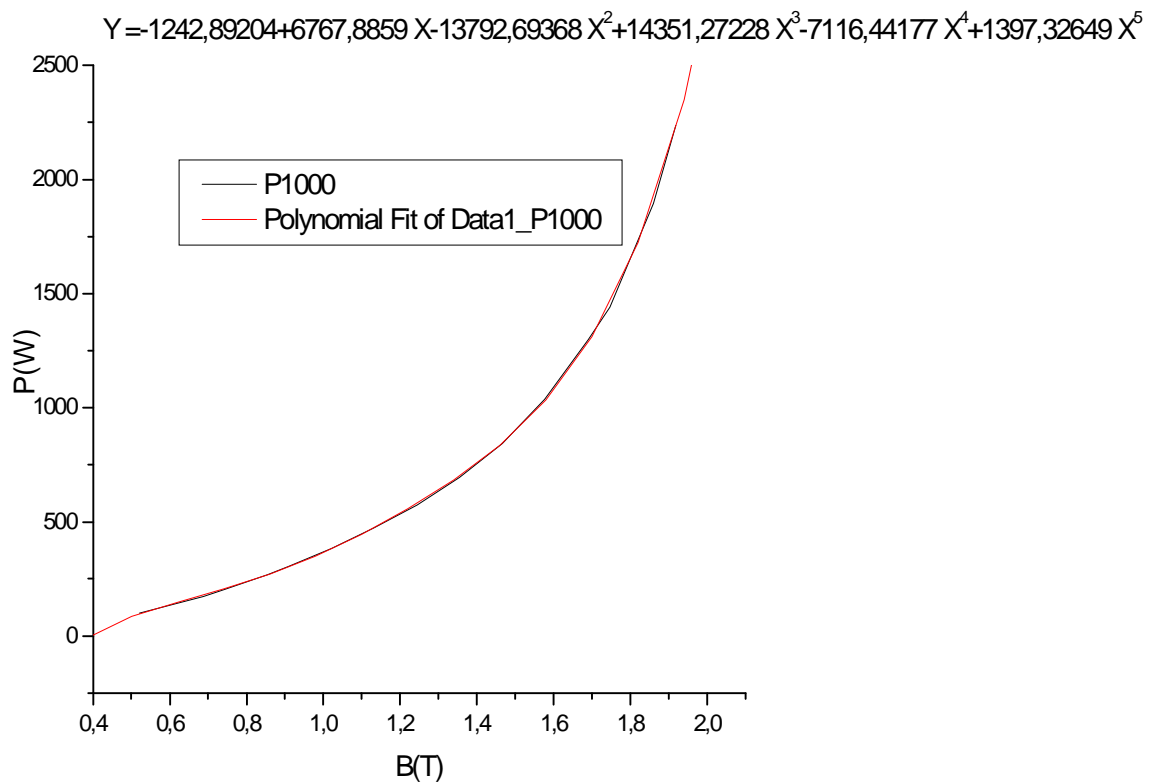
Après découpage, les tôles subissent un premier recuit de relaxation ; cela consiste à introduire les tôles dans un four à 800°C pendant une minute afin de faire retrouver à la tôle sa structure initiale. Le refroidissement se faire à l'air, la tôle subit un second recuit de vieillissement à 225°C pendant 24 heures. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :



<b>B(T)</b>	<b>P<sub>s</sub> (W/Kg)</b>	<b>P<sub>160</sub>(W)</b>	<b>P<sub>400</sub>(W)</b>	<b>P<sub>1000</sub>(W)</b>
1,919	2,095	497,353	1031,787	1699,045
1,86	1,916	457,858	943,63	1553,876
1,746	1,511	358,711	744,167	1225,421
1,689	1,325	314,555	652,562	1074,575
1,577	1,057	250,932	520,572	857,227
1,466	0,876	207,962	431,43	710,436
1,355	0,737	174,963	362,972	597,707
1,244	0,618	146,713	304,365	501,198
1,132	0,515	122,261	253,637	417,665
1,021	0,426	101,132	209,805	345,486
=0,909	0,342	81,191	168,435	277,362
0,854	0,307	72,881	151,197	248,977
0,743	0,237	56,263	116,722	192,207
0,687	0,205	48,667	100,962	166,255
0,521	0,126	29,912	62,055	102,186

**Tableau. 1. : Résultats obtenus du 1<sup>er</sup> échantillon pour les trois transformateurs.**

**V-I-1-1-Les courbes sont données ci-dessous :****Courbe n°1 : Pertes à vide pour le transformateur 160KVA/30KV en fonction de l'induction.****Courbe n°2: Pertes à vide pour le transformateur 400KVA/30KV en fonction de l'induction.**



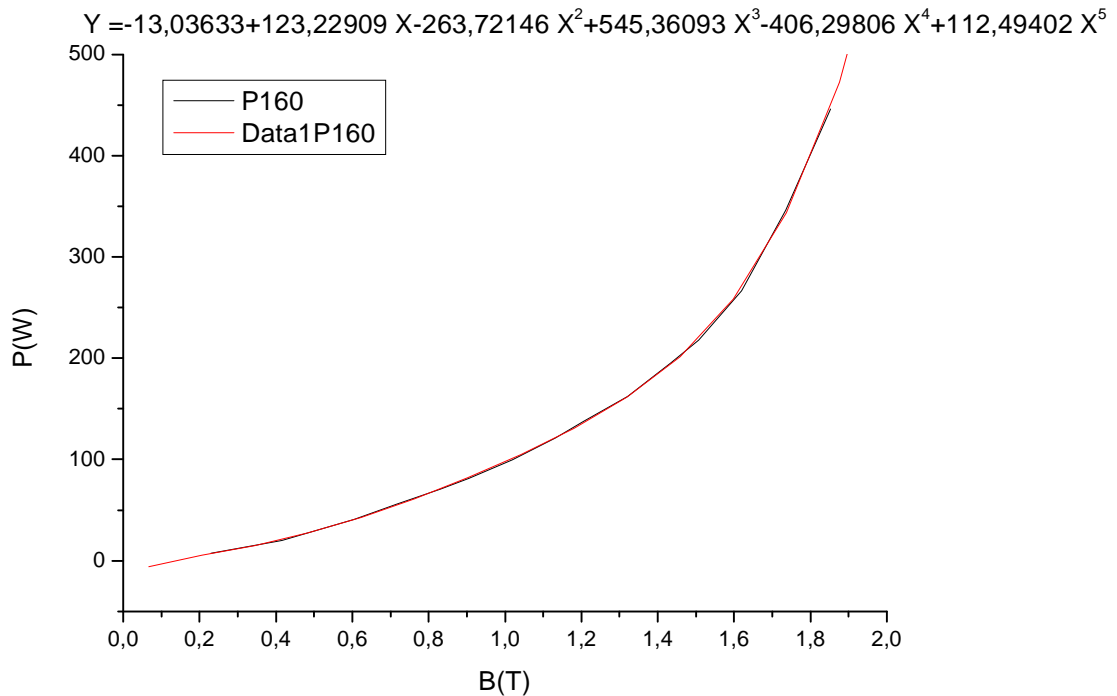
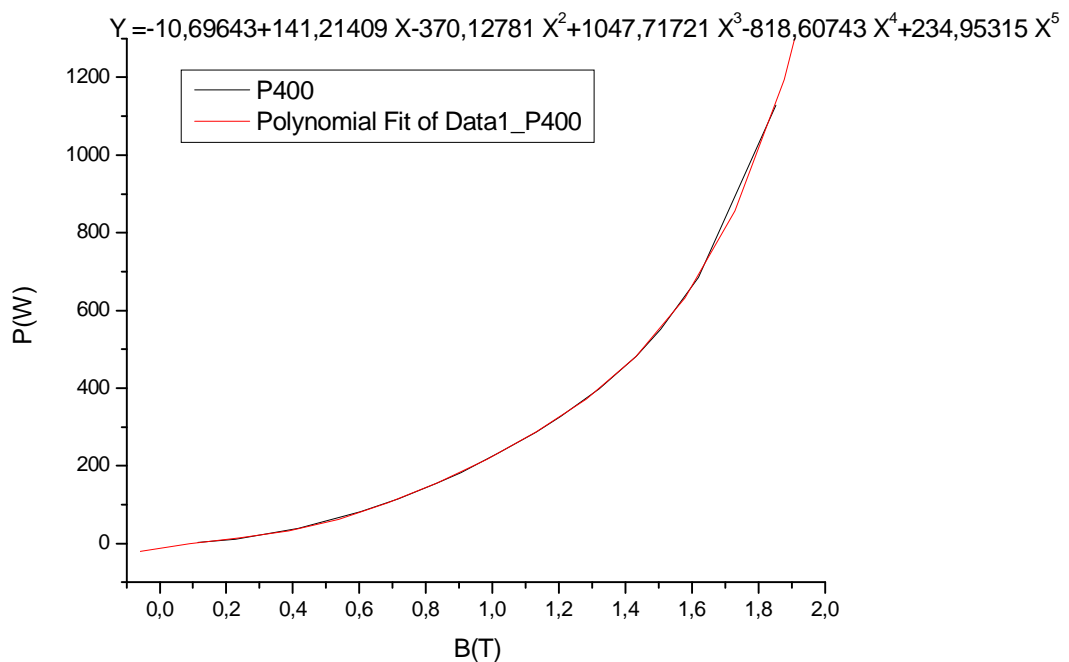
**Courbe n°3 :** Pertes à vide pour le transformateur 1000KVA/30KV en fonction de l'induction.

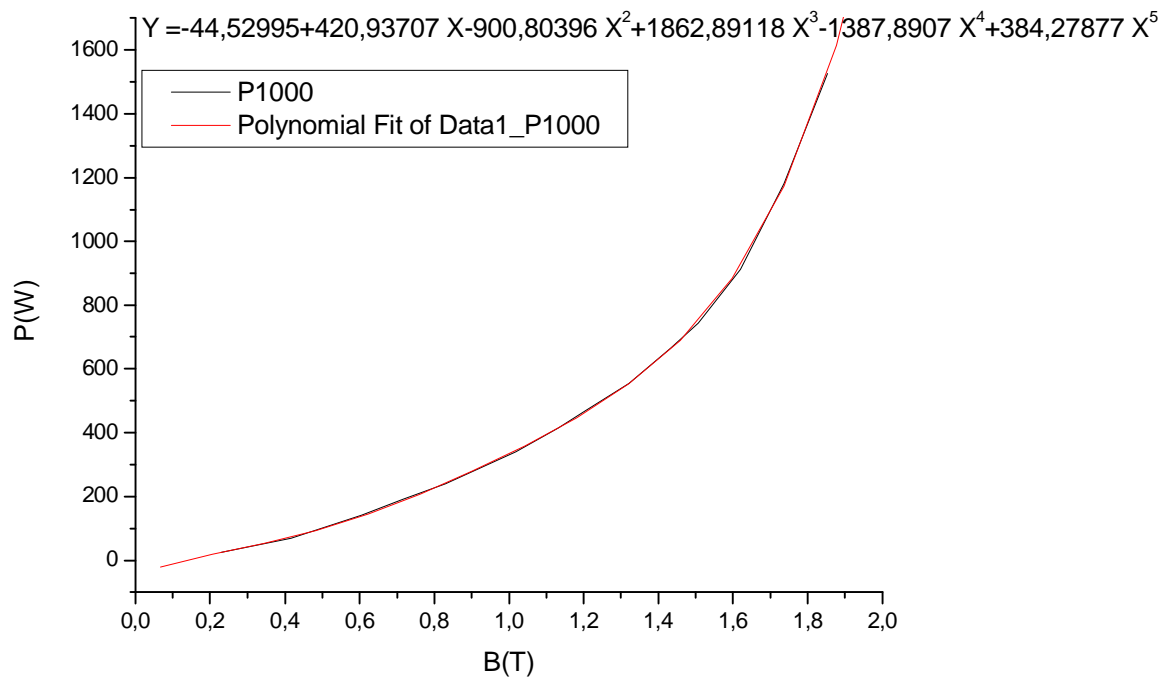
**V-I-2-2<sup>eme</sup> échantillon (écha N°2) :**

Même procédé que le 1<sup>er</sup> échantillon, les résultats de mesures sont donnés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>P<sub>s</sub> (W/Kg)</b>	<b>P<sub>160</sub>(W)</b>	<b>P<sub>400</sub>(W)</b>	<b>P<sub>1000</sub>(W)</b>
1,853	1.88	446,312	1524,68	1524,68
1,736	1.457	345,891	1181,627	1181,627
1,62	1.124	266,837	911,564	911,564
1,507	0.918	217,885	744,337	744,337
1,433	0.820	194,739	665,263	665,263
1,321	0.684	162,547	555,291	555,291
1,206	0.579	137,62	470,136	470,136
1,131	0.511	121,335	414,502	414,502
1,019	0.419	99,589	340,214	340,214
0,905	0.344	81,689	279,065	279,065
0,83	0.297	70,555	241,029	241,029
0,717	0.235	55,931	191,071	191,071
0,604	0.173	41,093	140,384	140,384
0,416	0.0849	20,155	68,853	68,853
0,229	0.0298	7,074	24,167	24,167

**Tableau .2.** : Résultats obtenus du 2<sup>ème</sup> échantillon pour les trois transformateurs.

**V-I-2-1-Les courbes sont représentées ci- dessous :****Courbe n°4 :** Pertes à vide pour le transformateur 160KVA/30KV en fonction de l'induction.**Courbe n°5:** Pertes à vide pour le transformateur 400KVA/30KV en fonction de l'induction.



**Courbe n°6:** Pertes à vide pour le transformateur 1000KVA/30KV en fonction de l'induction.

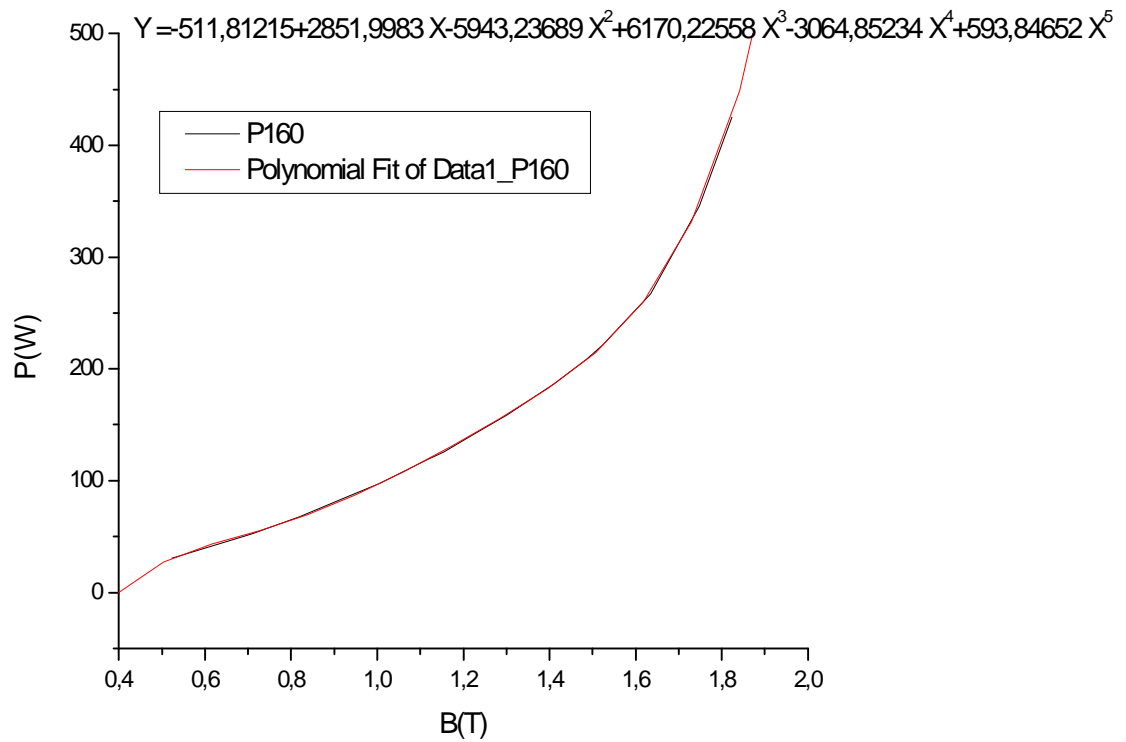
### V-I-3-3<sup>eme</sup> échantillon (écha N°3) :

Même procédé que le 1<sup>er</sup> et 2<sup>eme</sup> échantillons, les résultats de mesures sont données dans tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>P<sub>s</sub> (W/Kg)</b>	<b>P<sub>160</sub>(W)</b>	<b>P<sub>400</sub>(W)</b>	<b>P<sub>1000</sub>(W)</b>
1,823	1,791	425,183	882,067	1452,501
1,747	1,455	345,417	716,587	1180,005
1,635	1,125	267,075	554,062	912,375
1,523	0,931	221,02	458,517	755,041
1,486	0,878	208,437	432,415	712,058
1,412	0,789	187,308	388,582	639,879
1,301	0,669	158,82	329,482	542,559
1,227	0,559	142,131	294,86	485,789
1,154	0,53	125,82	261,222	429,83
1,117	0,5	118,818	246,496	405,5
1,006	0,411	97,618	202,516	333,321
0,931	0,36	85,464	177,3	291,96
0,82	0,285	67,801	140,658	231,135
0,709	0,22	52,322	108,547	178,42
0,523	0,131	31,028	64,369	106,241

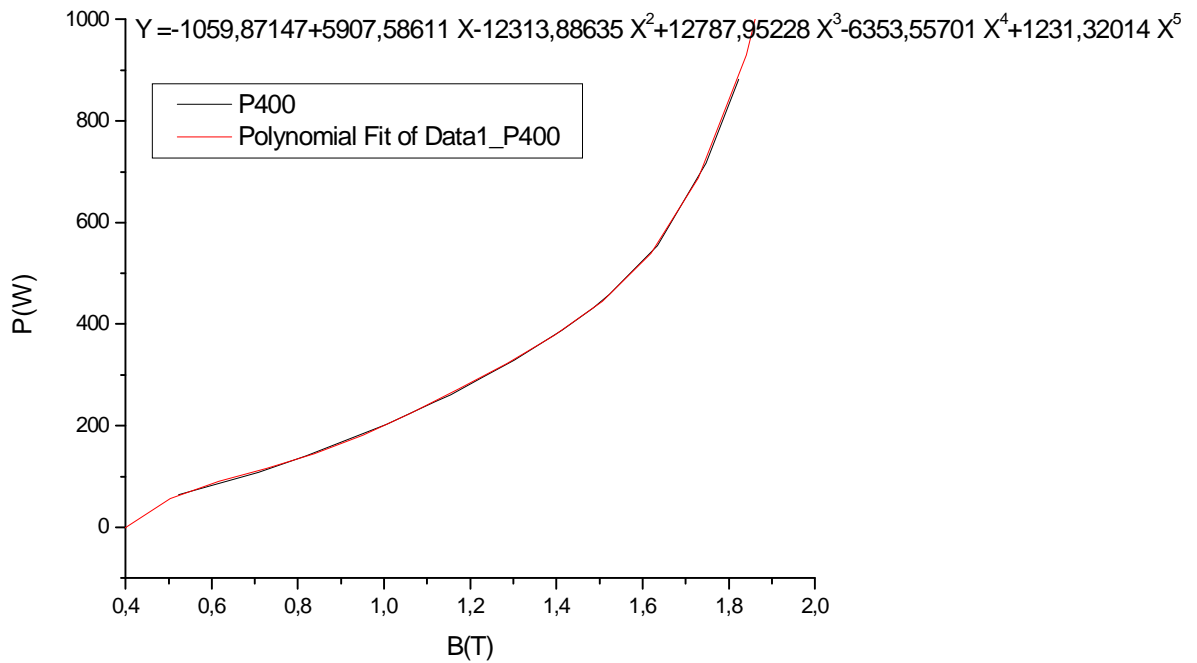
**Tableau .3. :** Résultats obtenus du le 3<sup>ème</sup> échantillon pour les trois transformateurs.

**V-I-3-1-Les courbes sont représentées ci-dessous :**

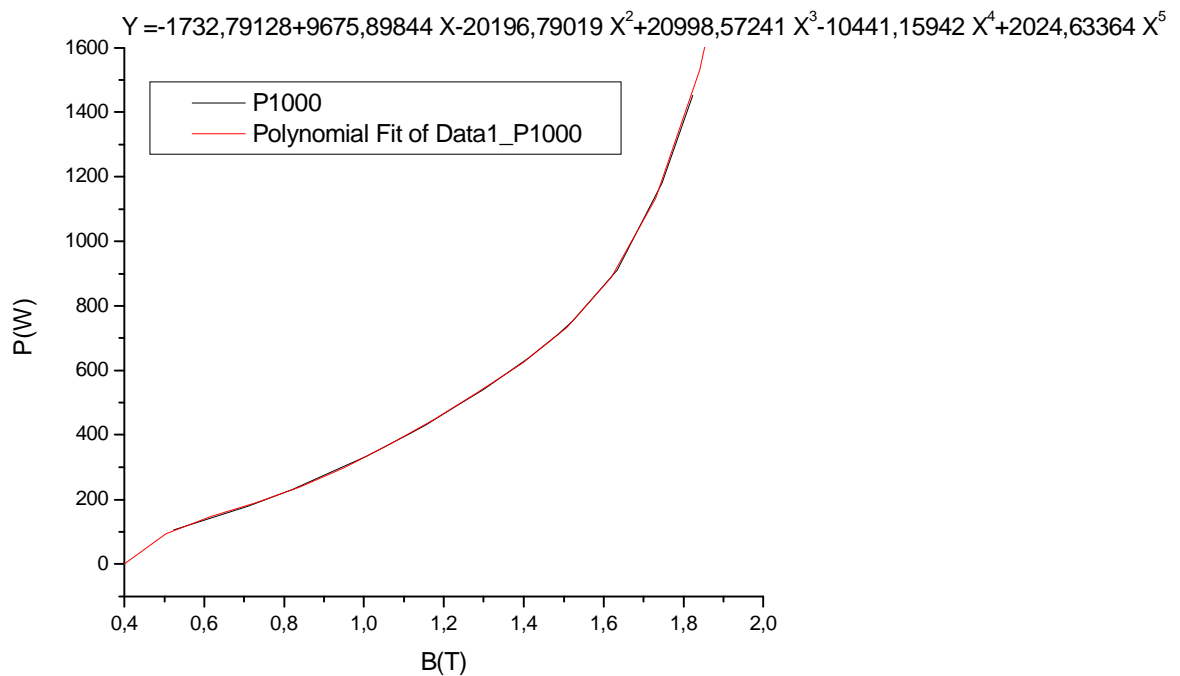


**Courbe n°7:** Pertes à vide pour le transformateur 160KVA/30KV en fonction de l'induction.





**Courbe n°8 :** Pertes à vide pour le transformateur 400KVA/30KV en fonction de l'induction.



**Courbe n°9:** Pertes à vide pour le transformateur 1000KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.

**V-I-4-Interprétation des courbes obtenues :**

Nous remarquons que toutes les courbes représentant les pertes magnétiques à vide des trois transformateurs en fonction de l'induction ont toutes la même allure en forme parabolique.

Cela s'explique par fait que les pertes magnétiques sont proportionnelles au carré de l'induction.

**V-II- Méthode analytique :**

Cette deuxième méthode consiste à calcul des pertes à vide dans les trois transformateurs cites auparavant en utilisant la formule suivante :

$$P_0' = \delta_{1.5} \cdot K B p \cdot G_n$$

$\delta_{1.5}$  : les pertes spécifiques pour une induction de **1.5 T (w/kg)**.

$G_n$  : le poids total du noyau (**kg**).

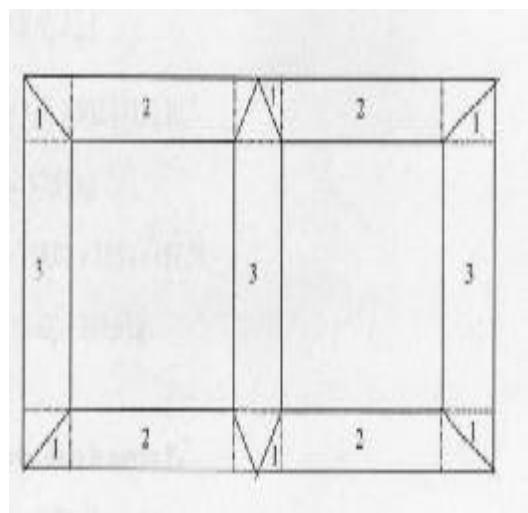
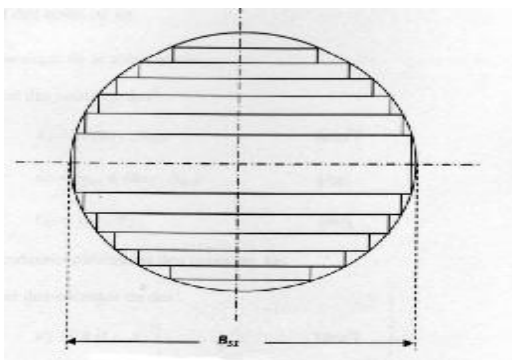
$$G_n = G_1 + G_2 + G_3$$

$G_1$  : le poids total des coins.

$G_2$  : le poids des culasses diminué des coins.

$G_3$  : le poids total des colonnes

Les figures suivantes représentent le noyau d' un transformateur :



### ✓ Les valeurs des pertes spécifiques :

Les valeurs des pertes spécifiques et le poids de trois transformateurs sont donnés dans le tableau suivant :

	<b>160/30 (KVA/KV)</b>	<b>400/30 (KVA/KV)</b>	<b>1000/30 (KVA/KV)</b>
<b>Le poids de fer (Kg)</b>	237.4	492.5	811
<b>P<sub>01.5</sub> (W/Kg)</b>	1.18	1.10	1.10

**Tableau .4. :** Les données de trois transformateurs prises du cahier de charge de l'entreprise EI de AZAZGA.

**K<sub>Bp</sub>** : le coefficient correcteur des pertes spécifiques.

Sa valeur est donnée par le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>K<sub>Bp</sub></b>
$0.5 \leq B_c \leq 1.1$	$0.413B_c^2$
$1.1 \leq B_c \leq 1.5$	$0.0758 e^{1.72B_c}$
$1.5 \leq B_c \leq 1.8$	$0.05363e^{1.95B_c}$
$1.8 \leq B_c \leq 2$	$0.01126e^{2.817B_c}$

**Tableau .5. :** Les valeurs du coefficient correcteur des pertes spécifiques.

**V -II-1 -échantillon N° 1 :**

Pour chaque valeur de B on utilise la formule correspondante du tableau du coefficient correcteur  $K_{Bp}$ . Les résultats de calcul des pertes à vide pour les trois transformateurs sont représentés dans le tableau suivant :

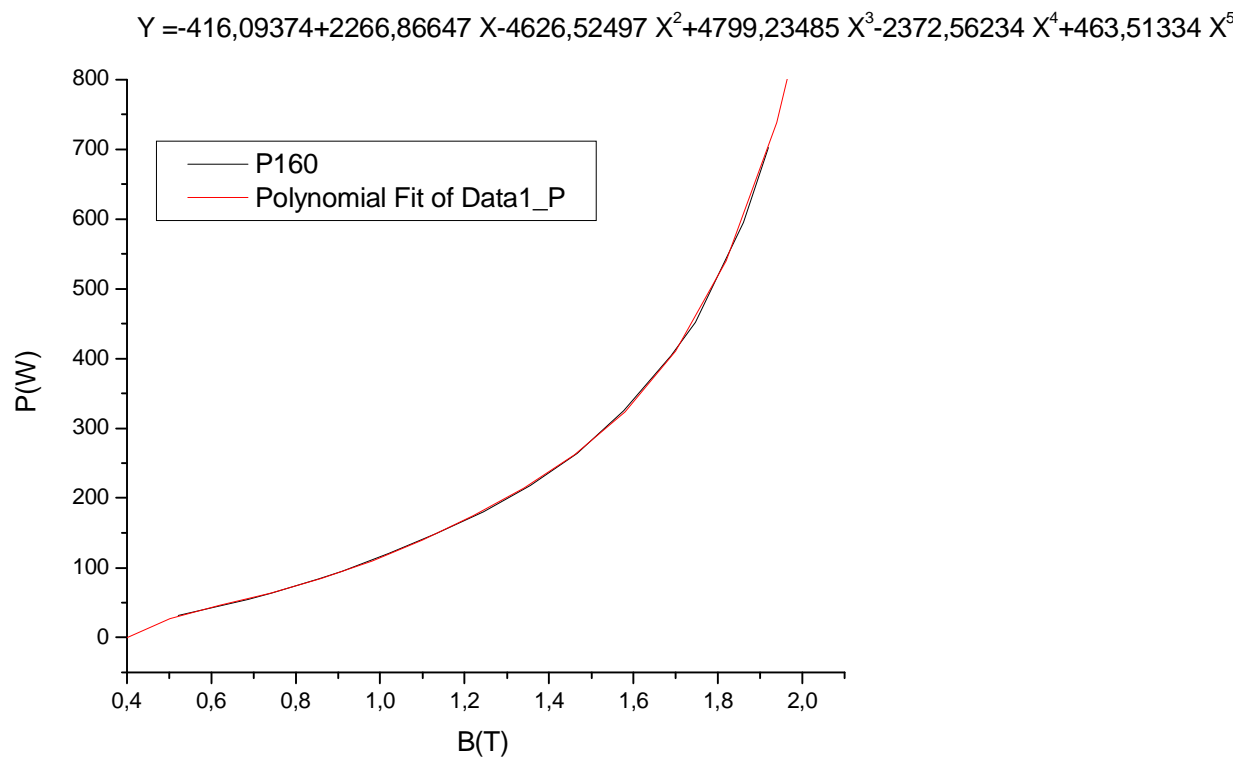
<b>B(T)</b>	<b><math>K_{Bp}</math></b>	<b><math>P_{160}(W)</math></b>	<b><math>P_{400}(W)</math></b>	<b><math>P_{1000}(W)</math></b>
1,919	2,507	702,301	1358,167	2236,504
1,86	2,123	594,72	1150,13	1894,028
1,746	1,614	452,133	874,384	1439,849
1,689	1,444	404,287	782,828	1298,005
1,577	1,161	325,233	628,971	1035,728
1,466	0,943	264,164	510,87	841,25
1,355	0,78	218,502	422,565	694,945
1,244	0,644	180,405	348,887	574,512
1,132	0,531	148,75	287,67	473,705
1,021	0,43	120,456	232,952	383,603
0,909	0,341	95,525	184,736	304,206
0,854	0,301	84,319	163,067	268,522
0,743	0,228	63,87	123,519	203,398
0,687	0,195	54,625	105,641	173,959
0,521	0,112	31,374	60,676	99,915

**Tableau .6. :** Résultats obtenus du calcul des pertes à vide pour l'échantillon N°1 dans le noyau des trois transformateurs.

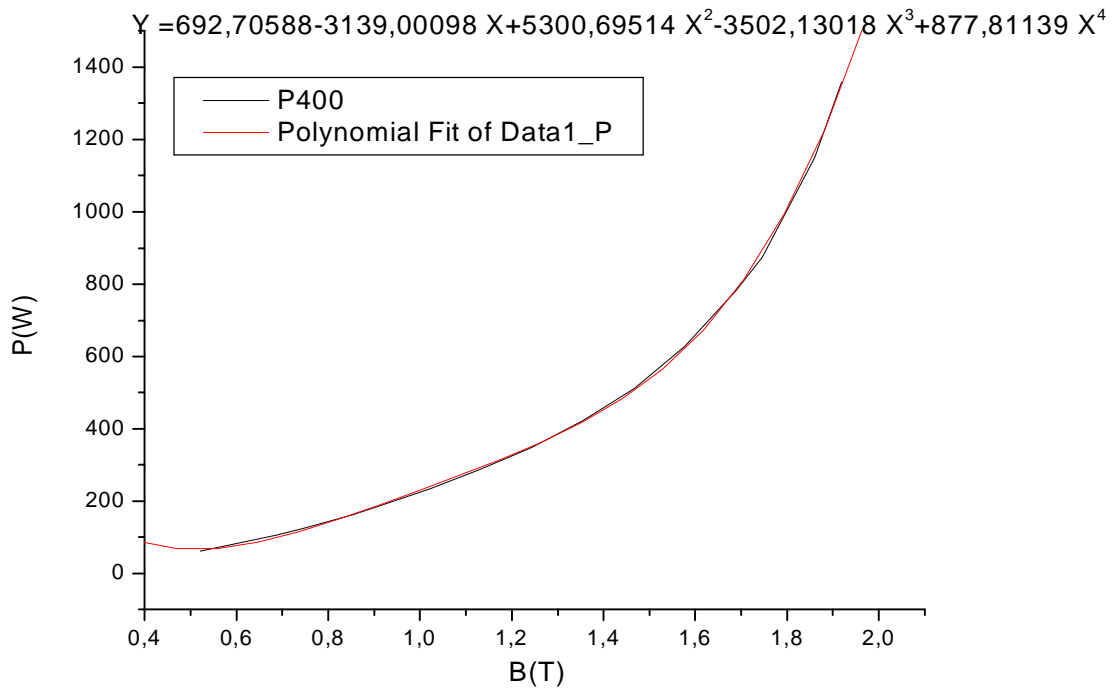
**V-II-1-1- Courbes tirées des valeurs du tableau ci-dessus :**

Les courbes sont présentées ci-dessous, elles sont obtenues en utilisant le logiciel

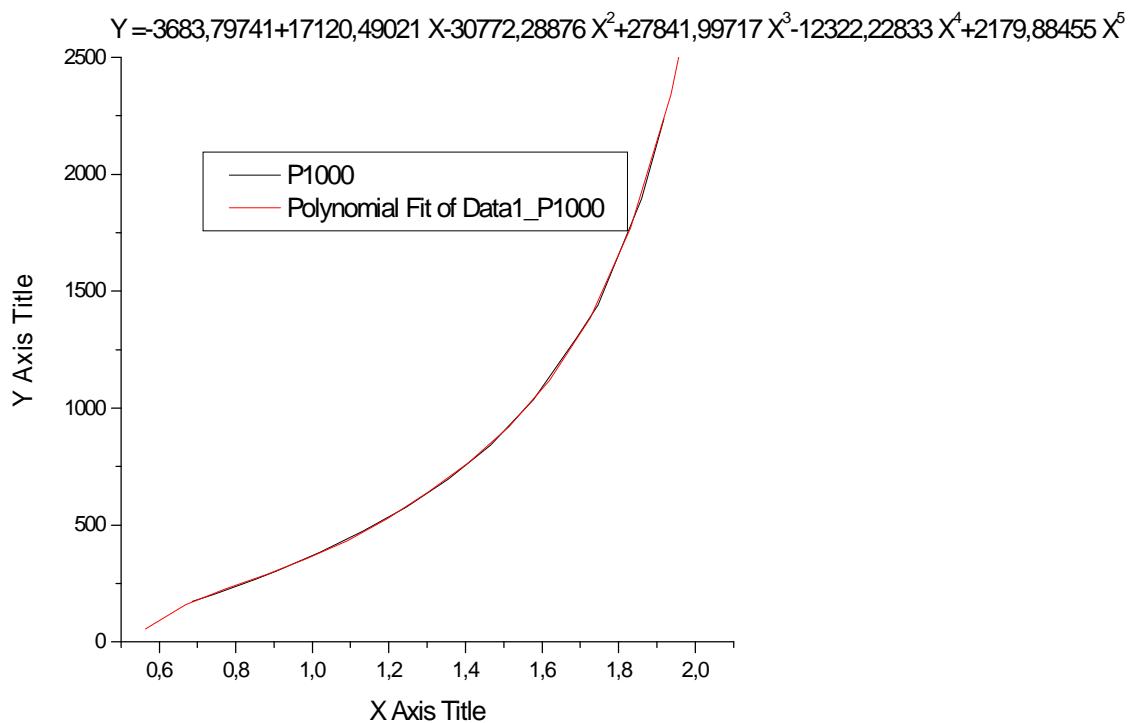
« ORIGIN » :



**Courbe n°10:** Pertes à vide pour le transformateur 160KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.



**Courbe n°11 :** Pertes à vide pour le transformateur 400KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.



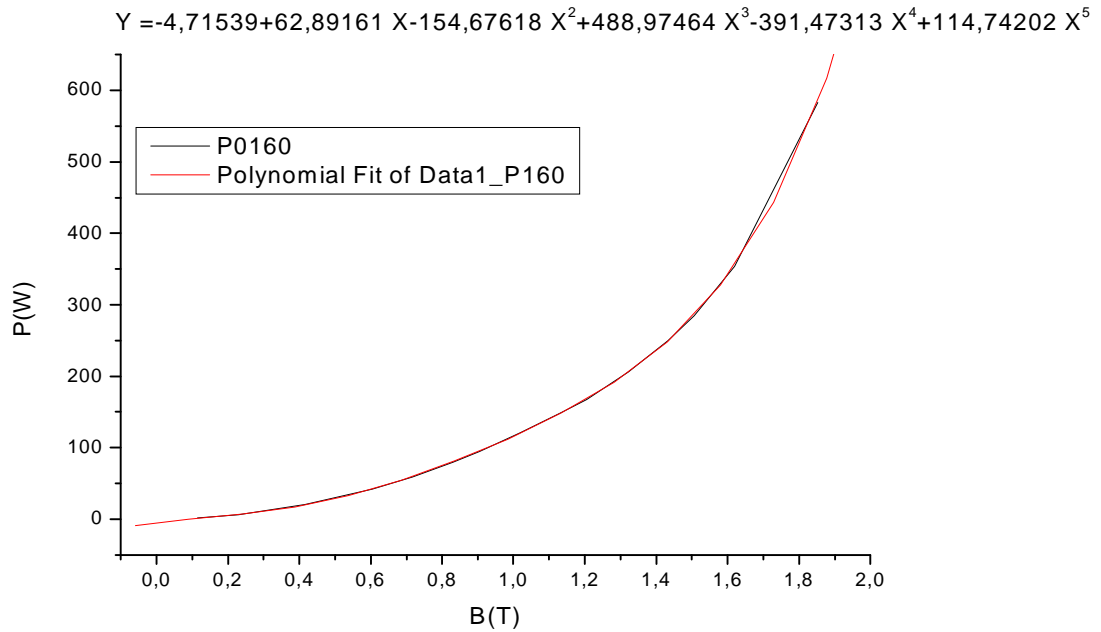
**Courbe n°12:** Pertes à vide pour le transformateur 1000KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.

**V-II-2- Echantillon N° 2 :**

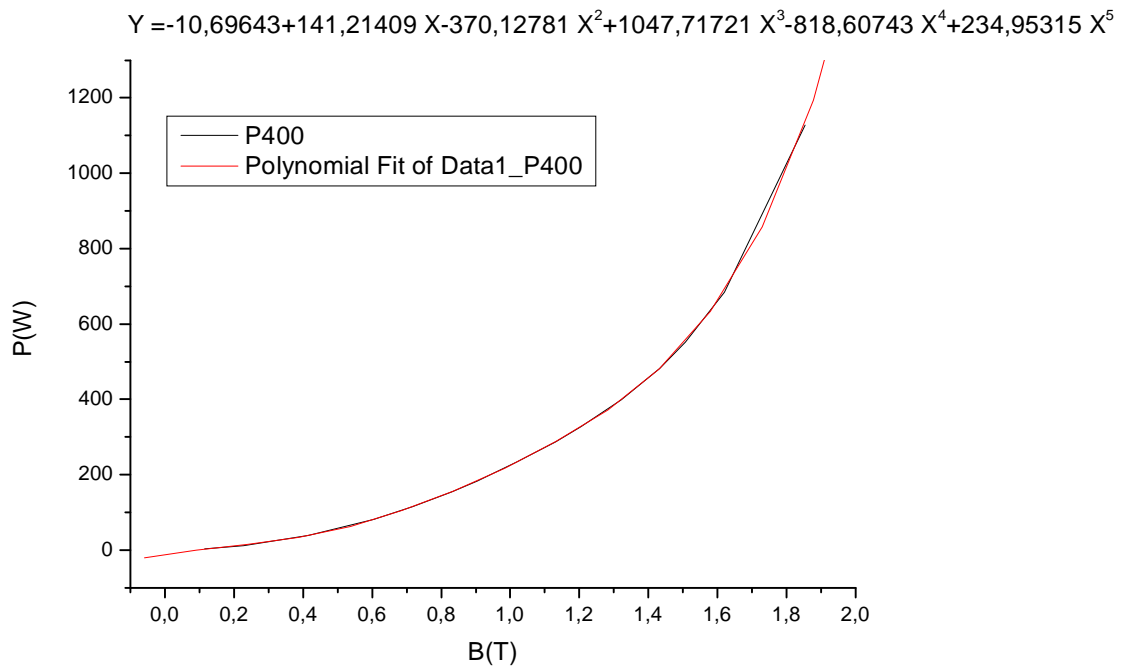
Même procédé que l'échantillon N° 1, les résultats de calcul sont donnés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>K<sub>Bp</sub></b>	<b>P<sub>160(W)</sub></b>	<b>P<sub>400(W)</sub></b>	<b>P<sub>1000(W)</sub></b>
1,853	2,082	583,234	1128,023	1857,352
1,736	1,583	443,448	857,6	1412,194
1,62	1,263	353,806	684,23	1126,722
1,507	1,017	284,894	551	907,265
1,433	0,891	249,607	482,701	794,861
1,321	0,535	205,897	398,186	655,703
1,206	0,603	167,02	326,675	538,036
1,131	0,53	148,47	287,127	472,813
1,019	0,43	120,456	233,052	383,603
0,905	0,338	94,684	183,111	301,53
0,83	0,284	79,557	153,857	253,356
0,717	0,212	59,387	114,851	189,125
0,604	0,15	42,042	81,262	133,815
0,416	0,071	19,89	38,462	63,34
0,229	0,021	5,882	11,376	18,734

**Tableau .7. :** Résultats obtenus du calcul des pertes à vide pour l'échantillon N° 2 dans le noyau des trois transformateurs.

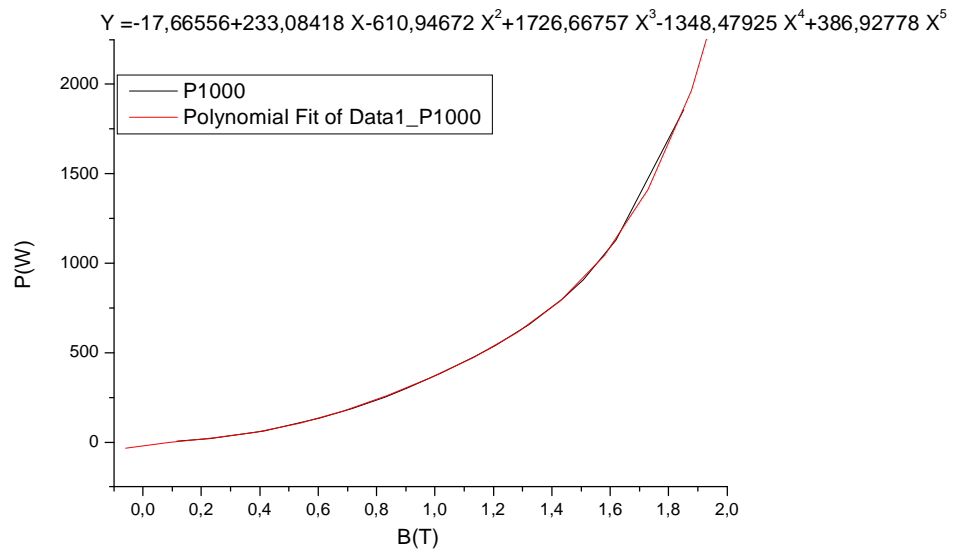
**V-II-2-1- Courbes tirées des valeurs du tableau ci-dessus :**


**Courbe n°13 :** Pertes à vide pour le transformateur 160KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.



**Courbe n°14 :** pertes à vide pour le transformateur 400KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.





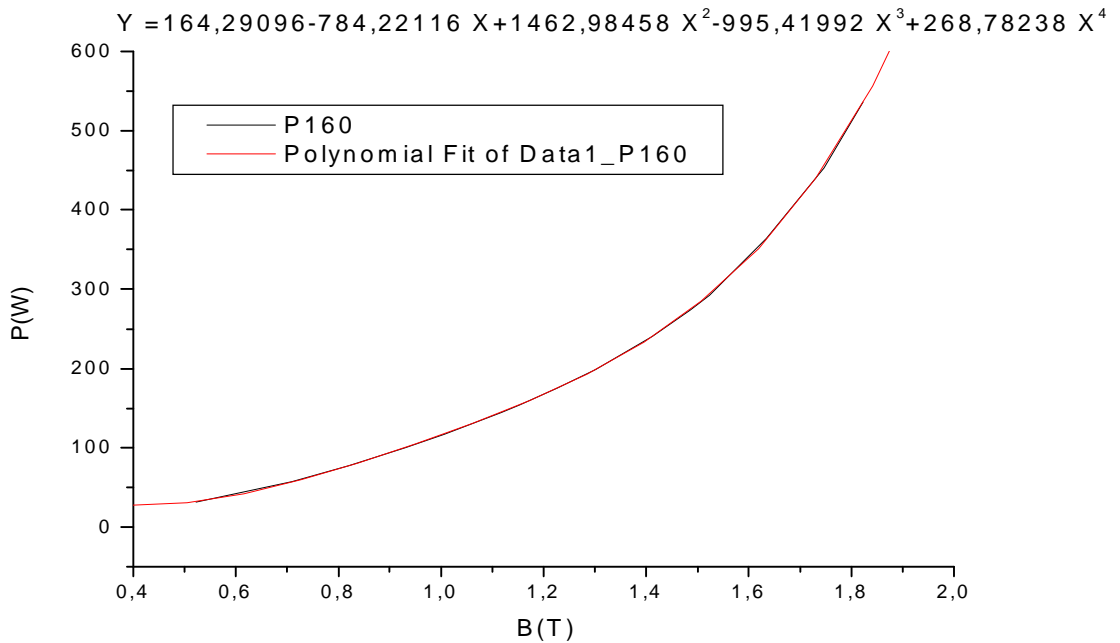
**Courbe n°15:** Pertes à vide pour le transformateur 1000KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.

**V-II-3- - Echantillon N° 3 :**

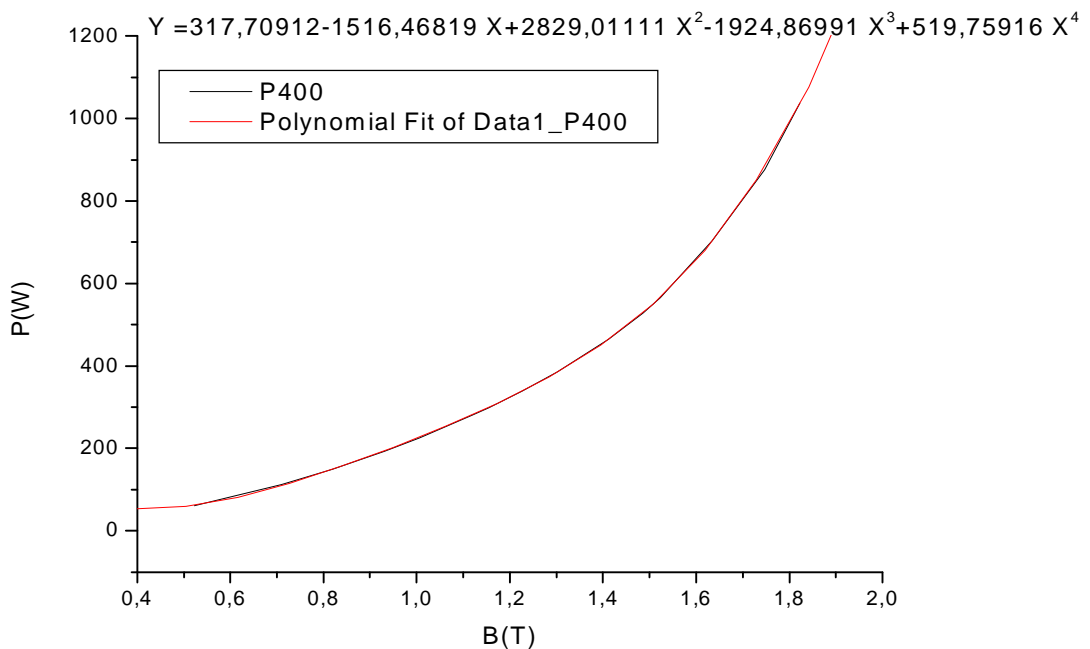
Même procédé que l'échantillon N° 1, les résultats de calcul sont donnés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>K<sub>Bp</sub></b>	<b>P<sub>160</sub>(W)</b>	<b>P<sub>400</sub>(W)</b>	<b>P<sub>1000</sub>(W)</b>
1,823	1,931	535,892	1036,367	1706,587
1,747	1,617	452,973	876,009	1442,525
1,635	1,3	364,171	704,275	1159,73
1,523	1,045	292,737	566,128	932,244
1,486	0,976	273,408	528,748	870,689
1,412	0,859	240,633	465,363	766,313
1,301	0,71	198,893	384,642	633,391
1,227	0,625	175,082	338,593	557,562
1,154	0,551	154,35	298,504	491,547
1,117	0,517	144,828	280,084	461,215
1,006	0,418	117,095	226,451	372,871
0,931	0,358	100,287	193,946	319,347
0,82	0,277	77,596	150,064	247,737
0,709	0,207	57,98	112,142	185,206
0,523	0,113	31,65	61,217	100,807

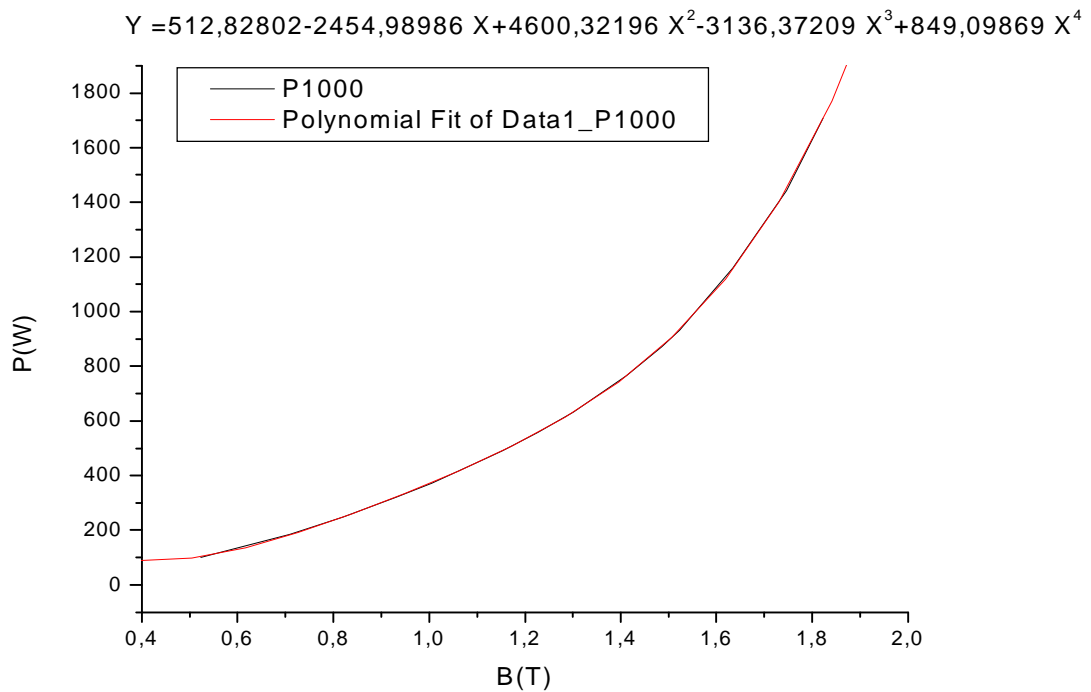
**Tableau .8. :** Résultats obtenus du calcul des pertes à vide pour l'échantillon N° 3 dans le noyau des trois transformateurs.

**V-II-3-1- Courbes tirées des valeurs du tableau ci-dessus :**

**Courbe n°16 :** Pertes à vide pour le transformateur 160KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.



**Courbe n°17 :** Pertes à vide pour le transformateur 400KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.



**Courbe n°18 :** Pertes à vide pour le transformateur 1000KVA/30KV en fonction de l'induction magnétique.

#### V-II-4-Interprétation des résultats :

Nous observons que les courbes obtenues par la méthode analytique ont la même allure parabolique que celles obtenues par la méthode de cadre d'Epstein.

#### V-III- Recherche des courbes moyennes pour les trois échantillons :

Nous remarquons que les courbes des pertes des trois transformateurs ont même allure, à savoir une forme parabolique. Nous pouvons alors tracer pour chaque échantillon une courbe des valeurs moyennes.

Le concept mathématique nous a permis de faire la moyenne des courbes de pertes à vides pour les trois transformateurs.

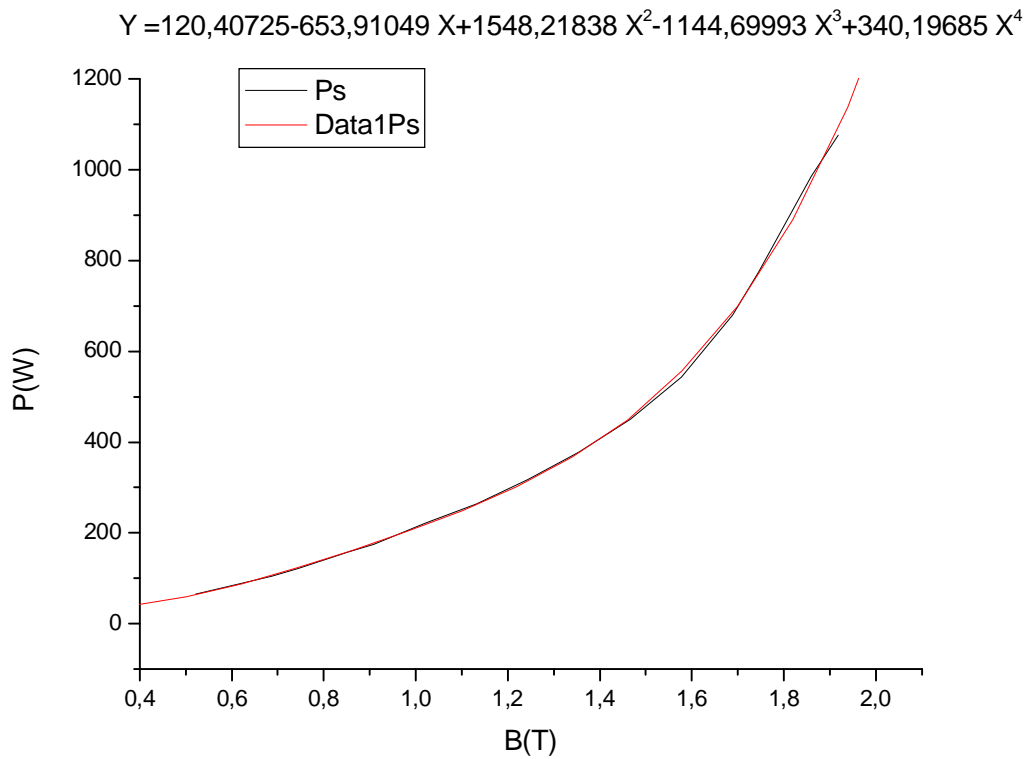
**V-III-1- la courbe moyenne de l'échantillon N°1 :**

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>P(W)</b>
1,919	1076,061
1,86	985,121
1,746	776,099
1,689	680,564
1,577	542,91
1,466	449,942
1,355	378,547
1,244	317,425
1,132	264,521
1,021	221,807
0,909	175,662
0,854	157,685
0,743	121,73
0,687	105,294
0,521	64,717

**Tableau.9.** : valeurs moyennes des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour l'échantillon N°1.

La Courbe tirée des valeurs du tableau ci-dessus :



**Courbe n°19** : la courbe moyenne des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour l'échantillon N°1.

**V-III-2- la courbe moyenne de l'échantillon N°2:**

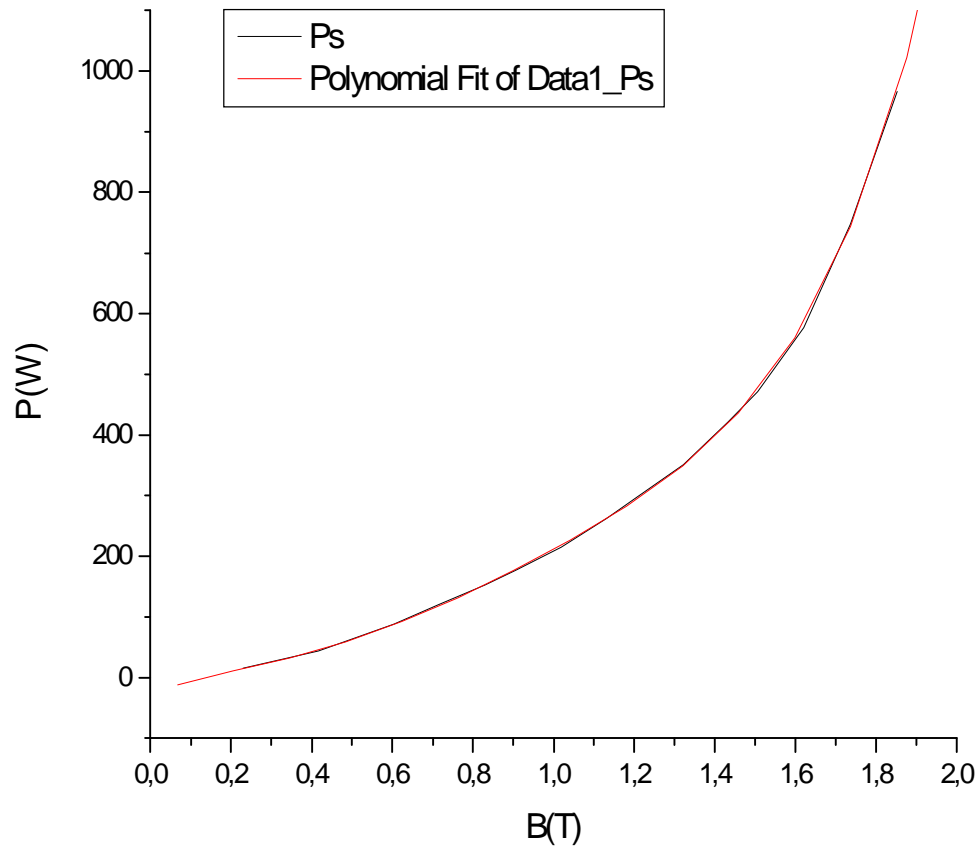
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>P (w)</b>
1,853	965,63
1,736	748,363
1,62	577,323
1,507	471,515
1,433	421,179
1,321	351,325
1,206	297,393
1,131	262,466
1,019	215,212
0,905	176,689
0,83	152,548
0,717	120,703
0,604	88,858
0,416	43,607
0,229	15,305

**Tableau.10. :** valeurs moyennes des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour l'échantillon N°2.

La Courbe tirée des valeurs du tableau ci-dessus :

$$Y = -27,75348 + 263,01094 X - 560,50842 X^2 + 1166,56967 X^3 - 871,15761 X^4 + 241,71869 X^5$$



**Courbe n°20:** la courbe moyenne des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour l'échantillon N°2.



**V-III-3- la courbe moyenne de l'échantillon N°3:**

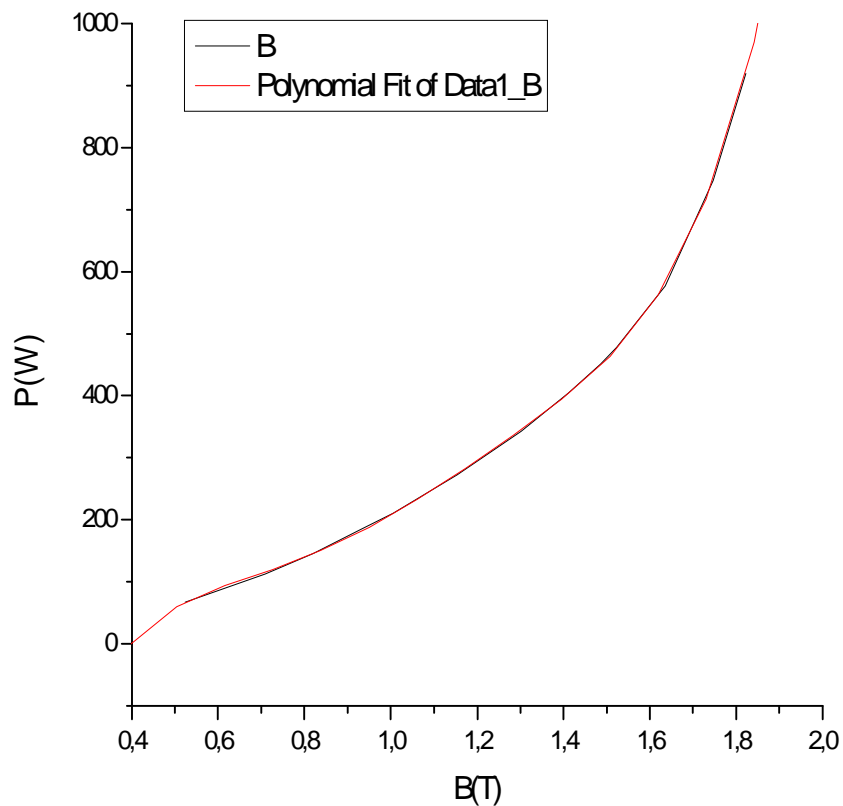
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>P<sub>s(w)</sub></b>
1,823	919,917
1,747	747,336
1,635	577,837
1,523	478,192
1,486	450,97
1,412	405,256
1,301	343,62
1,227	307,512
1,154	272,43
1,117	257,105
1,006	211,205
0,931	184,908
0,82	146,693
0,709	113,204
0,523	67,465

**Tableau.11. :** valeurs moyennes des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour l'échantillon N°3.

**La Courbe tirée des valeurs du tableau ci-dessus :**

$$Y = 1096,6779 + 6123,53618 X - 12779,18697 X^2 + 13285,16116 X^3 - 6605,69246 X^4 + 1280,97151 X^5$$



**Courbe n°21:** la courbe moyenne des pertes à vide en fonction de l'induction pour l'échantillon N°3.

**V-III-4- la courbe moyenne des trois échantillons :**

Nous calculons les valeurs moyennes des pertes à vide et les inductions magnétiques obtenues dans les trois derniers tableaux pour avoir la courbe générale qui récapitule ces deux entités quelque soient le type de transformateur et la tôle utilisés.

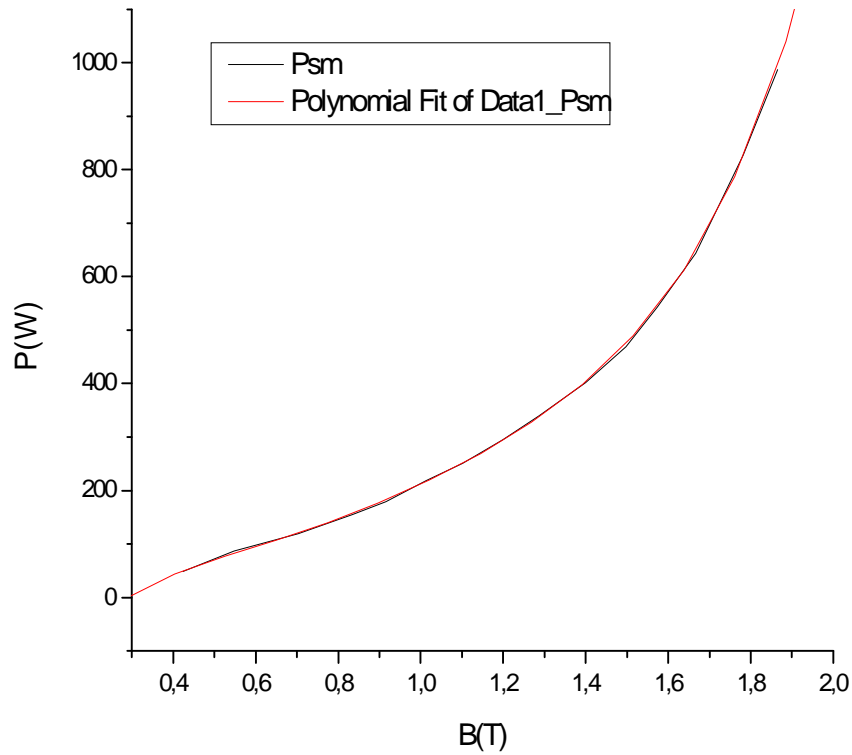
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

<b>B(T)</b>	<b>P<sub>s</sub> (W)</b>
1,865	987,202
1,781	826,94
1,667	643,753
1,573	543,423
1,498	468,688
1,399	402,174
1,287	339,853
1,2	295,801
1,101	250,721
1,014	218,533
0,915	179,805
0,834	154,432
0,703	119,093
0,548	87,368
0,424	49,162

**Tableau.12. :** valeurs moyennes des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour les trois échantillons.

**La Courbe tirée des valeurs du tableau ci-dessus :**

$$Y = -266,55027 + 1589,06434 X - 3170,56623 X^2 + 3515,71552 X^3 - 1851,40335 X^4 + 395,07019 X^5$$



**Courbe n°22:** la courbe moyenne des pertes à vide en fonction de l'induction magnétique pour les trois échantillons.

#### **V-III-5-Recherche d'un modèle mathématique pouvant décrire globalement l'ensemble de ces phénomènes :**

Le calcul analytique effectué précédemment grâce au logiciel « ORIGIN » nous donne des équations mathématiques sous forme de polynômes d'ordre quatre et cinq. Ces formes très complexes étant difficiles à exploiter

Ceci nous permet de penser qu'il peut exister une équation mathématique permettant de rassembler l'ensemble des courbes en une seule. En utilisant le logiciel MATLAB (voir annexe) nous avons pu simplifier le polynôme global précédent en une forme plus simple d'ordre deux, comme indiqué ci-après :

<b>B(T)</b>	<b>P<sub>s</sub> (W)</b>
$0 \leq B \leq 1$	$-396.1922B^2 + 806.4748B - 226.5325$
$1 < B \leq 1.6$	$515.7708B^2 - 757.2690B + 456.1384$
$1.6 < B \leq 2$	$2939B^2 - 8583.6B + 6782.5$

**Tableau.13.** : équations généralisées des pertes à vide.

**V-III- 5- Tableau de vérification des équations trouvées :**

<b>B(T)</b>	<b>P(W)</b>
1.865	996.589
1.781	817.501
1.667	640.793
1.573	541.140
1.498	479.141
1.399	406.186
1.287	339.839
1.200	290.125
1.101	247.603
1.014	218.581
0.915	179.689
0.834	170.49
0.703	144.617
0.548	96.437
0.424	44.186

**Tableau°14** : tableau de vérification des résultats trouvés.

Les résultats obtenus par l'approche mathématique et par la méthode du cadre d'Epstein sont compatibles. Ceci nous permet de conclure que le concept théorique utilisé est le bon.



# Conclusion Générale

### *Conclusion générale*

Au terme de cette étude, nous constatons que les résultats expérimentaux et théoriques sont très proches entre eux. Cela démontre que le travail effectué à partir d'un système normalisé nous permet de faire un rapprochement. Même si des écarts peuvent apparaître lors d'une évaluation ou analyse dans la fabrication des circuits magnétiques surtout quand il s'agit d'un montage traditionnel (à la main), beaucoup de considérations sont prises en compte telles que :

- Ø Découpage des tôles par la machine n'assure pas un taux de bavures très faible ; donc une tolérance est permise ;
- Ø Dimensions des pièces de noyau (culasse, colonnes) sont aussi dans une limite tolérée. la valeur théorique – la valeur réelle = la valeur acceptable ;
- Ø Empilement : la façon avec laquelle on réalise le noyau diffère d'un agent à un autre (dépend de sa compétence et de son efficacité).

Les pertes à vide mesurées par les deux méthodes sont différentes à moins de 15% ce qui est accepté par la norme CEI.

Ce travail, outre l'aspect pratique nous a permis aussi de compléter nos connaissances sur l'aspect théorique en utilisant les équations mathématiques.

Nous souhaitons que notre travail puisse faire l'objet d'un enrichissement par un rapprochement meilleur.



# Bibliographie



- [1] Sedkaoui « les tôles magnétiques Fe-Si : caractéristiques de l'alliage magnétique Fe-Si » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique à UMM de Tizi ousou ; 2008.
- [2] P.Brissonneau « Matériaux de l'électrotechnique » ; édition Hermès ; Paris ; 1997.
- [3] F. Boutaleb, Z. Bouacem, Thèse d'étude universitaire appliquée en électrotechnique ; 2009
- [4]G.Leghlid « effet de la contrainte thermique sur les caractéristiques des tôles Fe- Si utilisées dans le circuit magnétique des machines électriques », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique à UMM de Tizi ousou, 2010.
- [5]Document de l'entreprise électro- industries.
- [6]G. Pinson –physique Appliquée (site internet).
- [7]J.C .Bavay et J.Verdun « alliage fer- silicium », technique de l'ingénieur, traité de Génie Electrique.
- [8]M.G. Say « alliages magnétique et ferrites » édition Dunod, Paris ; 1956.
- [9], Amel Belkebir « modélisation- identification paramétrique de l'hystérésis magnétique modèle de L.O. Chua », Batna ; 2006.
- [10] C . Chevassu ,« Electromagnétisme pour l'électrotechnique ».
- [11] Robert « matériaux de l'électrotechnique » ; édition Dunod, paris ,1987 .

**ANNEXE :**

X=0:0.1:1;

Y=- 266,55027 +1589,06434 X-3170,56623 X<sup>2</sup>+3515,71552 X<sup>3</sup>-1851,40335 X<sup>4</sup>+395,07019 X<sup>5</sup>;

P=polyfit(x,y,2)

P= -396.1922x<sup>2</sup>+806.4748x-226.5325.

x=1 :0.1 :1.6 ;

Y=- 266,55027 +1589,06434 X-3170,56623 X<sup>2</sup>+3515,71552 X<sup>3</sup>-1851,40335 X<sup>4</sup>+395,07019 X<sup>5</sup>;

P=polyfit(x,y,2)

P= 515.7708x<sup>2</sup>-757.2690x+456.1384.

x=1.6 :0.1 :2 ;

Y=- 266,55027 +1589,06434 X-3170,56623 X<sup>2</sup>+3515,71552 X<sup>3</sup>-1851,40335 X<sup>4</sup>+395,07019 X<sup>5</sup>;

P=polyfit(x,y,2)

P=2939x<sup>2</sup>-8583.6x+6782.5.