

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté de Génie Electrique et d'informatique**

**Département d'électrotechnique**



*Mémoire de Fin d'Etudes*



**En vue de l'obtention du diplôme de Master professionnel en**  
**Electrotechnique**

**Option : Electrotechnique industrielle**

*Thème*

**Processus de contrôle des matériaux (fil de cuivre, papier  
isolant et tôle magnétique)**

**Constituant la machine asynchrone de l'entreprise Electro-  
Industrie.**

**Proposé par : M<sup>elle</sup> N. KICHOU**

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

**présenté par :**

**M<sup>elle</sup> F. KICHOU**

**M<sup>elle</sup> N. OUSSAD**

*Promotion 2012*

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu pour toute la santé et la volonté qu'il nous a offert tout au long de notre travail.*

*Au terme de ce travail, nos plus vifs remerciements à notre promoteur Mr IMACHÉ qui a été d'une aide précieuse, par sa disponibilité à tout moment.*

*Nous remercions, aussi M<sup>elle</sup> KICHOU de nous avoir permis d'étudier notre projet de fin d'études au sein d'ÉLECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA. Tout en nous offrant les conditions nécessaires pour le déroulement de notre travail.*

*Nos remerciements les plus distingués vont aussi aux membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.*

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur la machine asynchrone triphasée</b>	
I-1-Introduction.....	3
I-2- Historique.....	3
I-3- Constitution.....	3
I-3-1- Le stator.....	4
I-3-2- Le rotor.....	4
I-4- Principe de fonctionnement.....	7
I-4-1- Création du champ tournant.....	8
I-4-2- Vitesse de synchronisme.....	9
I-4-3- Glissement.....	10
I-5- Choix du couplage.....	11
I-6- Bilan des puissances et des pertes.....	11
I-6-1- Puissance électrique absorbée.....	12
I-6-2- Les pertes par effet joule au stator.....	12
I-6-3- Les pertes fer au stator.....	13
I-6-4- La puissance transmise dans l'entrefer.....	13
I-6-5- Pertes joule au rotor.....	13
I-6-6- Puissance électromagnétique.....	14
I-6-7- Les pertes mécaniques.....	14
I-6-8- La puissance mécanique.....	14
I-6-9- La puissance utile.....	14
I-6-10- Détermination des pertes constantes.....	15
I-6-11- Rendement du moteur asynchrone triphasé 3~.....	16
I-7- couple moteur asynchrone triphasé 3~.....	16
I-7-1- Couple électromagnétique.....	16

I-7-2-Couple utile Cu.....	16
I-7-3-Le couple des pertes .....	17
I-8-Démarrage du moteur.....	17
I-8-1- Démarrage sous tension réduite .....	17
I-8-2-Démarrage à tension nominale (démarrage rotorique).....	20
I-9-Inversion du sens de rotation d'un moteur asynchrone.....	20
I-10-Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone.....	20
Conclusion.....	20

## **Chapitre II : processus de fabrication du moteur asynchrone (E-I)**

Introduction.....	22
II-1- Présentation de l'entreprise.....	22
II-1-1- Objectifs.....	22
II-1-2 : présentation de l'unité moteurs.....	22
II-2- Processus de fabrication du moteur asynchrone.....	24
II-2-1 Bâtiment 2 a .....	24
II-2-1-1-Ateliers de découpage, encochage et empaquetage.....	24
II-2-1-2- Atelier de moulage sous pression.....	25
II-2-2 - Bâtiment 2.....	26
II-2-2-1- Atelier d'usinage.....	26
II-2-2-2 Atelier de bobinage.....	27
II-2-2-3-Atelier de montage.....	29
Conclusion.....	33

## **Chapitre III : Généralités sur les matériaux électrotechniques**

Introduction.....	34
III-1 : Les matériaux conducteurs.....	34
III-1-1 : Les bons conducteurs.....	34

III-1-2 : Formes des conducteurs.....	34
III-1-3 : Propriétés physiques et chimiques.....	35
III-1-3-1- Propriétés physiques.....	35
III-1-3-2 : propriétés chimiques.....	35
III-1-4 : Propriétés mécaniques.....	35
III-1-4-1 : Résistance à la traction.....	36
III-1-4-2 : Traction et allongement.....	36
III-1-5 : Propriétés électriques.....	37
III-1-5-1 : Résistance d'un conducteur .....	37
III-1-5-2 : Variation de la résistance avec la température.....	37
III-2 : Les matériaux isolants.....	38
III-2-1 : Classifications.....	38
III-2-1-1 : Classification thermique.....	38
III-2-1-2 : Classification physique.....	39
III-2-2 : Propriétés diélectriques.....	40
III-2-2-1 : Résistivité électrique des isolants.....	40
III-2-2-2 : Rigidité diélectrique – phénomène de claquage.....	40
III-2-2-3 : Conductivité thermique.....	40
III-3 : Les matériaux magnétiques.....	40
Introduction.....	40
III -3-1 : Les matériaux ferromagnétiques.....	41
III-3-1-1 : Définition de l'aimantation .....	4
III-3-1-2 : Courbe d'aimantation .....	42
III-3-1-3 : Définition de la polarisation.....	42
III-3-1-4 : Structure en domaines de Weiss dans un monocristal ferromagnétique...	43
III-3-1-5 : Energie interne d'un cristal ferromagnétique.....	43

III-3-1-5-1 : Energie d'anisotropie $w_{an}$ .....	44
III-3-1-5-2 : Energie magnétostatique $w_{ma}$ .....	44
III-3-1-5-3 : Energie d'échange $w_{ec}$ .....	44
III-3-1-5-4 : Energie magnétostrictive $w_{mt}$ .....	44
III-3-1-6 : L'hystérésis.....	44
III-3-1-7: Les pertes magnétiques.....	45
III-3-1-7-1 : les pertes par hystérésis.....	45
III-3-1-7-2 : Les pertes par courant de Foucault ou courants induits .....	46
III-3-1-7-3 : Les pertes supplémentaires (ou additionnelles).....	46
III-3-2 : L'alliage fer-silicium .....	46
III-3-2-1 : Caractéristique de l'alliage fer-silicium.....	47
III-3-2-2: Définition du laminage.....	47
III-3-2-3: Le recuit.....	48
III-3-2-4 : Effets des impuretés sur les propriétés magnétiques.....	48
III-3-2-5 : Rôles de l'addition du silicium dans le fer .....	48
III-3-2-6 : Le vieillissement magnétique.....	49
III-3-2-7 : Les tôles fer-silicium (Fe-Si) à grains non orientés (NO).....	49
III-3-2-7-1: Principe de fabrication de tôle à grains non orientés .....	49
III-3-2-7-2 : Les caractéristiques magnétiques normalisées de tôles (NO).....	51
III-3-2-7-3 : Isolation des tôles à grain non orientés .....	52
III-3-2-7-4 : Utilisation .....	52
Conclusion.....	53

## **Chapitre-IV : Procédé de contrôle des matériaux électrotechniques**

Introduction.....	54
IV-1 : processus de contrôle de fil de cuivre émaillé .....	54
IV-1-1 : contrôle au niveau de la réception marchandise.....	55
IV-1-1-1- Contrôle documentaire .....	55
IV-1-1-2 Contrôle visuel .....	56
IV-1-1-3- Contrôle dimensionnel .....	56

IV-1-1-4-Force d'adhérence du vernis sur le cuivre .....	56
IV-1-1-5- Nombre de défauts.....	56
IV-1-1-6 : Tension de claquage méthode rouleau .....	57
IV-1-2 : Contrôle au niveau de laboratoire.....	58
IV-1-2-1 : Diamètre du fil sans vernis .....	58
IV-1-2-2 : Résistance ohmique.....	58
IV-1-2-3 : Tension de claquage méthode TWIST.....	59
IV-1-2-4 : Allongement minimal à la rupture.....	61
IV-1-2-5 : Résistance à la traction.....	61
IV-1-2-6 : Effet ressort.....	62
IV-1-2-7 : Choc thermique.....	62
IV-1-2-8 : Souplesse et adhérence.....	63
IV-2- Processus de contrôle du papier isolant.....	64
IV-2-1 : Contrôle au niveau de la réception marchandise.....	64
IV-2-1-1 : contrôle d'épaisseur.....	65
IV-2-2 : contrôle au niveau de laboratoire.....	65
IV-2-2-1 : Epaisseur nominale du papier isolant .....	65
IV-2-2-2 : Résistance à la traction et allongement.....	66
IV-2-2-3 : Tension de claquage.....	67
IV-2-2-4 : Epaisseur nominale du film en $\mu_m$ .....	69
IV-3 : Processus de contrôle des matériaux magnétiques.....	70
IV-3-1 : Modes de livraison .....	70
IV-3-2 : Contrôle au niveau de la réception marchandise.....	71
IV-3-2-1 : Différence d'épaisseur.....	71
IV-3-2-2-Différence de largeur.....	72
IV-3-2-3 : Ondulation (planéité) .....	72
IV-3-3: Contrôle au niveau de laboratoire .....	73

IV-3-3-1-Mesure des pertes magnétiques .....	74
IV-3-3-2 : polarisation magnétique .....	79
IV-3-3-3 : Anisotropie maximale des pertes.....	84
IV-3-3-4 : Facteur de foisonnement (entassement).....	84
IV-3-3-5 : Essai de pliage.....	86
IV-3-3-6 : Résistance à la traction.....	87
IV-3-3-7 : Résistance d'isolement .....	88
Conclusion .....	90
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>91</b>

### Introduction générale

Les principaux matériaux utilisés dans la construction des moteurs, générateurs et transformateurs électriques sont :

- Le matériau conducteur : c'est généralement le cuivre qui est utilisé pour les enroulements des machines et appareils électriques. Outre ses qualités de bon conducteur de l'électricité et de la chaleur, ce matériau présente des caractéristiques mécaniques intéressantes telles la malléabilité et la ductilité.
- Le matériau isolant : dénommé aussi diélectrique. Le matériau isolant est utilisé pour isoler les conducteurs et les pièces sous tension afin d'empêcher les courts-circuits et parer aux dangers d'électrocution. L'isolant est généralement une matière plastique, une huile minérale, un papier isolant sec ou imprégné.
- Le matériau magnétique : les matériaux ferromagnétiques sont susceptibles de s'aimanter sous l'influence d'un champ magnétique extérieur. Les corps ferromagnétiques sont essentiellement les métaux ferreux et dans une moindre mesure le nickel et le cobalt.

Le matériau magnétique le plus couramment utilisé en électrotechnique se présente sous forme de tôles minces de 0,30 à 0,50 mm d'épaisseur obtenues par laminage. Ces tôles sont des alliages fer-silicium à 2 ou 3% de silicium. La présence du silicium augmente la résistivité électrique ce qui diminue les pertes par courants de Foucault. Elle réduit aussi les impuretés ce qui diminue alors les pertes par hystérésis.

Dans le cadre de notre projet, il nous a été confié de déterminer le processus de contrôle des matériaux électrotechniques (fil de cuivre émaillé, le papier isolant et la tôle magnétique) utilisés dans la construction des moteurs asynchrones fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA.

Pour assurer le déroulement de notre travail nous avons élaboré le plan de travail suivant :

Après une introduction générale ;

Le chapitre I : généralités sur la machine asynchrone triphasée ;

Le chapitre II : processus de fabrication du moteur asynchrone ;

Le chapitre III : les généralités sur les matériaux électrotechnique ;

Le chapitre IV : procédé de contrôle des matériaux électrotechniques ;

Et enfin, on termine par une conclusion générale.

**I-1 : Introduction:[1]**

Le moteur asynchrone est une machine tournante aussi appelée moteur à induction, il fonctionne avec du courant alternatif. Sa particularité est de fonctionner avec un induit en court-circuit, sur lequel il n'y a pas de contacts électriques. Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux collecteurs et aux balais, rencontrés dans le moteur à courant continu par exemple. Ce moteur peut, selon sa construction, être relié par son circuit inducteur à un réseau électrique alternatif monophasé ou polyphasé. Les moteurs triphasés présentent pour une masse donnée des performances jusqu'à 50 % supérieures à leurs homologues monophasés.

**I-2-Historique :**

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écurie qui sera construit industriellement à partir de 1891. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage découvert en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage.

**I-3-Constitution: [2]**

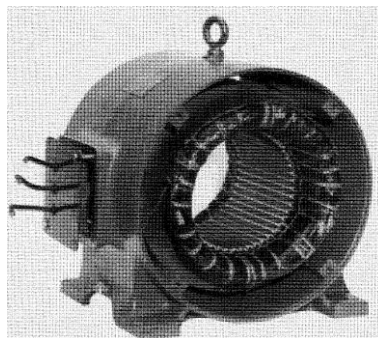
La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- ✚ Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.

- ✚ Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilées sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou à cage d'écureuil.
- ✚ L'entrefer est la partie d'air entre le stator et le rotor celui-ci doit être très étroit pour éviter les pertes de flux.

### I-3-1-Le stator : [3], [2]

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0.5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le "feuilletage" du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.



**Figure. I.1 :** Vue d'un stator d'un moteur asynchrone triphasé.

### I-3-2-Le rotor : [2]

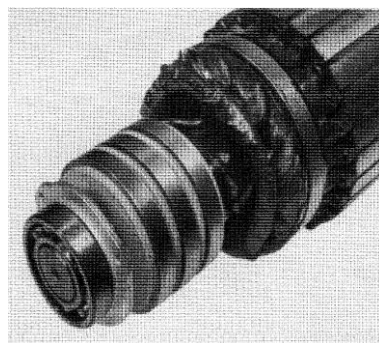
Le rotor est composé d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs qui sont parcourus par des courants induits (les courants rotoriques). Ces courants sont dus uniquement au champ tournant du stator. Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie extérieure. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre 0,4 à 2 mm.

Il existe deux types de rotors :

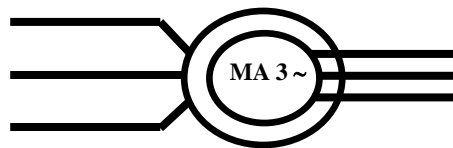
- ❖ Rotor bobiné (à bagues).
- ❖ Rotor à cage d'écureuil.

**I-3-2-1-Rotor bobiné:**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités des enroulements rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux.



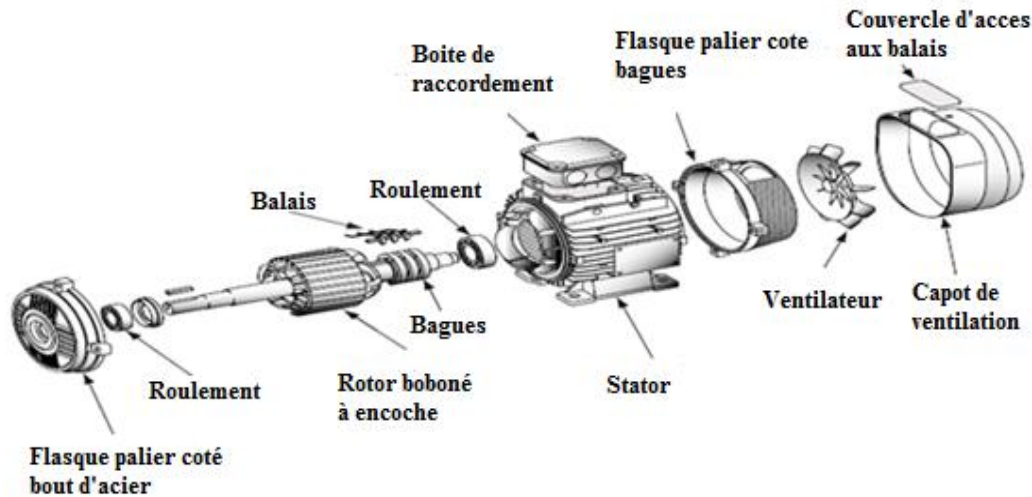
**Figure. I.2 :** Vue d'un rotor bobiné (à bagues) d'un moteur asynchrone triphasé.

**a. Symbole :**

**Figure .I.3 :** Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné (à bagues).

**b- Description des différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé : [4]**

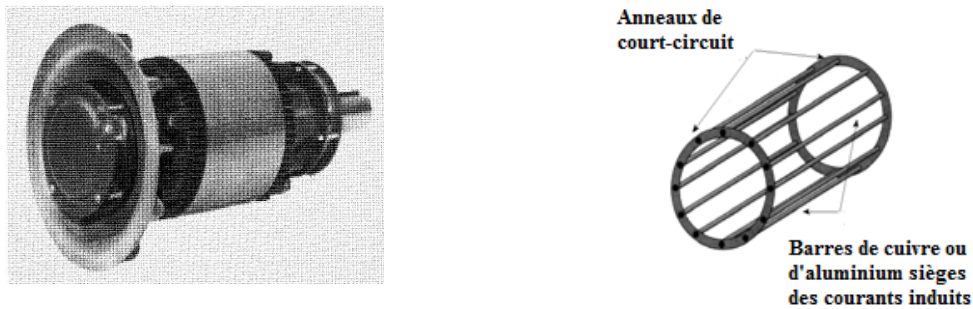
La figure ci-dessous montre les différents composants d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné.



**Figure. I.4 :** Description des différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné (à bagues).

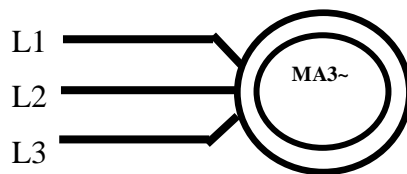
### I-3-2-2-Rotor à cage d'écureuil :

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension, la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand, la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate. Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).



**Figure. I.5 :** Rotor a cage d'écurieil d un moteur asynchrone triphasé

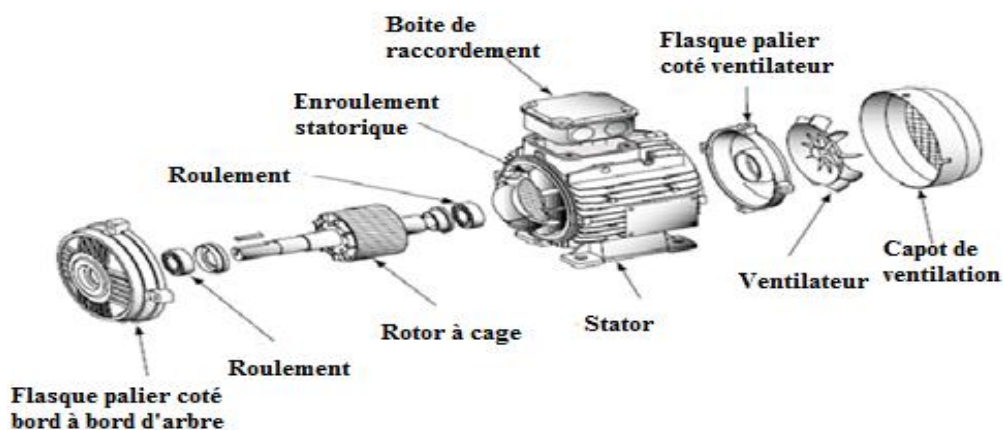
a- Symbole :



**Figure. I.6 :** Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage d'écurieil.

b- Description de différentes pièces d'un moteur asynchrone 3~ : [4]

La figure ci-dessous montre les différents composants d'un moteur asynchrone triphasé rotor à cage d'écurieil.

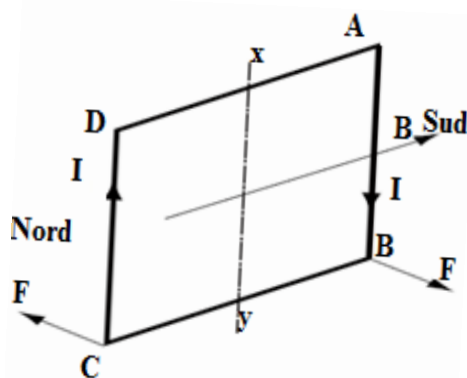


**Figure. I.7 :** Vue d'ensemble d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage d'écurieil.

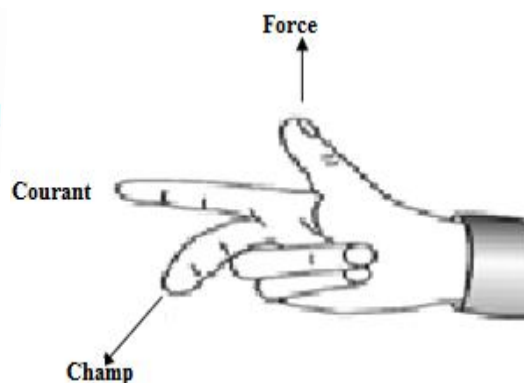
**I-4-Principe de fonctionnement :** [4]

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose sur la création d'un courant induit dans un conducteur lorsque celui-ci coupe les lignes de force d'un champ magnétique, d'où le nom de « moteur à induction ». L'action combinée de ce courant induit et du champ magnétique crée une force motrice sur le rotor du moteur. Supposons une spire

ABCD en court-circuit, située dans un champ magnétique  $B$ , et mobile autour d'un axe  $xy$  figure I.8 Si, par exemple, nous faisons tourner le champ magnétique dans le sens des aiguilles d'une montre, la spire est soumise à un flux variable et devient le siège d'une force électromotrice induite qui donne naissance à un courant induit  $i$  (loi de Faraday). D'après la loi de Lenz, le sens du courant est tel qu'il s'oppose par son action électromagnétique à la cause qui lui a donné naissance. Chacun des deux conducteurs est donc soumis à une force  $F$  de Laplace (de Lorentz, pour les Anglo-Saxons), de sens opposé à son déplacement relatif par rapport au champ inducteur. La règle des trois doigts de la main droite (action du champ sur un courant, figure I.9 permet de définir facilement le sens de la force  $F$  appliquée à chaque conducteur. Le pouce est placé dans le sens de la force de l'inducteur. L'index indique le sens du courant induit. Le majeur est placé dans le sens du champ. La spire est donc soumise à un couple qui provoque sa rotation dans le même sens que le champ inducteur, appelé champ tournant. La spire se met donc en rotation et le couple électromoteur produit équilibre le couple résistant.



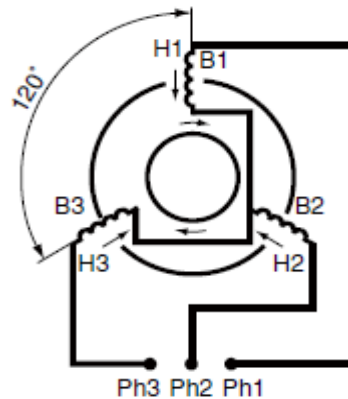
**Figure. I.8:** Création d'un courant induit dans une spire en court-circuit.



**Figure. I.9:** La règle des trois doigts de la droite pour trouver la direction de la force.

#### I-4-1-Création du champ tournant : [4]

Trois enroulements, géométriquement décalés de  $120^\circ$ , sont alimentés chacun par une des phases d'un réseau triphasé alternatif. Les enroulements sont parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique, et qui produisent chacun un champ magnétique alternatif sinusoïdal. Ce champ, toujours dirigé suivant le même axe, est maximal quand le courant dans l'enroulement est maximal. Le champ généré par chaque enroulement est la résultante de deux champs qui tournent en sens inverse et ayant chacun pour valeur constante la moitié de la valeur du champ maximal.



**Figure .I.10:** Bobinage triphasé d'un moteur asynchrone triphasé.

#### I-4-2-Vitesse de synchronisme : [4]

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator. Par exemple :

$$N_s = \frac{60.f}{P} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$N_s$ : Vitesse de synchronisme [tr/min].

$f$ : Fréquence [Hz].

$P$ : Nombre de paires de pôles.

Pour les fréquences industrielles de 50 Hz et 60 Hz, les vitesses de rotation du champ tournant, ou vitesses de synchronisme, en fonction du nombre de pôles, sont données dans le tableau I.1. Dans la pratique il n'est pas toujours possible d'augmenter la vitesse d'un moteur asynchrone en l'alimentant sous une fréquence supérieure à celle pour laquelle il est prévu, même si la tension est adaptée. Il convient en effet de vérifier si ses conceptions mécanique et électrique le permettent. A noter que compte tenu du glissement, les vitesses de rotation en charge des moteurs asynchrones sont légèrement inférieures aux vitesses de synchronisme indiquées dans le tableau.

**Tableau I.1** : Vitesses de synchronisme en fonction du nombre de pôles et de la fréquence du courant.

	50Hz	60Hz
Nombre de pôles	Vitesse de rotation en tr/min	
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600
16	375	480

**I-4-3-Glisement : [4]**

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut être que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse de la spire et celle du champ tournant.

C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé "moteur asynchrone". La différence entre la vitesse de synchronisme et celle de la spire est appelée "glissement" et s'exprime en % de la vitesse de Synchronisme.

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \cdot 100 \quad (\text{I.2})$$

Avec :

g: Le glissement [%].

$N_r$ : La vitesse de l'arbre du moteur [tr/min].

En fonctionnement, la fréquence du courant rotorique s'obtient en multipliant la fréquence d'alimentation par le glissement. Au démarrage, la fréquence du courant rotorique est donc maximale et égale à celle du courant statoriques. La fréquence du courant rotorique diminue progressivement au cours de la mise en vitesse du moteur.

Le glissement en régime établi est variable suivant la charge du moteur et selon le niveau de la tension d'alimentation qui lui est appliqué. Il est d'autant plus faible que le moteur est

peu chargé et il augmente si le moteur est alimenté en dessous de la tension nominale correspondant à la fréquence d'alimentation.

### I-5-Choix du couplage :

Afin d'adapter électriquement un moteur asynchrone triphasé et éviter de le griller par rapport à l'alimentation électrique distribuée sur le réseau, il est impératif de coupler les enroulements du moteur. La tension du réseau doit correspondre à la tension que supporte un enroulement du moteur, la plus petite tension inscrite sur la plaque signalétique du moteur correspond à la tension que supporte un enroulement. En effet, dans le montage triangle, un enroulement est câblé entre deux fils de phases, alors que dans le montage étoile, deux enroulements sont câblés entre deux fils de phases.

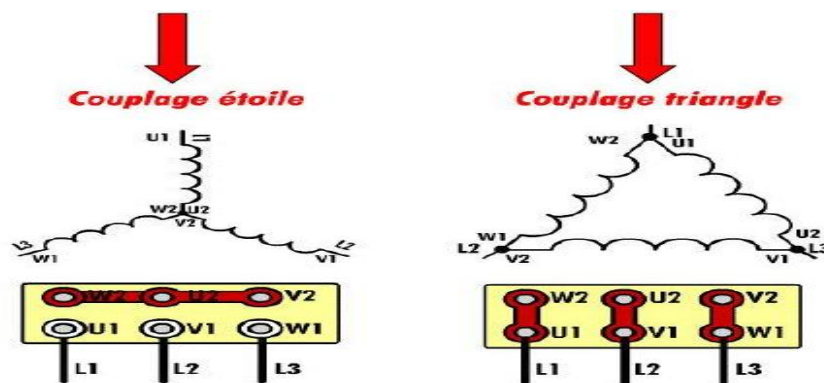
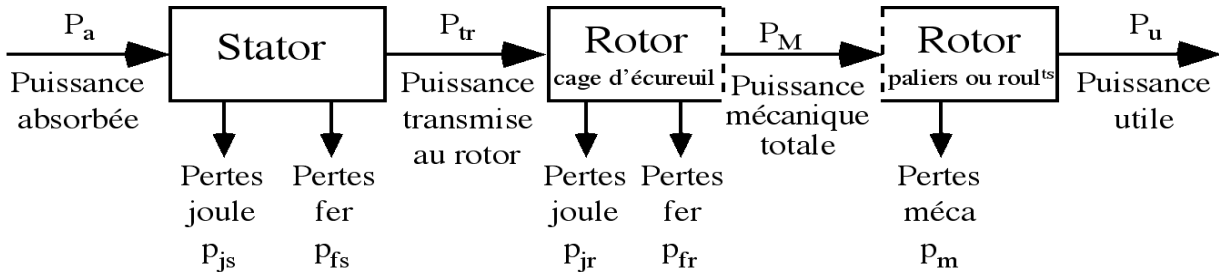


Figure. I.11: Couplage d'un moteur asynchrone 3~(étoile ou triangle).

### I-6-Bilan des puissances et des pertes : [1], [5]

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure I.13, le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée  $P_a$ . Une partie  $P_{js}$  de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator. Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer  $P_{fer}$ , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance  $P_{tr}$  est transmis au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique  $P_{em}$ , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule  $P_{jr}$ . La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile  $P_u$  qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par

divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles  $P_c$ . Nous donnons par la suite les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances impliquées dans le moteur asynchrone, lorsqu'elles sont calculables. La figure ci-dessous représente le Bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone 3~.



**Figure. I.12:** Bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone 3~.

### I-6-1-Puissance électrique absorbée: [1]

La puissance absorbée par un moteur asynchrone triphasé est une puissance active électrique. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé,  $P_a$  vérifie la relation :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$P_a$ : Puissance électrique absorbée [W].

$U$  : La tension d'alimentation entre phases [V] .

$I$ : Le courant de ligne [A].

$\cos \varphi$ : Facteur de puissance.

### I-6-2-Les pertes par effet Joule au stator : [1]

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors :

$$P_{js} = 3 \cdot r_1 \cdot I_1^2 \quad (\text{I.4})$$

Avec:

$P_{js}$  : Les pertes par effet Joule au stator [W].

$r_1$ : Résistance d'un enroulement statoriques [ $\Omega$ ].

$I_1$ : Le courant traversant l'enroulement statoriques [A].

Ou bien :

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$R_1$  : La résistance entre deux bornes [ $\Omega$ ].

### I-6-3-Les pertes fer au stator : [1]

Les pertes fer sont fonction du flux magnétique. Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or, en régime de fonctionnement, ces grandeurs ne varient pas et, par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur.

### I-6-4-La puissance transmise dans l'entrefer : [1]

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer  $P_{tr}$  est la partie de la puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer elle est donnée comme suit :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$P_{tr}$ : La puissance transmise dans l'entrefer [W].

### I-6-5-Pertes Joule au rotor : [1], [5]

Les pertes Joule au rotor sont fonctions de la puissance transmise à celui-ci. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonctions du glissement. En effet, les grandeurs  $P_{jr}$  et  $P_{tr}$  sont liées par la relation.

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (\text{I.7})$$

Ou bien :

$$P_{jr} = 3 \cdot r_2 I_2^2 \quad (\text{I.8})$$

Avec:

$P_{jr}$ : Pertes Joule au rotor [W].

$r_2$  : Résistance d'un enroulement rotorique [ $\Omega$ ].

$I_2$ : Le courant traversant l'enroulement rotorique [A].

$I_2$  : Le courant dans la barre [A]

**I-6-6-Puissance électromagnétique :**

La puissance électromagnétique  $P_{em}$  transmise au rotor est égale à [1] :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) \cdot P_{tr} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique [W].

**I-6-7-Les pertes mécaniques : [2]**

Les pertes mécaniques sont proportionnelles à la vitesse de rotation, et regroupent les pertes par frottement et par ventilation. Ces pertes sont pratiquement constantes.

**I-6-8-La puissance mécanique : [1]**

La puissance mécanique développée par le rotor est égale à la puissance électromagnétique que le stator lui fournit diminuée des pertes fer et pertes joule au rotor.

$$P_m = P_{em} - (P_{jr} + P_{fer r}) \quad (\text{I.11})$$

Et les pertes fer du rotor sont négligeables donc :

$$P_m = P_{em} - P_{jr} \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$P_m$  : La puissance mécanique [W].

$P_{fer r}$  : Les pertes fer au rotor [W].

**I-6-9-La puissance utile : [1], [5]**

De la puissance mécanique on soustrait les pertes mécaniques  $P_{méc}$  pour arriver à la puissance utile.

$$P_u = P_m - P_{méc} \quad (\text{I.13})$$

Ou bien aussi on a :

$$P_u = P_m - \sum \text{pertes} \quad (\text{I.14})$$

$$\text{Et} \quad \sum \text{pertes} = P_{js} + P_{fer} + P_c \quad (\text{I.15})$$

Avec les pertes fer du rotor sont négligeables.

Ou :

$P_u$  : La puissance utile [W] .

$P_c$  : Les pertes constantes [W].

**I-6-10-Détermination des pertes constantes : [1], [5]**

Les pertes constantes  $P_c$ , aussi appelées pertes collectives, regroupent les pertes fer et les pertes mécanique. Pour les déterminer, on réalise un essai à vide. En effet, si l'on regarde le bilan des pertes et des puissances, on voit que :

$$P_{u0} = P_{a0} - P_{js0} - P_c - P_{jr0} = \sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0 \cos \varphi_0 - P_{js0} - P_c - P_{jr0} \quad (\text{I.16})$$

Or, à vide, le glissement est très faible :  $g_0 = 0$  et donc  $P_{jr0} = 0$ . De plus, toujours à vide, le moteur ne délivre pas de puissance utile et donc  $P_{u0} = 0$ . En remplaçant ces valeurs dans l'équation, il vient que :

$$P_c = P_{a0} - P_{js0} \quad (\text{I.17})$$

Et les pertes joules à vide  $P_{js0} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_0^2$  sont négligeables, parce que le courant à vide  $I_0$  absorbé est faible donc :  $P_c = P_{a0}$

Pour mesurer les pertes constantes dans un moteur asynchrone, il suffit de mesurer la puissance absorbée (à l'aide d'un wattmètre par exemple) et de retrancher les pertes Joule au stator (calculées après une mesure avec un wattmètre). On peut dire que les pertes constantes à vide sont égales aux pertes constantes en charge  $P_c$  à vide  $\approx P_c$  en charge.

Et :

$$P_c = P_{a0} = P_{\text{fer s}} + P_{\text{méc}} \quad (\text{I.18})$$

Avec :

$P_{u0}$  : La puissance utile à vide [W]

$P_{a0}$  : Puissance électrique absorbée à vide [W].

$I_0$  : Le courant absorbé à vide [A].

$\cos \varphi_0$  : Facteur de puissance à vide.

$P_{js0}$  Les pertes par effet Joule au stator à vide [W].

$P_{jr0}$  : Pertes Joule au rotor à vide [W].

**I-6-11-Rendement du moteur asynchrone 3~ : [1]**

Le rendement  $\eta$  du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe, de sorte que:

$$\eta = \frac{P_U}{P_a} \quad (\text{I.19})$$

À l'aide de la chaîne des pertes, on peut aussi écrire :

$$\eta = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a} = \frac{P_a - (P_{jr} + P_{fer} + P_{jr} + P_c)}{P_a} \quad (\text{I.20})$$

D'où :

$$\eta = \frac{P_{tr}(1-g) - P_{méc}}{P_a} \quad (\text{I.21})$$

Avec :

$\eta$  : Rendement du moteur [%]

### I-7-couple moteur asynchrone 3~ :

#### I-7-1-Couple électromagnétique : [5]

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse ( $\Omega_s$ ): elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse ( $\Omega_r$ ). L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant ( $C_{em}$ ).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_r} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad (\text{I.22})$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique [N.m].

$\Omega_s$  : La vitesse synchrone,  $\Omega_s = \frac{2\pi N_s}{60}$  [rad/s]. (I.23)

$\Omega_r$  : La vitesse de rotor,  $\Omega_r = \frac{2\pi N_r}{60}$  [rad/s]. (I.24)

#### I-7-2-Couple utile $C_u$ : [1]

Le rotor déploie un couple utile ( $C_u$ ) à la vitesse ( $\Omega_r$ ). Il délivre alors la puissance utile ( $P_u$ ) telle que :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_r} \quad (\text{I.25})$$

Avec :

$C_u$  : Le Couple utile [N.m].

#### I-7-3-Le couple des pertes : [5]

Le couple des pertes c'est la différence entre le couple électromagnétique et le couple utile due aux pertes constantes.

$$C_p = C_{em} - C_u \quad (\text{I.26})$$

Ou bien :

$$C_p = \frac{P_c}{\Omega_r} \quad (\text{I.27})$$

Avec :

$C_p$  : Le couple des pertes [N.m].

### **I-8-Démarrage du moteur :**

Au démarrage du moteur le courant est très grand (4 à 8 fois  $I_n$ ), pour ne pas détériorer le moteur, il convient de le réduire.

Il existe deux procédés :

- Démarrage sous tension réduite
- Utilisation des résistances de démarrage

Nous allons voir deux solutions pour démarrage sous tension réduite :

#### **I-8-1- Démarrage sous tension réduite :**

Plusieurs dispositifs permettant de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur .Ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage.

##### **a- Démarrage étoile-triangle :**

Le moteur va démarrer en étoile pour fonctionner en triangle, cette méthode consiste à diminuer la tension d'alimentation.

##### **Montage étoile :**

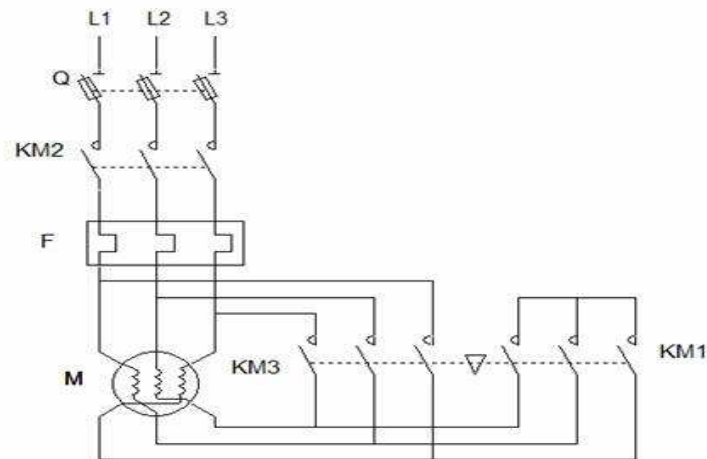
La tension aux bornes d'un enroulement est plus faible que la tension entre phase du réseau.

$$U' = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

##### **Montage triangle :**

$$U' = U$$

#### **a-1-Le schéma de puissance de démarrage étoile-triangle semi automatique d'un moteur asynchrone triphasé**



**Figure. I.12:** Schéma de puissance de démarrage étoile-triangle semi automatique d'un moteur asynchrone triphasé.

L1, L2, L3 : Alimentation triphasée.

F : Relais thermique.

M : Moteur triphasé.

Q : Fusible

KM1 : Contacteur couplage étoile.

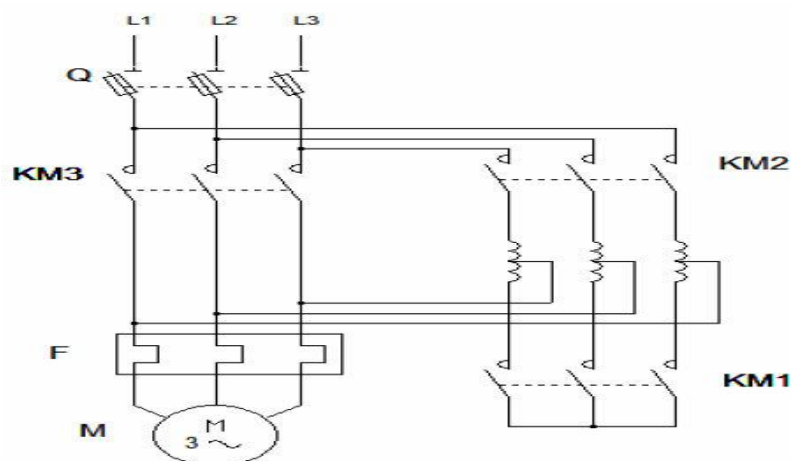
KM2 : Contacteur de ligne.

KM3 : Contacteur couplage triangle.

### b- Démarrage par auto-transformateur :

On augmente progressivement la tension aux bornes des phases du moteur à l'aide d'un auto-transformateur.

#### b.1 : Le schéma de puissance de démarrage par auto-transformateur :

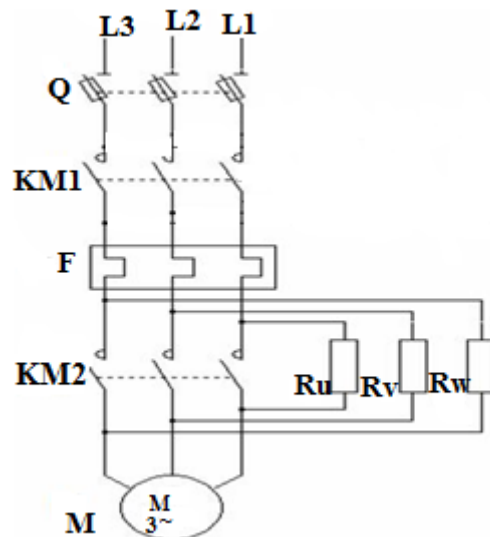


**Figure. I.13:** Schéma de puissance de démarrage par autotransformateur semi automatique d'un moteur asynchrone triphasé.

### c- Démarrage résistif :

Lors d'un démarrage résistif, on insère des résistances en série avec les enroulements statoriques, ce qui a pour effet de limiter la tension à leurs bornes. Une fois le démarrage est effectué, on court-circuite ces résistances.

### c-1-Démarrage par résistances statoriques semi-automatique à un sens de rotation :



**Figure. I.14:** Le schéma de puissance de démarrage par résistances statoriques semi-automatique à un sens de rotation.

L1, L2, L3 : Alimentation triphasée.

F : Relais thermique.

Q : Sectionneur à fusibles.

M : Moteur triphasé.

KM1 : Contacteur de ligne.

KM2 : Contacteur de court circuit des résistances.

Ru, Rv, Rw : groupe de résistances.

#### c-1-1- Principe de fonctionnement :

- La fermeture manuelle de l'interrupteur Q ;
- La fermeture de KM1 ;
- Démarrage du moteur par les résistances du stator ;
- La fermeture de KM2 ;
- Démarrage sans résistance.

**I-8-2-Démarrage à tension nominale (démarrage rotorique) :**

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissances sont insérées en série avec les enroulements du rotor, ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits, mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) permettant les connexions électriques des enroulements rotoriques.

**I-9-Inversion du sens de rotation d'un moteur asynchrone : [6]**

L'inversion du sens de rotation du moteur asynchrone est réalisée en inversant le sens du champ glissant. Pour ce faire il suffit de permuter les connexions de deux des trois phases alimentant le moteur.

**I-10-Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone :**

La vitesse de synchronisme ( $n_s$ ) dépend de la fréquence ( $f_s$ ) des courants statoriques. Et comme la vitesse ( $n$ ) reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut faire varier la fréquence  $f_s$ .

En réalité pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport  $\frac{V_s}{f_s}$  constant ( $V_s$  est la tension d'alimentation d'un enroulement).

Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

Un moteur asynchrone pouvant fonctionner sous 220V/50 Hz n'est pas sous-alimenté si à l'aide d'un onduleur, on ne lui applique qu'une tension de 110 V à 25 Hz, il peut ainsi développer à vitesse réduite le même couple maximale que celui qu'il peut fournir à vitesse élevée.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'ensemble du moteur asynchrone triphasé et son organisation.

Le moteur asynchrone est largement utilisé dans le domaine de l'industrie. Il offre le meilleur rapport-qualité prix, parce qu'il est facile à construire, Il a une robustesse mécanique élevée et une facilité de démarrage.

Pour mieux assimiler la machine en question, et comme il a été introduit, le suivant chapitre sera consacré à la description du processus de fabrication du moteur asynchrone fabriqué à l'entreprise : ELECTO-INDUSTRIES d'AZAZGA.

# Chapitre II

Processus de fabrication du moteur asynchrone (E-I)

**Introduction:**

Les moteurs asynchrones représentent au moins 80% des moteurs électriques utilisés couramment ; cela est dû, en grande partie, à leur simplicité de construction et facilité de démarrage. Ces moteurs sont fabriqués par l'entreprise Electro-Industries d'Azazga.

**II-1- Présentation de l'entreprise :**

L'entreprise : **ELECTRO-INDUSTRIES** est située sur la route nationale N°12, distante de 30Km du chef de la wilaya de TIZI- OUZOU et de 8Km de la commune d'AZAZGA.

**II-1-1- Objectifs :**

Cette entreprise est composée de deux unités ; toutes situées sur le même site à savoir :

- Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT(UTR).
- Unité de fabrication de moteurs électriques et prestations techniques (UMP)

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES sont conformes aux recommandations de la CEI et aux normes Allemandes (DIN/VDE).

La capacité de production des transformateurs couvre les besoins du marché Algérien à 70% environ, la vente des moteurs représente 30% environ de la capacité de production.

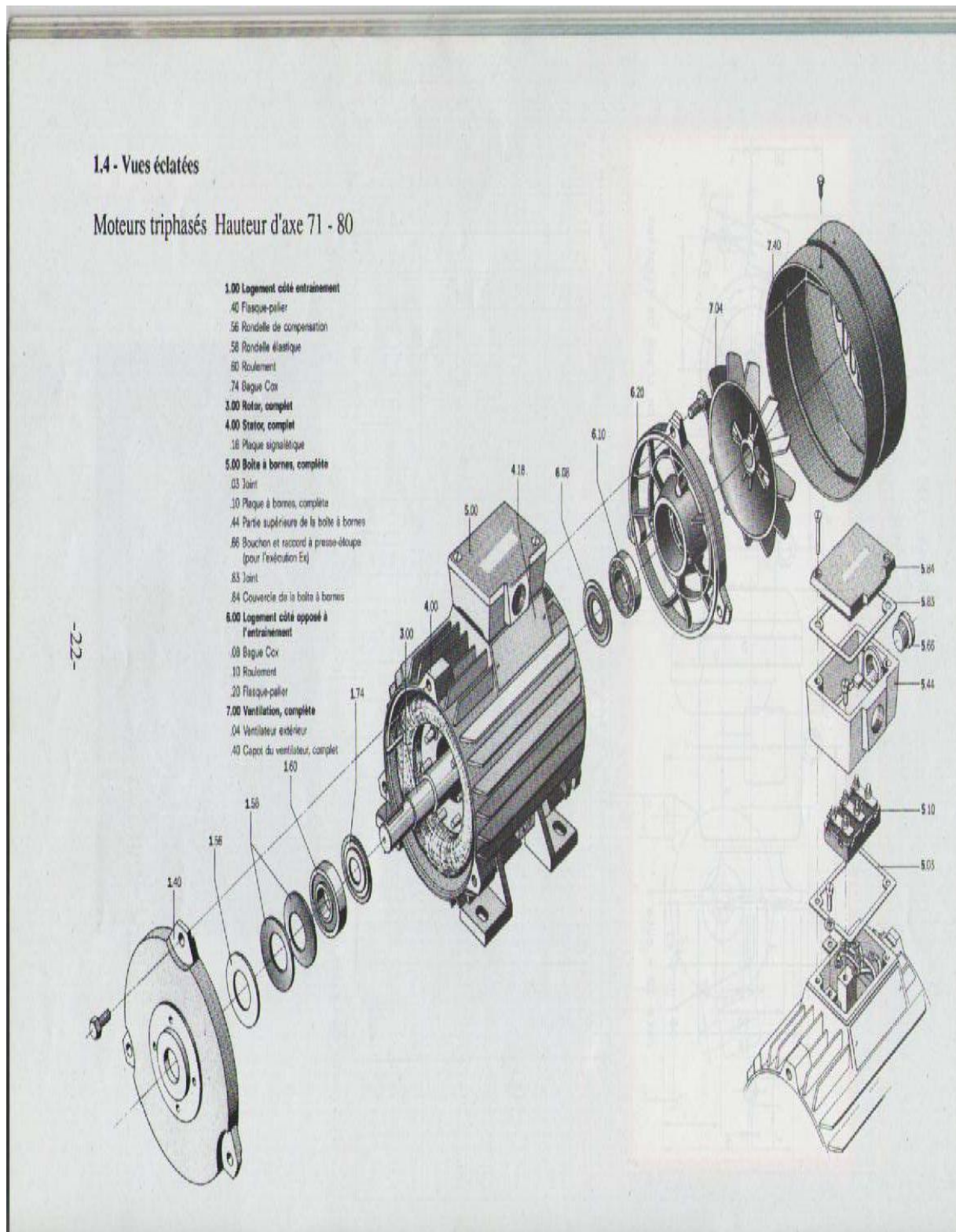
En matière de qualité, ELECTRO-INDUSTRIES dispose de ses propres laboratoires d'essais et de mesure de ces produits, aussi de contrôle des principales matières utilisées dans sa production.

**II-1-2 : présentation de l'unité moteurs:**

L'unité moteurs asynchrones et présentation (UMP), s'occupe essentiellement de la fabrication des moteurs asynchrones triphasés et monophasés à différentes hauteurs d'axes, mais sa production est basée surtout sur les moteurs asynchrones triphasés.

C'est pour cela que nous nous limitons au suivi du processus de fabrication de ce type de moteurs.

Parmi les moteurs électriques fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA, le moteur asynchrone à cage d'écureuil d hauteur d'axe 71-80 mm



**Figure II-1 : Moteur triphasé d'hauteur d'axe 71- 80 mm**

## **II-2- Processus de fabrication du moteur asynchrone :**

Dans le but de garantir une bonne qualité de production, avant le lancement de la fabrication des moteurs, les pièces et matières d'achats nécessaires pour la réalisation sont soumises à des tests contrôle.

Après cette phase de contrôle vient le lancement de la production des moteurs, suivant le programme de production.

Les phases de production des moteurs électriques à ELECTRO- INDUSTRIES se déroulent dans deux bâtiments de L' UMP.

### **II-2-1 Bâtiment 2 a :**

Dans ce bâtiment, on trouve les ateliers de découpage, encochage, emballage, fonderie sous pression de moulage.

#### **II-2-1-1-Ateliers de découpage, encochage et emballage :**

Dans cet atelier sont réalisés tous les travaux de transformation des tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces, à noter :

- 1-Découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques.
- 2- Fabrication des capots ventilateurs.
- 3-Découpage et emboutissage des agrafes.
- 4-Emballage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques.

#### **a) Fabrication des tôles statoriques et rotoriques :**

L'atelier reçoit des rouleaux des tôles magnétiques achetées par L' ELECTRO-INDUSTRIES de nature :

-Isolés aux vernis pour les moteurs à la hauteur d'axes variant de 183 à 404mm.

-Non isolé, leurs isolation se fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteur d'axe allant de 070 à 163mm.

#### **✚ procédé de découpage :**

Il existe (03) procédés de découpage :

-Découpage automatique successif.

- Découpage automatique par outils à encocher.
- Découpage semi-automatique par outils à encocher.

Le procédé le plus répandu dans cet atelier, est celui du découpage automatique successif à la presse rapide .ce procédé permet de découper et d'encoquer dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques pour certains types de moteurs de forte commande .Tous ces procédés aboutissent au même résultat à savoir la fabrication des tôles statoriques.

#### **b) Empaquetage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques :**

Cette opération se fait sur presse à empaqueter, pour réalisation des paquets statoriques et rotoriques à partir des tôles magnétiques, l'ensemble est fixé à l'aide d'agrafes pour les paquets statoriques et à l'aide de rivets pour certains paquets rotoriques.

#### **c)Fabrication des capots de ventilateurs :**

Ils sont réalisés à partir des tôles, soit galvanisées soit d'acier laminé à froid.

Les ventilateurs sont achetés en plastique pour les hauteurs d'axes de 070à160mm et en fonte pour les hauteurs d'axes 180 à 220mm ces ventilateurs sont achetés brut ensuite usinées.

Pour les hauteurs d'axes supérieurs à 220 mm, le noyau est en fonte acheté brut et fini à l'usinage fixé à l'aide de boulons à une roue en acier laminé à froid fabriqué à 2a à l'aide de deux couronnes différentes , assemblées avec des ailettes en formes de Z , l'ensemble est lié par une soudure.

#### **d) Découpage des barres de cuivre pour les rotors à cage d'écureuil :**

Lorsqu' il s'agit d'un moteur à enroulement rotorique avec barre, celles-ci sont découpées à des longueurs appropriées au type de moteur .Elles sont de nature en cuivre plat pour le remplissage des encoches rotoriques des moteurs à une seule cage, et de celle de la cage intérieure des moteurs à double cage (les extrémités sont court-circuitées à l'aide d'anneaux en cuivre).

#### **➤ Les différents ateliers :**

##### **II-2-1-2- Atelier de moulage sous pression :**

Dans cet atelier se fait :

- Se fait la fabrication des pièces en aluminium et en alpax (alliage d'aluminium).

-Injection d'aluminium dans les encoches rotoriques pour former la cage d'écuriel.

## II-2-2 - Bâtiment 2:

### II-2-2-1- Atelier d'usinage:

#### a) Fabrication des arbres rotoriques :

##### + Découpage :

Les arbres rotoriques sont réalisés à partir des ronds d'acier découpés à l'aide d'une scie mécanique à des longueurs brutes correspondantes aux types de moteurs à fabriquer.

##### + centrage et dressage :

Ils se font sur une machine à tour parallèle qui fait la mise en longueur, le perçage des trous de centrage et de taraudage.

##### + Tournage :

Il se fait sur un tour parallèle d'ébauche et de finition, pour réaliser les cotes fonctionnelles (bout d'arbre, logement de roulement et la partie conique d'emmanchement).

##### + Fraisage des logements de clavettes :

Il se fait sur des fraises verticales

**Remarque :** une fois l'arbre réalisé, il est envoyé au bâtiment 2a pour l'emmancher dans le paquet rotorique.

#### b) Usinage des différentes pièces en fonte et en alpac (alliage d'aluminium) :

- Carcasse

Usinage de diamètre intérieur de la carcasse à l'aide des trous verticaux, pour les pièces en fontes et tours à commande numérique pour celle en alpac, pour recevoir le paquet statoriques.

- Flasques (AS, BS) :

-Tournage des bords de centrage et du logement de roulement et de sa profondeur.

- Perçage et taraudage des trous (de fixation, d'entrée des câbles).
- Fraisage des surfaces d'appuis de fixations du moteur.

### II-2-2-2 Atelier de bobinage :

Cet atelier est réparti en trois secteurs :

#### a) Secteur préparation isolation :

Dans l'industrie de fabrication des moteurs électriques, les conducteurs doivent toujours être isolés par mesure de sécurité afin d'éviter les courts circuits qui diminuent la qualité de la matière et apporter le maximum de sécurité aux personnes, pour cela on a besoin de matériaux isolants de haute qualité et supportant les effets thermiques engendrés par le fonctionnement de la machine.

C'est dans ce secteur que sont préparés tous les isolants pour tous les types de moteurs.

- caniveaux d'encoches :
- lames intermédiaires :
- cales de fermeture :
- gaines isolants :
- séparateurs de phases :
- câbles de raccordement :

Les isolants utilisés par **ELECTRO-INDUSTRIE**, garantissent une qualité conforme aux normes internationales en vigueur.

#### b) Secteur préparation des bobines :

Une fois le cuivre est contrôlé, il transite au magasin pour être remis aux bobineurs pour la confection des bobines qui se fait à l'aide des gabarits montés sur les machines rotatives (bobineuses) qui sont réglés selon le nombre de spires par faisceaux.

#### c)Secteur bobinage de paquet statoriques :

C'est dans ce secteur que l'on dispose les bobines contrôlées et conformes dans le parquet statoriques, déjà isolé avec des caniveaux d'encoches, suivant un schéma de bobinage délivré par la construction pour chaque type de moteur

C'est pendant cette opération que l'on intègre les lames intermédiaires pour le bobinage à doubles couches ainsi que les cales de fermeture.

Une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter les courts circuits entre phases.

- **Connexion des bobines :**

Les bobines de chaque phase sont liées entre elles de façon précise en conformité avec le schéma de bobinage afin d'obtenir trois grands enroulements, chacun d'eux a une entrée et une sortie. Les points de connexion sont brasés et isolés avec des gaines isolantes déjà placées.

- **Connexion des bobines avec les câbles de raccordement :**

Les entrées et les sorties de chaque phase sont connectées et soudées à des câbles de raccordement qui assurent la liaison électrique avec la boîte à bornes entrée et sortie de chaque phase, qui sont distinguées des autres avec des couleurs.

Phase U= orange

Phase V= noir

Phase w=rouge

**Exemple:**

Entrée 1.Sortie 1. / Orange

Entrée2. Sortie2. /Noir

Entrée3.Sortie3. /Rouge

Les entrées des phases sont situées d'un observateur situé en face des connections, les sorties sont de l'autre côté.

- **Frettage et pressage des câbles :**

Le stator subit à la main à l'aide d'un fil isolant, une fois fait, le stator passe à la presse hydraulique pour donner la forme et les dimensions définitives des têtes de bobines côté AS et BS (AS et BS sont les notations techniques pour le repérage sur la boîte à bornes).

**d) Contrôle :****• Contrôle visuel :**

- Contrôle des séparateurs des phases et les têtes par rapport au diamètre extérieur du paquet statoriques.
- vérification des caniveaux d'encoches, séparateur de phase et réglette de fermeture.

**• Contrôle électrique :**

- Mesure de résistance ohmique entre phase et entre phase et masse à haute tension (2000V)
- Contrôle de la polarité des trois phases en cas d'anomalies, en vue de localiser les trois entrées et les trois sorties.

**e) Imprégnation :**

Cette opération consiste à mettre de la résine au stator pour le rendre plus compact et solidaire, deux méthodes son utilisées :

- Imprégnation goutte à goutte (pour les petites hauteurs d'axes)
- Imprégnation dans un bain de résine, puis séché dans des fours à 150° C (pour les moyens et grands d'axes).

**II-2-2-3-Atelier de montage :**

Cet atelier est réparti en trois secteurs essentiels :

**a) Secteurs équilibrage du rotor :**

Il a pour but d'assurer une rotation uniforme et de compenser les balourds pouvant provenir des cas suivants ;

- Manque d'homogénéité de la matière.
- Défauts d'usinage.
- Malformation des barres de cuivre.

**b) Secteur pré montage :**

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

- Huiler l'intérieur de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique dans celle-ci.
- Emmanchement de paquet avec presse.
  
- Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse. Coté AS et BS.
- Fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe exacte.

### **c)secteur montage final :**

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

- Mise en place du couvercle de palier intérieur cote BS pour assurer une bonne étanchéité.
- Emmanchement des roulements déjà graissés coté AS et BS avec une presse verticale et emplacement des clavettes coté AS pour les petits et moyens moteurs et à la main une fois chauffé pour les grands moteurs.
  - Visser le couvercle de palier sur le flasque, cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces.
- Emplacement de la clavette coté BS et emmanchement du ventilateur, puis insertion de la bague d'arrêt (serre clips) pour le ventilateur.
- Intégration du rotor complet dans le stator et fixation de flasque coté BS avec des vices.
- Emplacement des rondelles (rondelles de compensation et rondelles élastique) sur le flasque coté AS pour éviter le jeu axial du rotor :
- Fixation du flasque sur la carcasse ainsi que le montage du capot du ventilateur.
- Préparation de la boîte à bornes et fixation des câbles des raccordements sur la plaque a bornes.

### **d) contrôle final :**

Une fois le montage fini, le moteur sera remis aux plates-formes d'essais.

Les différentes opérations de contrôle effectuées dans chaque essai sont les suivantes :

➤ **Les différents essais :**

**d-1) Essai série :**

Les moteurs arrivant à cette plate-forme d'essais subissent les contrôles suivants :

• **Contrôle visuel :**

Cet essai a pour objectif de contrôler le bon montage du moteur (vis, plaque signalétique et le raccordement des fils).

• **Essai à vide :**

Le moteur est alimenté sous une tension nominale  $U_n$  on mesure :

-Le courant  $I_0$

-La puissance à vide  $P_0$

-Le facteur de puissance à vide  $\cos \varphi$

Dans cet essai, on effectue le contrôle des bruits électriques et mécaniques, qui s'effectue à l'aide d'un tournevis que l'opérateur déplace sur différentes parties extérieures du moteur pour écouter et distinguer les bruits étranges.

• **Essai en court-circuit (à rotor bloqué) :**

Le moteur à rotor bloqué, est alimenté sous un courant nominal  $I_n$ , on mesure :

-La tension de court-circuit  $U_{CC}$

-La puissance de court-circuit  $P_{CC}$

-Le facteur de puissance  $\cos \varphi_{CC}$

• **Essai de haute tension :**

Cet essai pour objectif de contrôler la bonne isolation entre phases, et la masse à 2000V, cette tension est choisie en fonction de la puissance du moteur.

**d-2) Essais spéciaux :**

Les essais effectués dans cette plateforme sont :

- **Mesure des résistances :**

-Mesure des résistances des enroulements et la comparer à la résistance de consigne (elle ne doit pas dépasser 3% de  $R_n$ )

-Mesure de résistance entre phases et les comparer entre elles (la différence ne doit pas dépasser les 2%).

- **Essai à vide :**

A la tension nominale, on prélève :

-Le Courant  $I_0$

-La puissance  $P_0$

-Le facteur puissance  $\cos \varphi_0$ .

- **Essai en court-circuit :**

Sous le courant nominal, on mesure :

-La tension  $U_{cc}$ .

-La puissance  $P_{cc}$

-Le facteur de puissance  $\cos \varphi_{cc}$

- **Essai de haute tension :**

Contrôle de la bonne isolation entre phases, et la masse à 2000V

- **Essais en charge :**

Appelé aussi essais d'échauffement, il a pour objectif de juger la bonne tenue de la classe d'isolation du moteur et de déterminer la température limitée à puissance nominale.

- On prélève la température de la carcasse froide.

-On fait tourner le moteur sous sa tension nominale.

-Au fur et à mesure que le moteur tourne, il s'échauffe, les pertes augmentent et la puissance utile chute, pour compenser cette puissance, on agit sur les charges afin de rendre cette puissance constante.

-L'essai durera jusqu'à ce que la température limite de la carcasse soit atteinte et stable, à ce moment précis, toutes les données électriques et mécaniques sont prélevées ( $I_n, \cos \varphi, n, \eta$ ) et sont comparées à la plaque signalétique.

Dans le cas où le moteur contrôlé présente une anomalie d'après les résultats d'un essai quelconque, celui-ci est envoyé vers le poste de réparation mécanique où il va être démonté et réparé si la panne est mécanique, si non, le paquet statoriques bobiné est envoyé à son tour vers le poste de réparation électrique pour réparer ou refaire le bobinage.

Dans les deux cas de panne que pourrait avoir le moteur, parmi les causes qui provoquent cette non-conformité, la mauvaise matière rentrant dans la constitution d'une partie quelconque du moteur (tôle magnétique, fil en cuivre, isolants).

### **Conclusion :**

Pour la raison citée au dessus pour laquelle le moteur tombe en panne, nous allons consacrer le chapitre suivant à des généralités sur le matériau électrotechnique suivi d'un chapitre d'étude des différents matériaux exigés pour la fabrication du moteur (E-I) et leur méthode de contrôle.

**Introduction :**

L'objectif visé à travers ce chapitre est de présenter les différents matériaux électrotechniques. Ils sont classés suivant leurs applications, on les distingue comme suit :

- Matériaux conducteurs de l'électricité.
- Matériaux magnétiques pour créer ou canaliser le champ magnétique.
- Matériaux isolants.
- Matériaux semi- conducteurs pour réaliser ou fabriquer les dispositifs électroniques.

Dans notre travail nous nous intéresserons aux matériaux conducteurs, matériaux isolants et matériaux magnétiques.

**III-1 : Les matériaux conducteurs :**

La plupart des conducteurs sont des solides, mais le gaz comme l'air peut devenir conducteur .certains liquides, comme l'eau salée, peuvent également conduire un courant électrique, de sorte qu'on peut les classer parmi les conducteurs.

**III-1-1 : Les bons conducteurs :**

De tous les solides, l'argent est le meilleur conducteur d'électricité mais, en raison de son coût prohibitif, son usage est restreint aux contacts destinés à l'ouverture et la fermeture des circuits électriques.

Dans les applications générales, le matériau le plus employé est le cuivre. On utilise des conducteurs d'aluminium pour les lignes de transport de l'énergie, car pour une longueur donnée et un même poids, la résistance électrique d'aluminium est sensiblement la moitié de celle du cuivre. Cependant, pour une résistance donnée, son volume est 1,7 fois plus grand que celui du cuivre. Ce qui le rend moins intéressant comme conducteur dans les machines électriques.

Le bronze phosphoreux se coule très facilement et il est très employé pour les pièces moulées.

**III-1-2 : Formes des conducteurs :**

Suivant leurs applications, les conducteurs prennent une grande variété de formes : on les rencontre sous forme de fil de section ronde, carrée ou plate. Sous forme de câbles toronnés et sous forme de barres.

Les conducteurs se présentent généralement sous forme de fils de section ronde, obtenus directement par tréfilage.

Les fils bons conducteurs de section carrée et rectangulaire sont employés pour les enroulements à grande section des transformateurs et des machines rotatives.

**III-1-3 : Propriétés physiques et chimiques :****III-1-3-1- Propriétés physiques : [7]****❖ La masse volumique :**

C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau, elle est exprimée par Kg/m<sup>3</sup>.

**❖ Point de fusion :**

C'est le passage d'un matériau de l'état solide à l'état liquide, toujours à la même température, il s'exprime en degré Celsius (°C).

**❖ Dilatation :**

Une barre chauffée s'allonge d'autant plus qu'elle est portée à une température plus élevée. On définit un coefficient de dilatation  $\alpha$  pour chaque matériau. Connaissant la longueur d'une barre à 0°C, On peut déterminer sa longueur à une température  $t$  par :

$$L_t = L_0(1 + \alpha\Delta t)$$

Avec :

$\alpha$  : Coefficient de dilatation.

$\Delta t$  : Différence de température entre 0°C et  $t$ °C.

$L_0$  : Longueur à 0°C.

$L_t$  : Longueur à  $t$ °C.

**III-1-3-2 : propriétés chimiques : [8]****❖ Action des acides, bases, sels :**

La plupart des métaux sont laqués par les acides alors que les matières plastiques sont insensibles aux agents chimiques. L'action des bases et des sels est variable selon les corps en présence.

**❖ Oxydation, corrosion :**

L'action combinée de l'oxygène, d'air et de la chaleur, d'humidité produit une détérioration lente de la surface des métaux.

La poussière véhiculée par l'air ambiant peut provoquer des dépôts conducteurs sur les matières isolantes.

**III-1-4 : Propriétés mécaniques : [9]**

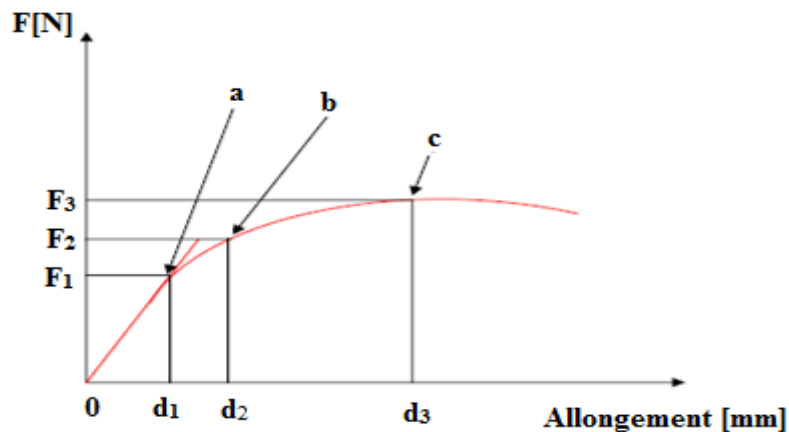
La propriété mécanique peut être distinguée par application d'un effort de traction progressif sur une éprouvette, qui à une longueur précise  $l$  et une section  $S$  avant l'exécution de l'effort.

**III-1-4-1 : Résistance à la traction :**

La résistance à la traction joue un rôle important lors de la pose du bobinage des enroulements.

**III-1-4-2 : Traction et allongement :**

Par l'augmentation de la force de traction  $F$  exercée sur un fil métallique, on obtient une série de valeurs que l'on peut porter sur un graphique (figure II.1).



**Figure. III.1 :** Allongement d'un fil en fonction de la force de traction.

Les points b et c représentent respectivement la limite élastiques et la tension de rupture.

Dans la partie « 0a », le fil se comporte comme un ressort, il reprend sa forme originale dès que la traction cesse.

Pour des forces supérieures à «  $F_1$  » et inférieures à «  $F_2$  », le fil perd un peu de son élasticité et il ne revient pas à sa longueur originale lorsque la traction cesse.

La résistance limite élastique s'exprime comme suit :

$$R_e = \frac{F_2}{S}$$

$R_e$  : Résistance limite élastique.

$S$  : Section du conducteur.

$F_2$  : Force appliquée.

Au-delà de point « c » une force même inférieure à «  $F_3$  » réussit à étirer le conducteur jusqu'à sa rupture complète, la contrainte de rupture exprimée par le rapport  $\frac{F_3}{S}$ .

Tous les conducteurs possèdent de telles courbes de traction mais les forces  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  variant beaucoup suivant le métal.

### III-1-5 : Propriétés électriques : [9]

Certains matériaux, les métaux en général, offrent une faible résistance au passage du courant, ce sont les matériaux bons conducteurs.

#### III-1-5-1 : Résistance d'un conducteur :

A une température donnée, la résistance d'un conducteur dépend de :

Sa longueur ;

Sa section ;

La nature de la substance qui le constitue.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R : Résistance du conducteur en [ $\Omega$ ].

L : Longueur du conducteur [m].

$\rho$  : Résistivité de la substance [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ].

S : Section du conducteur [ $\text{mm}^2$ ].

#### III-1-5-2 : Variation de la résistance avec la température:

La résistance d'un conducteur dépend de la température « t », elle est calculée comme suit :

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \cdot t)$$

$\rho_t$  : Résistivité à une température « t » [ $\Omega\cdot\text{m}$ ].

$\rho_0$  : Résistivité à 0°C.

$\alpha$  : Coefficient de température.

Puisque la résistivité varie avec la température, il s'ensuit que la résistance de tout dispositif électrique varie en proportion. On peut donc exprimer la variation de la résistance par la formule suivante :

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t)$$

$R_t$  : Résistance à une température « t ». [ $\Omega$ ]

$R_0$  : Résistance à 0°C. [ $\Omega$ ]

### III-2 : Les matériaux isolants : [9]

Les matériaux isolants sont nécessaires chaque fois que l'on est en présence de conducteurs soumis à une différence de potentiel. Lorsque les conducteurs sont nus, l'air ambiant qui assure leurs isolation.

#### III-2-1 : Classifications :

La très grande variété des isolants nécessite des classifications selon les critères suivant :

##### III-2-1-1 : Classification thermique :

Selon leur aptitude à supporter des températures plus élevées, les isolants sont groupés en huit (8) classes.

- **La classe A** : L'ensemble des matériaux ou combinaisons de matériaux tels que le coton et le papier lorsqu' ils sont convenablement intégrés ou recouverts ou lorsqu' ils sont immergés dans un liquide diélectrique tels que l'huile.
- **La classe B** : Les matériaux ou combinaison de matériaux tels que le mica, la fibre de verre, l'amiante, utilisés avec des substances adhésives convenables ayant la même durée de vie thermique à 150°C.
- **La classe F** : Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que le mica, la fibre de verre, l'amiante, utilisé avec des substances adhésives convenables ayant même durée de vie thermique à 155°C.
- **La classe H** : Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que l'élastomère au silicone, le mica, la fibre de verre, l'amiante, utilisés avec des substances adhésives

convenables, tels que les résines ou silicone. Ayant la même durée de vie thermique à 180°C.

- **La classe N :** Matériaux ou combinaisons de matériaux qui ont démontré par expérience ou par des tests approuvés qu'ils possèdent la durée de vie thermique requise à 200°C.
- **La classe R :** Matériaux ou combinaisons de matériaux qui ont démontré par expérience ou par des tests approuvés qu'ils possèdent la durée de vie thermique requise à 220°C.
- **La classe S :** Matériaux ou combinaisons de matériaux qui ont démontré par expérience ou par des tests approuvés qu'ils possèdent la durée de vie thermique requise à 240°C.
- **La classe C :** matériaux composé entièrement de mica, porcelaine, verre, quarts et de matériaux inorganiques semblables, la durée de vie thermique est au-dessus de 240°C.

### III-2-1-2 : Classification physique :

Les matériaux isolants peuvent se présenter sous trois états :

#### ❖ Isolants solides :

- La fibre de verre pour créer des feuilles et des plaques isolantes ayant une grande dureté mécanique, une excellente résistance aux hautes températures et des propriétés électrique supérieures.
- Le coton s'emploie pour la fabrication des feuilles et des plaques isolantes et pour revêtir des câbles.
- Le papier est encore un des meilleurs matériaux pour recouvrir les conducteurs à haute tension.
- L'amiante qui sert à recouvrir les fils destinés aux endroits chauds et à fabriquer les panneaux isolants pour les tableaux de commande.
- Le mica sert à supporter les éléments chauds des grille-pains isolant des collecteurs de machines, et à tout autre endroit où sa grande résistance aux hautes températures est requise.

### ❖ Isolants liquides

Dans les transformateurs de grandes puissances, l'huile est utilisée comme isolant, et sert à empêcher l'oxydation des enroulements, l'huile possède l'inconvénient d'être inflammable.

### ❖ Isolants gazeux :

Dans les conditions normales l'air qui nous entoure est l'un des meilleurs isolants. Ses caractéristiques thermiques sont supérieures à celles des porcelaines, il peut aussi agir comme agent de refroidissement, et ne coûte absolument rien. Toutefois, à des températures élevées, l'air devient bon conducteur par suite du phénomène d'ionisation.

## III-2-2 : Propriétés diélectriques :

### III-2-2-1 : Résistivité électrique des isolants :

Lorsqu'on applique une tension à un isolant, aussi bon soit-il, on provoque la circulation d'un très faible courant, dont une partie passe à travers son volume et une autre passe en surface. La résistivité surfacique varie avec l'humidité et la propreté de la surface, la résistivité volumique est assez constante.

### III-2-2-2 : Rigidité diélectrique – phénomène de claquage :

La fonction principale d'un diélectrique est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le soumet à une tension électrique. Cependant, ce diélectrique ne peut supporter des tensions croissant indéfiniment, à une certaine tension. Il se produit un phénomène de claquage où la substance perd ses propriétés isolantes.

### III-2-2-3 : Conductivité thermique :

Les isolants sont tous de mauvais conducteurs de la chaleur, leur conductivité thermique étant environ 2000 fois inférieure à celle de cuivre. Cette faible conductivité thermique des isolants conduit les fabricants à réduire le revêtement des conducteurs au strict minimum sans toutefois risquer le claquage compromettant leur dureté mécanique.

## III-3 : Les matériaux magnétiques :

### Introduction :

Le matériau de base dans une machine électrique est incontestablement le matériau magnétique. Une machine électrique performante est celle qui développe une grande énergie volumique, un meilleur rendement et de faibles pertes. Pour satisfaire ces exigences le circuit

magnétique doit posséder une grande perméabilité magnétique, atteindre de grandes inductions et présenter des cycles d'hystérésis très minces. A ce jour, le matériau magnétique qui répond le mieux à ces critères est l'alliage fer-silicium à 2ou3% de silicium. Cet alliage peut atteindre des inductions proches de 2 teslas des perméabilités relatives de 60000 ou même 80000 et des pertes magnétiques pouvant descendre jusqu'à moins de 1W/Kg. L'alliage Fe-Si élaboré en métallurgie se présente sous forme de tôles minces ( $\leq 1\text{mm}$ ) à graine orientés ou non orientés, isolées électriquement les unes des autres.

### III -3-1 : Les matériaux ferromagnétiques :

Le ferromagnétisme est le type de magnétisme résultant de l'alignement de moments magnétique permanents, ces moments étant orientés parallèlement les uns aux autres par une interaction mutuelle appelée couplage ferromagnétique (Figure III.2). Les matériaux ferromagnétiques ont une température de Curie, au-dessus de laquelle ils deviennent paramagnétiques, leur susceptibilité suit alors la loi de Curie-Weiss :

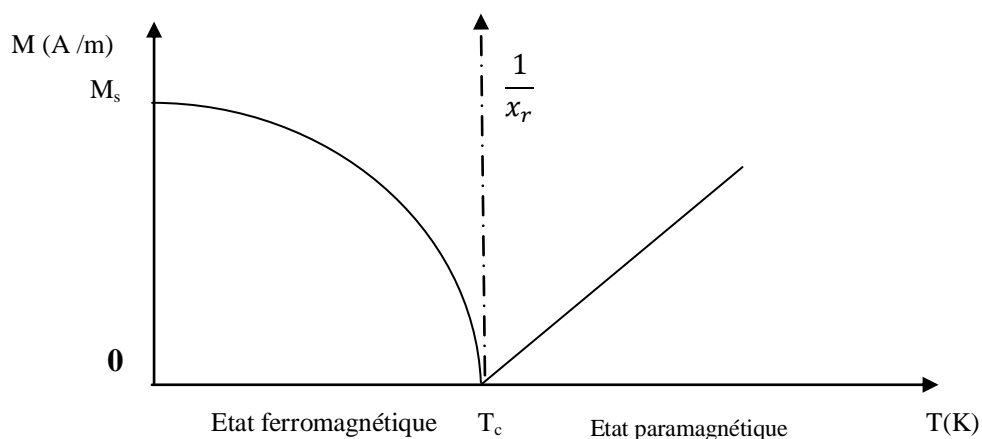
$$x_r = \frac{c}{T - T_C}$$

$T_C$  : température de Curie.

$C$  : constante de Curie.

$X_r$  : susceptibilité magnétique.

$M_s$  : aimantation.



**Figure .III.2 :** Variation de l'aimantation en fonction de la température.

**III-3-1-1 : Définition de l'aimantation :**

Un corps est aimanté si dans un volume donné de ce corps, la somme des moments magnétiques atomiques est différente de zéro.

On appelle aimantation magnétique, la valeur du moment magnétique ampérien par unité de volume de la substance magnétique. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_{iA}}{V}$$

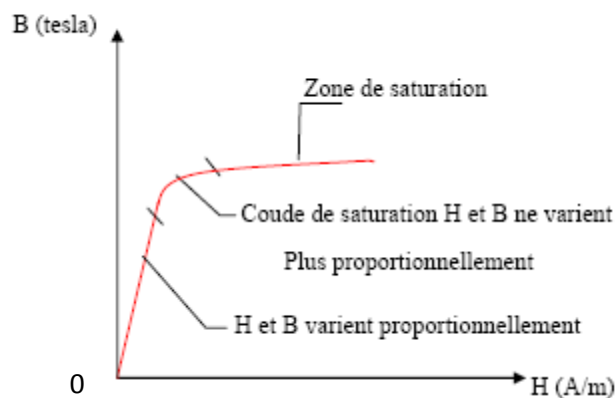
$\vec{M}$  : Aimantation en (A/m),

$M_{iA}$  : Moment magnétique ampérien en (A.m<sup>2</sup>),

V : Volume en (m<sup>3</sup>).

**III-3-1-2 : Courbe d'aimantation :**

Lorsque on augmente l'excitation magnétique « H » dans une bobine munie d'un noyau magnétique, le champ « B » mesuré varie selon une courbe appelée « courbe de première aimantation »



**Figure. III.3 :** Courbe de première aimantation

**III-3-1-3 : Définition de la polarisation :**

On appelle polarisation magnétique, le moment magnétique dipolaire par unité de volume de la substance magnétique. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{m}_{id}}{V}$$

$\vec{J}$  : Polarisation en (T) ou (Wb/m<sup>2</sup>),

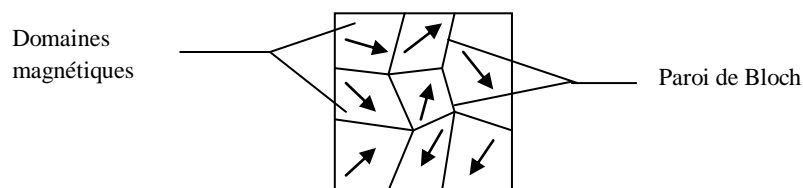
$\vec{m}_{id}$  : Le moment magnétique dipolaire en (Wb.m),

V : Volume de la substance magnétique(m<sup>3</sup>),

### III-3-1-4 : Structure en domaines de Weiss dans un monocristal ferromagnétique :

Les substances ferromagnétiques se distinguent des corps paramagnétiques par leur propriété de posséder une aimantation permanente spontanée en l'absence de champ magnétique extérieur.

Les propriétés ferromagnétiques se déterminent par un comportement collectif des moments magnétiques. L'expérience montre que les moments magnétiques des matériaux ferromagnétiques sont regroupés et alignés parallèlement les uns par rapport aux autres dans de petits volumes ou régions du corps, appelés domaines magnétiques élémentaires. A l'intérieur d'un domaine tous les moments magnétiques atomiques sont maintenus parallèles par les forces d'échange, de telle sorte que chaque domaine se présente comme un petit volume aimanté à saturation. Les domaines diffèrent par l'orientation de la polarisation magnétique  $J$  de chacun d'eux. Chaque domaine est séparé d'un voisin par une zone de transition appelée paroi de Bloch (Figure III-4).



**Figure .III.4 :** Structure en domaines d'un ferromagnétique

- **Les parois de Bloch :**

Les parois de Bloch sont les régions de transition entre deux domaines adjacents.

### III-3-1-5 : Energie interne d'un cristal ferromagnétique :

L'énergie interne associée à la structure en domaines,  $W_{in}$ , comprend 4 termes :

$$W_{in} = w_{an} + w_{ms} + w_{ec} + w_{mt}$$

Avec :

$w_{an}$  : Energie d'anisotropie.

$w_{ms}$  : Energie magnétostatique.

$w_{ec}$  : Energie d'échange.

$w_{mt}$  : Energie magnétostrictive.

**III-3-1-5-1 : Energie d'anisotropie  $w_{an}$  :**

La rotation des moments magnétiques par rapport aux axes de facile aimantation du cristal demande une dépense d'énergie. Cette énergie, liée à ces axes, porte le nom d'énergie d'anisotropie. Les directions de facile aimantation sont les directions dans lesquelles cette énergie  $w_{an}$  est minimale.

**III-3-1-5-2 : Energie magnétostatique  $w_{ms}$  :**

Elle 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.

**III-3-1-5-3 : Energie d'échange  $w_{ec}$  :**

On appelle énergie d'échange, l'énergie résultant de l'interaction des moments magnétiques, elle dépend de la distance séparant ces moments ainsi que de leurs orientations relatives. Cette énergie passe par un minimum lorsque ces moments sont parallèles.

**III-3-1-5-4 : Energie magnétostrictive  $w_{mt}$  :**

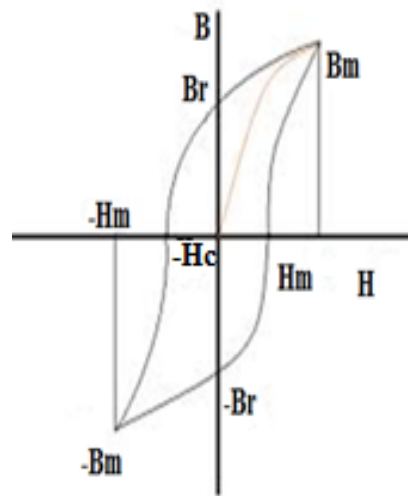
On appelle énergie magnétostrictive, l'énergie élastique associée aux déformations et aux contraintes que les domaines exercent les uns sur les autres. Le cristal peut s'allonger ou se contracter selon la direction de la polarisation par rapport à la déformation.

**III-3-1-6 : L'hystérésis :**

L'aimantation d'un matériau ferromagnétique soumis à un champ dont l'intensité varie entre deux limites se traduit par la courbe suivante :

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

- $B_r$  : induction rémanente, c'est-à-dire l'induction restante dans le matériau lorsque le champ est nul ( $H=0 \text{ A. m}^{-1}$ ).
- $H_c$  : champ coercitif, c'est-à-dire le champ qu'il faut produire pour annuler l'induction magnétique rémanente dans le matériau ferromagnétique.



**Figure. III.5 :** Cycle d'hystérésis.

### III-3-1-7 : Les pertes magnétiques :

Toute variation de l'induction dans un matériau magnétique implique une dissipation d'énergie à l'intérieur de celui-ci. Cette énergie apparaît le plus souvent sous forme de chaleur non récupérable d'où l'expression de pertes magnétique pour désigner le phénomène. Les pertes magnétiques peuvent être divisées en trois parties :

#### III-3-1-7-1 : les pertes par hystérésis :

Lorsqu'un milieu ferromagnétique subit des cycles répétés, on observe un échauffement de ce milieu. Sous l'action de l'excitation ayant tantôt un sens tantôt un sens contraire, l'orientation des moments magnétiques entraîne un phénomène semblable à celui des frottements mécaniques, ces frottements au sein de la substance provoquent un dégagement de chaleur, et ce sont eux qui retardent les variations de l'induction  $B$  par rapport aux variations de champ magnétique  $H$ . L'existence d'une induction rémanente et d'un champ coercitif expliquent le phénomène d'hystérésis.

Dans les machines électriques, l'énergie transformée en chaleur par hystérésis est une énergie perdue, on parle de pertes par hystérésis. Pour rendre ces pertes aussi faibles que possible, la solution est d'utiliser des matériaux présentant, pour une valeur donnée de l'induction maximale  $B_{\max}$ , un cycle de surface relativement faible. Ces matériaux sont dits matériaux doux.

Les pertes par hystérésis correspondent au travail nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis magnétique.

$$w_h = \oint_c H \cdot dB$$

### III-3-1-7-2 : Les pertes par courants de Foucault ou courants induits :

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

### III-3-1-7-3 : Les pertes supplémentaires (ou additionnelles) :

Les pertes supplémentaires peuvent être considérées comme étant la somme de deux grandeurs :

- Les pertes résiduelles ou anormales dues au fait que l'induction magnétique  $B$  n'est pas sinusoïdale.
- Les pertes par trainage ou retard au processus d'aimantation, dues au retard de l'induction magnétique  $B$  par rapport au champ magnétique  $H$  à l'aimantation.

### III-3-2 : L'alliage fer-silicium :

En électrotechnique, les alliages magnétiques sont divisés en deux grandes catégories : Les matériaux magnétiques durs et les matériaux magnétiques doux.

Les matériaux magnétiques durs sont ceux possédant une énergie d'anisotropie magnéto cristalline élevée comparée à celle des autres matériaux définis comme doux. Les matériaux durs présentent un cycle d'hystérésis très large ce qui se traduit par une induction rémanente et un champ coercitif importants. Cette catégorie de matériaux trouve ses applications dans la fabrication des aimants permanents où l'on peut citer comme exemples : Les alnico (alliage d'aluminium, de nickel et de cobalt), l'alliage SmCo (samarium-cobalt) ou les NdFeB (neodyme-fer-bore).

Par opposition à cette catégorie d'alliages, on désigne les matériaux à cycle d'hystérésis étroit par le terme de matériaux magnétiques doux. C'est le cas du fer dont le champ coercitif est de quelques ampères par mètre tandis que l'induction rémanente dépasse le tesla.

Les matériaux magnétiques doux trouvent leurs applications en régime alternatif, c'est-à-dire dans les moteurs, générateurs et transformateurs.

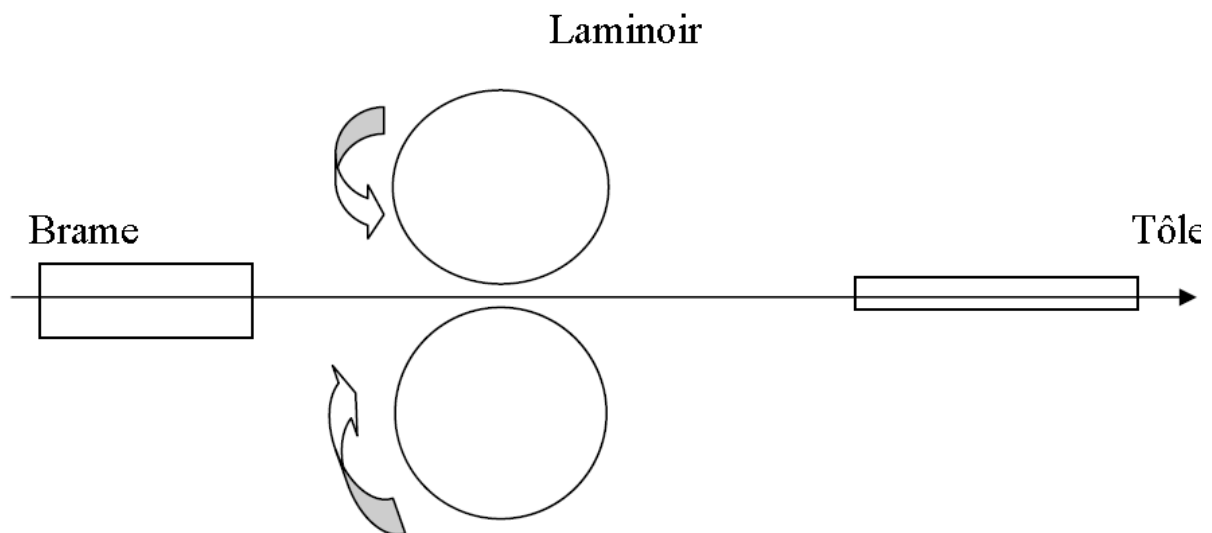
### III-3-2-1 : Caractéristique de l'alliage fer-silicium

C'est l'alliage le plus largement utilisé dans la construction électrique. Son intérêt réside dans le fait qu'il présente une perméabilité magnétique élevée et un champ coercitif faible ce qui conduit à des pertes par hystérésis très réduites. En outre la résistivité électrique de l'alliage est bien supérieure à celle du fer ce qui entraîne une réduction des pertes par courant de Foucault.

L'alliage fer-silicium est le matériau le plus indiqué pour tous les circuits excités en courant alternatif allant des basses fréquences jusqu'à des centaines voire des milliers de hertz.

### III-3-2-2: Définition du laminage : [11]

Lors du laminage, le métal est engagé entre deux cylindres tournant en sens inverses, qui engendrent une déformation plastique par des contraintes principales de compression, cela va engendrer à son tour une réduction d'épaisseur, au cours de ce procédé se développe le phénomène d'écroutissage au fil duquel, la densité de dislocation et leur enchevêtrement deviennent de plus en plus élevés, il faut appliquer une contrainte sans cesse croissante pour poursuivre la déformation plastique, tout cet ensemble va engendrer le durcissement par écroutissage, qui se manifeste par l'augmentation de la limite d'élasticité du matériau, à la suite d'une pré déformation, diminution de la ductilité. On distingue deux types de laminage : laminage à chaud et laminage à froid.



**Figure. III.5 :** Principe du laminage.

- **Laminage à chaud: [10]**

Le laminage à chaud est une opération capitale pour les matériaux et alliage, car c'est au cours de cette étape que les précipités se déforment plus facilement, les brames ou les

blooms sont réchauffés dans un four de réchauffage, laminage est effectué à l'état austénitique particulièrement malléable. Le dégrossissage a lieu entre 1100°C à 1200°C et la finition peut se faire à des températures allant jusqu'à 800°C.

- **laminage à froid : [10]**

La moitié environ des produits laminés est commercialisée à l'état laminé à chaud. Les produits minces sont obtenus par laminage à froid des produits laminés à chaud. Le laminage à froid augmente la dureté et la limite d'élasticité, améliore l'état de surface, mais réduit la formabilité, il introduit des textures d'orientation cristalline de déformation plane. Si le produit doit subir des déformations ultérieures importantes, un recuit est nécessaire pour restaurer la formabilité.

### **III-3-2-3: Le recuit :**

Globalement, un recuit comporte un chauffage et un maintien à une température telle que l'acier soit partiellement ou totalement porté à l'état austénitique, dite température de recuit, suivi d'un refroidissement généralement lent.

### **III-3-2-4 : Effets des impuretés sur les propriétés magnétiques :**

La présence des impuretés abaisse la polarisation et dégrade la perméabilité. De plus, le fer pur n'est pas malléable d'où la difficulté de laminage. La solubilité de la plupart des éléments d'impuretés dans le fer est généralement faible, ce qui provoque l'apparition d'inclusion diverses sous forme de carbures, de nitrures, d'oxydes de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\text{FeO}$ ). Ces inclusions freinent le mouvement de déplacement des parois de Bloch, ce qui se traduit par une augmentation des pertes par hystérésis et des échauffements du matériau. Enfin, la précipitation des nitrures provoque également une baisse lente de la perméabilité appelée : vieillissement magnétique.

### **III-3-2-5 : Rôles de l'addition du silicium dans le fer :**

- Entraîne un durcissement de l'alliage ;
- Diminution sensible de l'anisotropie magnéto cristalline du fer ;
- Favorise la conductibilité thermique de l'alliage qui conditionne l'évacuation des pertes.

**III-3-2-6 : Le vieillissement magnétique:**

Les performances magnétiques d'un matériau, au bout de 10, 20 ou 30 années de fonctionnement ne sont plus celles qu'il possédait lors de son élaboration en métallurgie. Le temps influe 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 des alternances d'aimantation et de désaimantation.

**III-3-2-7 : Les tôles fer-silicium (Fe-Si) à grains non orientés (NO) :**

Elles sont utilisées pour la construction des moteurs et générateurs soumis à l'action d'un champ tournant.

Il existe un large éventail de qualités qui diffèrent par :

- Les épaisseurs qui varient de 0,35 à 0,63mm.
- Le pourcentage de silicium variant de 0,5 à 3% avec quelque fois un taux d'aluminium voisin de 0,30%.

Ces tôles sont utilisées pour la construction de tous les circuits magnétiques feuilletés, fonctionnant en régime d'induction variable. On le trouve dans tous les moteurs, des petits moteurs d'essuie- glace, ou d'électroménager aux plus gros alternateurs hydrauliques, dans les relais, les ballasts pour l'éclairage fluorescent.

Deux types de tôles sont distingués :

- Les tôles recuites, ayant reçu un revêtement final isolant, dites « Fully-process ».
- Les tôles non terminées, livrées aux constructeurs électriciens à un état intermédiaire semi-fini dites « semi-process ».

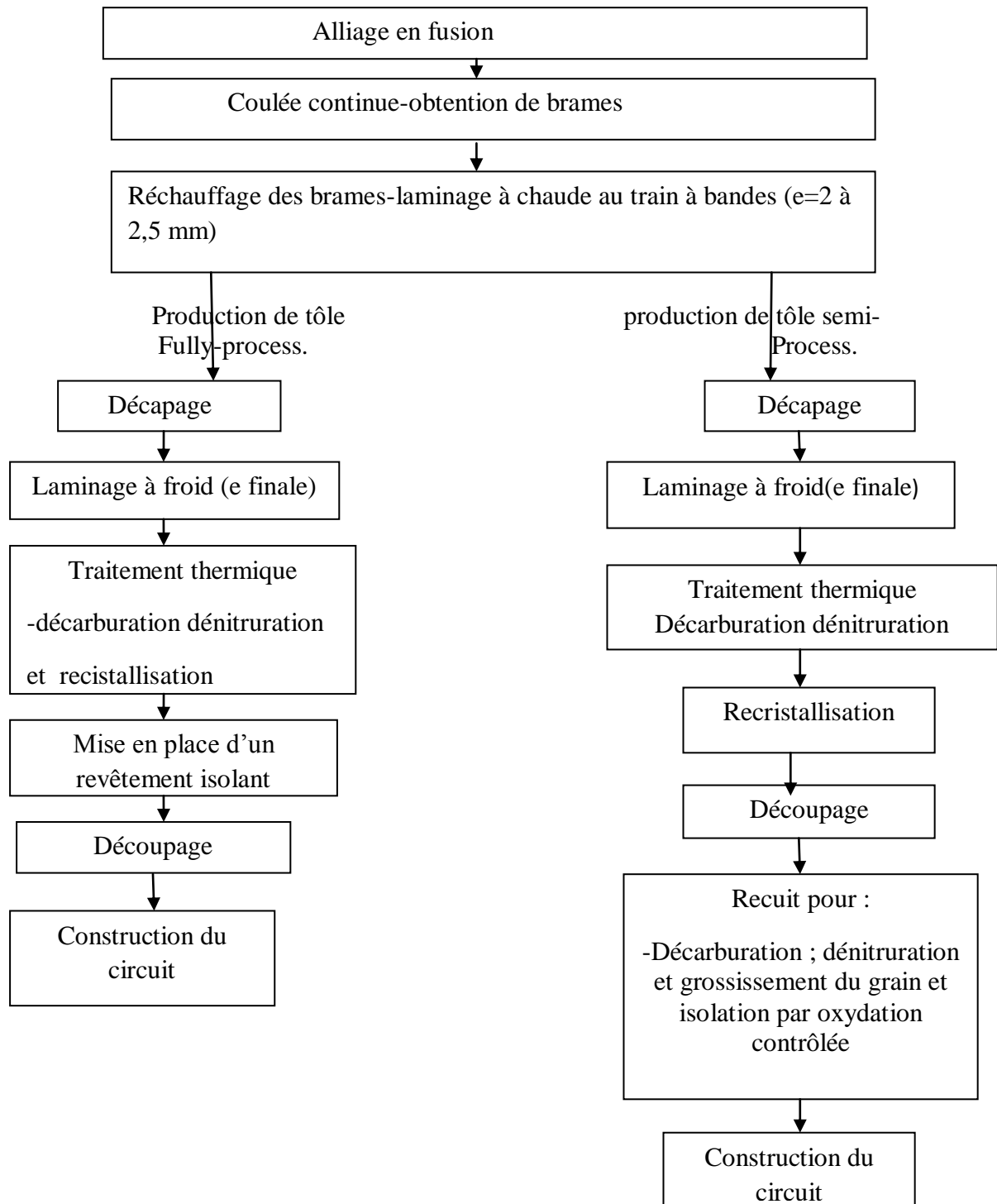
**III-3-2-7-1: Principe de fabrication de tôle à grains non orientés :**

Il faut distinguer deux étapes dans cette fabrication. La première comprend

- L'élaboration de l'acier,
- La coulée continue en brame,
- Le laminage à chaud jusqu'à une épaisseur voisine de 2 mm.

Elle s'effectue sur des équipements lourds, qui travaillent non seulement à l'obtention de tous les types de tôles magnétiques, mais aussi par exemple à l'obtention de tôles pour la carrosserie automobile.

Le principe de fabrication des tôles fer-silicium à grains non orientés est représenté sur le diagramme III.1



**Diagramme III-1** : Principe de fabrication des tôles magnétiques à grains non orientés selon les deux technologies en usage.

- **Produit fini :**

On appelle produit fini ou tôle livrée après recuit final (Fully-process), un matériau qui possède toutes ses caractéristiques magnétiques à l'état de livraison par le sidérurgiste. Il n'est donc pas nécessaire de faire un traitement thermique après découpage chez l'utilisateur.

- **Produits semi-finis :**

On appelle produit semi-fini ou tôle livrée à l'état semi-fini (semi-process), une tôle qui ne possède pas encore ses propriétés magnétique garanties à l'état de livraison par le sidérurgiste. Après découpage, elle doit subir un traitement thermique.

### **III-3-2-7-2 : Les caractéristiques magnétiques normalisées de tôles (NO) :**

Pour chaque épaisseur, la classification des tôles disponibles sur le marché est assurée à partir de leurs pertes spécifiques, mesurées pour une polarisation sinusoïdale d'amplitude 1.5T, à 50Hz cette pratique correspond plus à une convention qu'à une nécessité technique en particulier dans le cas des qualités les plus courantes qu'on utilise pour construire les petites moteurs. Il importe alors davantage d'obtenir une induction importante dans un champ d'excitation de  $5000 \text{ A.m}^{-1}$  que d'avoir des pertes très réduites

Le tableau III-2 indique les caractéristiques magnétiques de quelques tôles non orientées.

	Epaisseur nominale (mm)	Pertes spécifiques maximales (W/Kg pour $\hat{B} = 1,5T$ )	Induction minimale (T) pour un champ $\hat{H}$ (A/M).			Utilisation normalisée
			2500	5000	10000	
Qualités	0,35	2,50	1,49	1,60	1,71	Grosses machines tournantes
	0,50	2,70	1,49	1,60	1,71	Grosses machines tournantes
Fully-process	0,50	4,70	1,52	1,62	1,73	Moteur de moyenne puissance
	0,65	6,00	1,54	1,64	1,75	Petits moteurs Relais appareillage domestique
	0,65	8,00	1,58	1,68	1,76	
Qualités	0,50	3,90	1,54	1,64	1,75	Moteurs de moyennes puissances
Semi-process	0,65	5,20	1,55	1,65	1,76	Petits moteurs
	0,65	10,00	1,58	1,68	1,79	Relais appareillage Domestique

**Tableau III-2** : caractéristiques magnétiques normalisées de tôles (NO).

### III-3-2-7-3 : Isolation des tôles à grain non orientés : [12]

L'isolation de ces tôles s'effectue dans un four à haute température et sous atmosphère protectrice avec l'oxyde de fer ( $Fe_2 O_3$ ).

### III-3-2-7-4 : Utilisation :

Les tôles NO sont disponibles sous deux formes nommées « Fully-process » et « semi process », selon que le matériau a déjà ses caractéristiques magnétiques optimales ou ne les obtiendra qu'après un traitement thermique final effectué par l'utilisateur. On emploie les tôles « Fully-process » dans trois grandes catégories d'appareillages :

- Les machines tournantes (moteur, dynamos, alternateur) qui constituent l'utilisation principale ;
- Les transformateurs de faible puissance ;
- Certains dispositifs comme les contacteurs ou compteurs électriques, où l'on met à profit leurs caractéristiques quasi-statiques. L'électroménager et l'automobile (moteurs, transformateurs, alternateurs) sont des domaines privilégiés d'utilisation des tôles « semi-process ». On emploie également celles-ci dans les machines tournantes de puissance inférieure à une vingtaine de KW.

**Conclusion :**

Dans ce troisième chapitre de nombreux paramètres sont définis dans le but de nous familiariser avec les différents matériaux électrotechniques et de faire apparaître le processus d'élaboration de l'acier, de l'état de minerai jusqu'à ce qu'il devient un tôle finie.

Dans le chapitre suivant nous traiterons les différents essais pour chaque matériau électrotechnique.

**Introduction :**

Dans ce chapitre nous nous intéresserons aux procédés de contrôle et des dispositifs utilisés dans les essais.

Ces contrôles sont effectués au niveau de l'ELCTRO-INDUSTRIE d'AZAZGA, ils sont toujours conformes aux normes internationales attribuées par la commission internationale d'électrotechnique (CEI).

Ces différents contrôles ont pour but de garantir la qualité des matériaux électrotechniques qui sont utilisés dans la construction des moteurs asynchrones au sein de l'entreprise (EI).

**IV-1 Processus de contrôle de fil de cuivre émaillé :**

L'exploitation des normes internationale (CEI), pour un fil du cuivre émaillé, les définitions suivantes s'appliquent : [13]

- **Couche adhérente** : matériau déposé sur un fil émaillé et qui a la fonction particulière de coller les fils entre eux.
- **Classe** : Performance thermique d'un fil de bobinage exprimée par l'indice de température de choc thermique.
- **Revêtement** : Matériau qui est déposé sur un conducteur ou sur un fil par des moyens approprié, puis séché ou cuit.
- **Conducteur** : Métal nu après enlèvement de l'isolant.
- **Craquelure** : fente dans l'isolant qui rend visible le conducteur sous un grossissement donné.
- **Double revêtement** : Isolant constitué de deux matériaux différents, l'une sous-couche et l'autre en surcouche.
- **Fil émaillé** : Fil revêtu d'un isolant d'une résine cuite.
- **Grade** : Gamme d'épaisseur d'isolant d'un fil.
- **Isolant** : Revêtement ou enveloppe sur le conducteur qui a pour fonction particulière de supporté la tension électrique.
- **Dimension nominale du conducteur** : désignation de la taille du conducteur selon la CEI 60317.

- **Fil de bobinage** : Fil utilisé pour fabriquer un bobinage qui fournit un champ magnétique.
- **Fil** : Conducteur revêtu ou enveloppé d'un isolant.

Le fil de cuivre émaillé est reçu sous forme de bobines représentées sur la Figure IV.1.

Le fil à contrôler a les caractéristiques suivantes :

- L'isolant est de grade 2, et de classe H.
- Le conducteur est de diamètre de 0,56mm.



**Figure .IV.1:** Bobine d'un fil du cuivre vernis.

Ce matériau sera soumis aux essais suivants :

#### **IV-1-1- Contrôle au niveau de la réception marchandise :**

##### **IV-1-1-1- Contrôle documentaire :**

Le contrôle documentaire se fait à l'aide des documents de commande et de livraison, et l'exploitation des normes suivantes : AZ-EN 551.1FASC 1, 2,3 et 4, AZ-SN 54223, qui nous renvoie à d'autres normes telles que la DIN 46383 à la 46453 ou la CEI 624 éditée entre 1984 et 1990

L'exploitation des normes nous fait découvrir les erreurs de conformité de la matière et des conditions de livraison.

**IV-1-1-2 Contrôle visuel :****➤ Contrôle des surfaces de couche de bobine :**

On retire éventuellement le boîtier du conteneur pour pouvoir contrôler l'état de fil (absence de corrosion, absence de coupe ayant occasionné une dégradation de fil ou de la bobine).

**➤ Contrôle de bord de bobine :**

Les bords de bobines doivent être exempts de toutes bavures et cassures, elles doivent être lisses afin d'éviter d'endommager le fil lors de son déroulement.

**IV-1-1-3- Contrôle dimensionnel :****➤ Contrôle du diamètre du fil vernis :**

Il se mesure à l'aide d'un micromètre à vis extérieur et la valeur mesurée doit être notée. La valeur mesurée est 0.564 mm. La valeur est conforme à la norme NF EN 60317-0-1.

**IV-1-1-4-Force d'adhérence du vernis sur le cuivre :**

L'essai de traction brusque est effectué sur les fils de diamètres nominaux inférieur ou égal à 1.0 mm. Dans cet essai le fil ne doit présenter aucune craquelure ou découlement

**IV-1-1-5- Nombre de défauts :**

On utilise un dispositif qui contrôle la continuité de l'isolant appelé <<Appareil pour essai de continuité de revêtement sous basse tension>>.

**❖ Méthode d'essai :**

On introduit le fil dans la solution électrolyte qu'on déroule à une vitesse donnée.

L'électrolyte est traversé par un courant électrique (courant continu sous basse tension). Le fil est enroulé sur un tambour d'enroulement connecté à un appareil de détection de défaut de continuité de l'isolant (l'appareil détecte des pertes de courant qui traverse le revêtement du fil).

Les résultats obtenus sont : 3 défauts pour 30 m de fil.

Le résultat est conforme à la norme NF EN 603176061.



**Figure .IV.2:** Appareil pour détecter le nombre de défauts.

#### **IV-1-1-6 : Tension de claquage méthode rouleau :**

On utilise un appareil qui est présenté sur la figure IV.3.

Cet essai consiste à enrouler le fil sur les cylindres avec une force donnée (suivant le diamètre du fil) puis mettre le fil en contact avec les cylindres l'un après l'autre puis on envoie le courant d'alimentation.

Les cylindres constituent les éprouvettes.

Au moins quatre des cinq éprouvettes ne doivent pas subir de claquage à des tensions inférieures ou égales à celles données dans la norme NF EN 60317-0-1.

Les résultats obtenus sont : sur 5 éprouvettes, la tension de claquage est supérieure à 5Kv.

Les résultats sont conformes à la norme NF EN 60317-0-1.



**Figure .IV.3:** Appareil pour essai de tension de claquage.

**IV-1-2 : Contrôle au niveau de laboratoire :**

- Les essais suivants sont effectués à la température ambiante de 20 °C.
- Les échantillons doivent être pré conditionnés sous les conditions atmosphériques, pendant un temps suffisant pour permettre aux matériaux d'atteindre la stabilité.

**IV-1-2-1 : Diamètre du fil sans vernis :**

La mesure de diamètre du fil sans vernis s'effectue à l'aide d'un « Micromètre à vis extérieure » figure IV.4, le fil doit être dénudé à une seule extrémité.

Le résultat obtenu est 0.559 mm, ce résultat est conforme à la norme

NF EN 60317-0-1.



**Figure .IV.4:** Micromètre à vis extérieure.

**IV-1-2-2 : Résistance ohmique :**

La résistance ohmique est mesurée à l'aide d'un « ohmètre »

Trois échantillons de 1,20 m doivent être dénudés aux extrémités pour les mettre en contact avec les bornes de fixation de l'ohmètre.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Valeurs mesurées ( $\Omega/m$ )	Valeurs moyenne ( $\Omega/m$ )
0,0704	0,0703
0,0703	
0,0703	

**Tableau IV.1 :** Résultats de mesure de la résistance ohmique.

La valeur moyenne est considérée comme étant une résistance ohmique du fil, et le résultat est conforme à la norme NF EN 60317-0-1.



**Figure .IV.5:** Ohmètre.

#### **IV-1-2-3 : Tension de claquage méthode TWIST :**

Cinq éprouvettes de longueurs droites 400 mm environ, doivent être torsadées sur elles-mêmes à l'aide d'un dispositif appelé « appareil pour torsader », qui représenté sur la figure IV.6.

La charge et le nombre de tours appliquées à la torsade sont respectivement 7 N et 12 torsades, chaque éprouvette doit être dénudée aux extrémités, coupée en deux points de façon à fournir la distance maximale entre les extrémités coupées de la partie torsadée.

La tension d'essai (tension alternative de 15kV de fréquence 50 Hz ou 60Hz) doit être appliquée aux extrémités dénudées, à partir de zéro et augmentée à une vitesse uniforme de 500V/s.

Les cinq valeurs individuelles doivent être notées, elles sont représentées dans le tableau suivant :

<b>Tension de claquage mesuré (kV)</b>	<b>Tension minimale de claquage efficace normalisé (kV)</b>
10,4	4,6
9,5	
9,7	
11,0	
8,9	

**Tableau IV.2 : Résultat de mesure de la tension de claquage**

Les résultats sont conformes à la norme NF EN 60317-0-1.



**Figure .IV.6:** Appareil pour torsader.



**Figure .IV.7:** Eprouvettes pour essai claquage.

L'essai de tension de claquage est effectué à l'aide d'un appareil appelé « appareil de test diélectrique », de haute tension AC/DC (15kV-100 mA AC/ 21kV), représenté sur la figure IV.8.



**Figure .IV.8:** Appareil pour teste diélectrique.

**IV-1-2-4 : Allongement minimal à la rupture :**

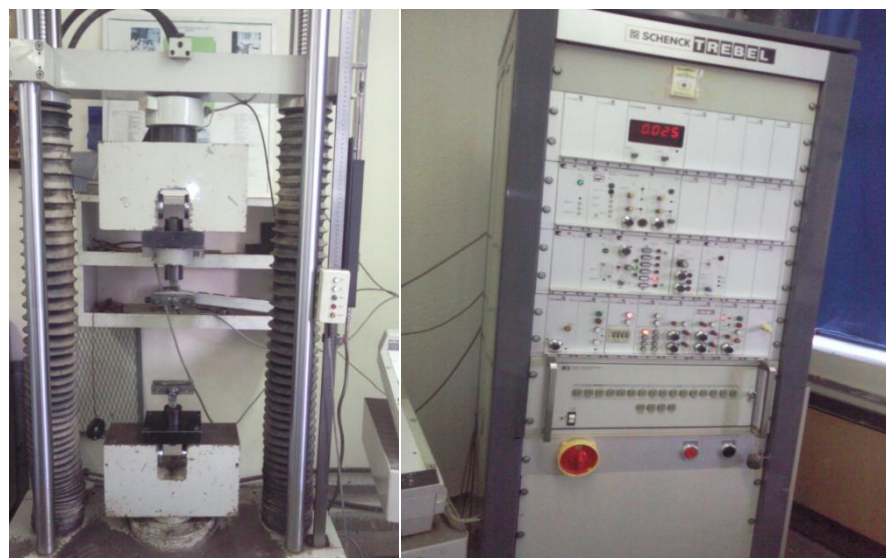
Trois éprouvettes de longueur droite doivent être allongées jusqu' à la rupture à l'aide d'un appareil appelé <<appareil de traction universelle >>, représentée sur la figure IV.9.

Cet appareil réalise la mesure sur une longueur libre comprise entre 200 mm et 500 mm. Les trois valeurs individuelles doivent être notées.

La valeur moyenne des valeurs individuelles est considérée comme l'allongement à la rupture.

L'allongement à la rupture est de 28%

Le résultat est conforme à la norme NF EN 60317-0-1.



**Figure. IV.9 :** Appareil de traction.

**IV-1-2-5 : Résistance à la traction :**

La résistance à la traction est le rapport entre la force appliquée au moment de la rupture et la section initiale.

$$R = \frac{F}{S}$$

S : section initiale du fil.

La moyenne des trois rapports est considérée comme la résistance à la traction, le résultat est de  $248,5\text{N/mm}^2$ .

#### **IV-1-2-6 : Effet ressort :**

Cet essai est effectué à l'aide d'un appareil pour essai de l'effet ressort qui est représenté sur la Figure IV.10.

Une longueur de fil droite doit être enroulée sur un mandrin de 25mm pour former cinq spires.

La mesure de l'effet ressort est indiquée par l'angle de retour en arrière de l'extrémité des cinq spires.

Le résultat est de  $42^\circ$ . Le résultat est conforme à la norme NF EN 60317-7-1.



**Figure .IV.10 :** Appareil pour essai de l'effet ressort

#### **IV-1-2-7 : Choc thermique :**

Trois éprouvettes de longueur droite doivent être enroulées de façon à former 10 spires jointives sur un mandrin métallique bien poli dont le diamètre de 1,250mm.

Après enroulement, les éprouvettes doivent être soumises à une température de  $200^\circ\text{C}$  dans un four pendant 30 minutes, puis en laisse se refroidissent pendant 15 minutes.

La vérification de l'état du vernis se fait à l'aide d'un microscope optique qui est représenté sur la figure IV.14.



**Figure .IV.11** : four électrique



**Figure. IV.12** : Epreuve pour essai de choc thermique

#### **IV-1-2-8 : Souplesse et adhérence :**

Trois éprouvettes doivent être enroulées sur leur diamètre, de façon à former 10 spires jointives.

La vérification de l'état du vernis se fait à l'aide d'un microscope optique. Les échantillons n'ont présentées de craquelures conformément à la norme NF EN 60317-0-1.



**Figure .IV.13 :** Eprouvettes pour essai de souplesse et adhérence.



**Figure –IV-14 :** Microscope optique

#### **IV-2- Processus de contrôle du papier isolant :**

Le matériau est fourni sous forme de rouleau. Les échantillons sur lesquels on effectue les essais ont les caractéristiques suivantes :

- Papier utilisé pour isolation d'encoches (caniveau d'encoches) ;
- Matériau : isolation combinée souple de type triplex composé d'une couche de film de polyterephalate d'éthylène et deux couche de papier calandré contrecollées sur le film central ;
- Classe thermique H ;
- Epaisseur du papier 0.20 mm ;
- Epaisseur du film 36 $\mu$ m.

#### **IV-2-1 : Contrôle au niveau de la réception marchandise :**

Suivant un plan de contrôle la caractéristique suivante a contrôlée

**IV-2-1-1 : contrôle d'épaisseur :**

Elle est mesurée avec un instrument appelé << pied à coulisse >>



**Figure IV.15 :** pied à coulisse.

**IV-2-2 : contrôle au niveau de laboratoire :**

Les éprouvettes doivent être conditionnées après découpage à température  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  et sous  $(50 \pm 5)\%$  d'humidité pendant 24 h minimum.

**IV-2-2-1 : Epaisseur nominale du papier isolant :****➤ Appareillage :**

L'épaisseur du papier isolant se mesure avec un micromètre à vis extérieur de type à cadran voir figure IV-4, possédant deux surfaces circulaires concentriques planes rectifiées et rodées. La surface supérieure doit avoir 6 à 8 mm de diamètre, la surface inférieure doit se déplacer selon un axe perpendiculaire aux surfaces. Le cadran doit être gradué pour permettre une lecture directe. La pression exercée sur l'éprouvette doit être de 100 kPa.

**➤ Eprouvettes :**

Une éprouvette de 25 mm de largeur et dont la longueur est égale à la largeur du rouleau.

**➤ mode opératoire :**

Mesurer l'épaisseur du papier, celui-ci n'étant soumis à aucune contrainte, en neuf points écartés d'au moins 75 mm dans le sens de la longueur des éprouvettes.

La valeur des neuf mesures et la valeur médiane de l'épaisseur du papier isolant sont données dans le tableau IV-3.

La valeur des neuf mesures (mm)	La valeur médiane de l'épaisseur du papier (mm)
0,529	0,529
0,535	
0,531	
0,531	
0,530	
0,525	
0,527	
0,521	
0,528	

**Tableau IV-3:** Résultats de mesures.

Le résultat de l'épaisseur nominale du papier est conforme à la norme CEI 626-3/100 qui fixe la valeur maximale à  $0,600 \text{ mm} \pm 10\%$ .

#### **IV-2-2-2 : Résistance à la traction et allongement :**

Cinq éprouvettes sont utilisées, leurs longueurs doivent permettre un écart de 200mm entre les mâchoires de l'appareil d'essai (machine de traction utilisée pour les essais mécanique Figure IV-9). La largeur doit être de 15mm et on doit découper cinq éprouvettes dans le sens de laminage et cinq autres dans le sens perpendiculaire au premier.

On fixe l'éprouvette dans l'appareil d'essai et on applique une charge. Au moment où la charge correspondante à la résistance à la traction minimale spécifiée est atteinte, soit après  $(60 \pm 10) \text{ s}$  ; on continue d'augmenter la charge jusqu' à ce que l'un des composants de l'éprouvette se rompt.

Si l'éprouvette se rompt au niveau des mâchoires de la machine d'essai, il n'est pas tenu compte du résultat alors il faut procéder à un autre essai sur une autre éprouvette, conformément aux recommandations de la norme CEI 60 626-2.

Les résultats obtenus sont notés dans les tableaux suivants :

## ❖ Sens longitudinal :

Eprouvettes	Résistance à la traction minimale normalisée (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la traction mesurée (N/mm <sup>2</sup> )	Allongement (%)	Allongement minimal normalise (%)
1	160	196,6	39,7	15
2		211,3	56,5	
3		196,0	27,7	
4		200,0	29,0	
5		205,0	34,3	

Tableau -IV-4: Résultats de mesures

## ❖ Sens transversale :

Eprouvettes	Résistance à la traction minimale normalise (N/mm)	Résistance à la traction mesurée (N/mm)	Allongement (%)	Allongement minimal normalisé (%)
1	100	200,0	73	20
2		202,6	55	
3		196,6	49,5	
4		193,6	67,3	
5		190,0	69,5	

Tableau -IV- 5 : Résultats de mesures

## IV-2-2-3 : Tension de claquage :

## ➤ Conditions d'essai :

Pour les papiers isolants, on utilise des électrodes de 25/75 mm conformément à la norme CEI 60 243-1.

Les faces des électrodes doivent être parallèles et ne contiennent pas de piqûre ou autres défauts.

➤ **Eprouvettes et nombre d'essais :**

Les éprouvettes doivent mesurées au moins 250 sur 250 mm toujours de dimensions suffisantes afin de s'adapter à la disposition des électrodes et permettre

d'éviter les contournements .L' éprouvette est soumise aux essais non pliés. Sur une même éprouvette, cinq essais sont effectués au long du pli longitudinal et cinq autres au long du pli transversal, puis cinq essais sur la partie non pliée.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai après conditionnement à l'aide d'une génératrice auto-tension pour la tension de claquage. Si la masse de l'électrode de 25 mm ne suffit pas à aplatir l'éprouvette pliée, une pression supplémentaire doit être appliquée.

La valeur médiane doit être considérée comme étant le résultat. Celui-ci doit être consigné en (kV).

Les résultats de l'essai sont notés dans les tableaux suivants :

❖ **Essai non plié :**

Tension de claquage minimale normalisée (kV)	Tension de claquage mesurée (kV)	
<b>7</b>	$U_1 = 14,7$	$U_{med} = 14,0$
	$U_2 = 14,1$	
	$U_3 = 13,5$	
	$U_4 = 14,0$	
	$U_5 = 13,6$	

**Tableau –IV-6 :** Résultats de mesure de la tension de claquage

$U_{med}$  : la tension médiane

❖ **Essai plié :**

Tension de claquage minimale normalisée (kV)	Tension de claquage mesurée (kV)	
7	$U_1 = 14,5$	$U_{med} = 13,4$
	$U_2 = 12,4$	
	$U_3 = 12,9$	
	$U_4 = 13,4$	
	$U_5 = 14,2$	

**Tableau –IV-7:** Résultats de mesure de la tension de claquage

$U_{med}$  : la tension médiane.

Selon la norme CEI 60 626-3, la valeur médiane des tensions doit être supérieur à 7 kV, ce qui implique que le papier est conforme à cette norme.

**IV-2-2-4 : Epaisseur nominale du film en  $\mu_m$  :**

Procédé de séparation du film avec le papier ou le carton.

On prend un ruban de 1m de longueur que l'on découpe en petites éprouvettes de 75mm et que l'on enferme à l'intérieur d'une boîte (boîte pétrie). On y ajoute de l'Acetone pour permettre la séparation de la matière isolante du film. La séparation se produit au bout de 2 à 3 secondes.

**Mode opératoire :**

Mesurer l'épaisseur du film à l'aide d'une micromètre à vis extérieure (voir la figure IV-4), on prend sept points écartés d'au moins 75mm dans le sens de la longueur des éprouvettes.

Les valeurs des sept mesures et la valeur moyenne de l'épaisseur du film sont données dans le tableau IV-8.

Les valeurs des sept mesures ( $\mu m$ )	La valeur moyenne de l'épaisseur du film ( $\mu m$ )
0,036	0,369
0,039	
0,035	
0,038	
0,037	
0,038	
0,036	

**Tableau IV-8:** Résultats de mesures

La valeur moyenne obtenue ( $0,369\mu m$ ) et conforme à la norme CEI 626-2.

### IV-3 : Processus de contrôle des matériaux magnétiques :

#### IV-3-1 : Modes de livraison :

- ✚ Le produit est livré en bobines.
- ✚ La valeur recommandée pour le diamètre intérieur des bobines est approximativement 500 mm.
- ✚ La bande doit être de largeur constante et son enroulement doit être réalisé de façon telle que les bords soient régulièrement superposés et que les faces latérales de la bobine soient sensiblement planes.
- ✚ Les bobines doivent être suffisamment serrées à l'enroulement pour qu'elles ne s'affaissent pas sur leur propre masse.
- ✚ Les bandes peuvent présenter occasionnellement des soudures ou des discontinuités résultant de l'élimination de zones défectueuses.
- ✚ Pour les bobines présentant des cordons de soudure ou les discontinuités, chaque partie de bande doit appartenir à la même nuance.
- ✚ Les rives des parties soudées l'une à l'autre ne doivent pas être décalées l'une par rapport à l'autre dans une proportion telle que la mise en oeuvre en soit compromise.



**Figure –IV- 16:** Bobines de tôles magnétiques à l'état de livraison

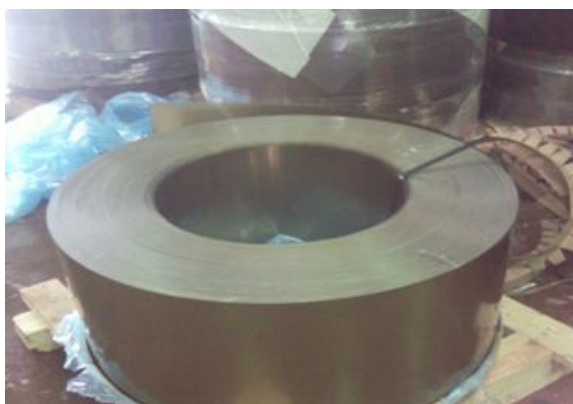
Dans notre projet le contrôle s'effectuera sur la tôle M530-50A

**M** : pour acier magnétique.

**530** : centuple des pertes totales spécifiques maximales à 1,5 T.

**50** : centuple de l'épaisseur nominale du produit en mm.

**A** : pour les tôles magnétiques à grains non orientés livrées à l'état fini.



**Figure -IV-17 :** Tôles à grains non orientés livrées à l'état fini (M530-50A)

#### **IV-3-2 : Contrôle au niveau de la réception marchandise :**

La marchandise réceptionnée est contrôlée selon le procédé suivant :

##### **IV-3-2-1 : Différence d'épaisseur :**

Elle est mesurée à l'aide d'un « micromètre à vis extérieure » voire la figure IV-4.

La différence d'épaisseur à l'intérieur d'une longueur de bande dans une direction parallèle au sens du laminage ne doit pas dépasser 8% de la valeur nominale pour les épaisseurs de 0,35mm et 0,50 mm, et ne doit pas dépasser 0,020 mm (CEI -10106) dans une direction perpendiculaire au sens du laminage.

#### IV-3-2-2-Différence de largeur :

Elle est mesurée avec un instrument appelé « pied à coulisse » voir la figure IV.15.

Les largeurs nominales courantes sont inférieures ou égales à 1250 mm.

Pour les produits livrés avec rives cisailées, les tolérances du tableau suivant doivent être appliquées.

Largeur nominale l (mm)	Tolérance (mm)
$l \leq 150$	0 +0.2
$150 \leq l \leq 300$	0 +0.3
$300 \leq l \leq 600$	0 +0.5
$600 \leq l \leq 1000$	0 + 1.0
$1000 \leq l \leq 1250$	0 +1.5

**Tableau IV-9 :** Tolérance sur largeur minimale

#### IV-3-2-3 : Ondulation (planéité) :

Elle est mesurée avec un « instrument gradué en micromètre » .

La planéité n'est garantie que pour les produits livrés avec des rives cisailées.

Le facteur d'ondulation exprimé en pourcentage, ne doit pas dépasser 2 %. Selon la norme NF NE 10251.

Les ondulations complètes doivent être prises en considération, mais pas la courbure résiduelle.



**Figure .IV.18.** Instrument gradué en ( $\mu\text{m}$ )

### **IV-3-3: Contrôle au niveau de laboratoire :**

Avant le contrôle au niveau du laboratoire on découpe la tôle magnétique en plusieurs échantillons.

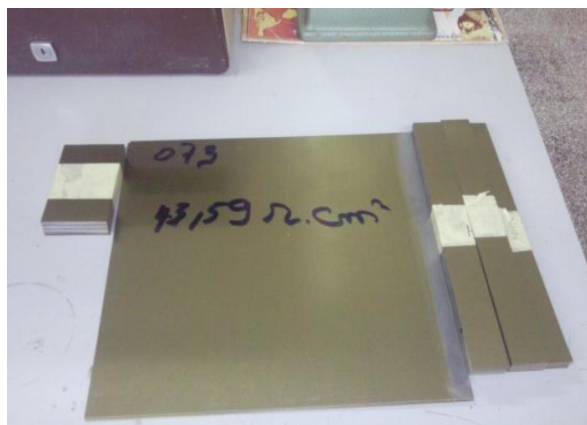
#### **❖ Principe de découpage :**

Le découpage s'effectue par pression. Il consiste à appliquer sur une tôle un effort variable par l'intermédiaire d'un poinçon (partie mobile), et une matrice (partie fixe), qui joue le rôle d'une contre lame. Voir la figure IV.20.



**Figure IV-19-** Appareil de découpage des tôles magnétiques

Avec cet appareil on découpe plusieurs échantillons de la forme indiquée ci-dessous.



**Figure-IV-20-Différentes échantillons**

- Les essais suivants sont effectués à la température ambiante de  $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ .
- Les échantillons doivent être pré conditionnés sous les conditions atmosphérique pendant un temps suffisant pour permettre aux matériaux d'atteindre la stabilité.

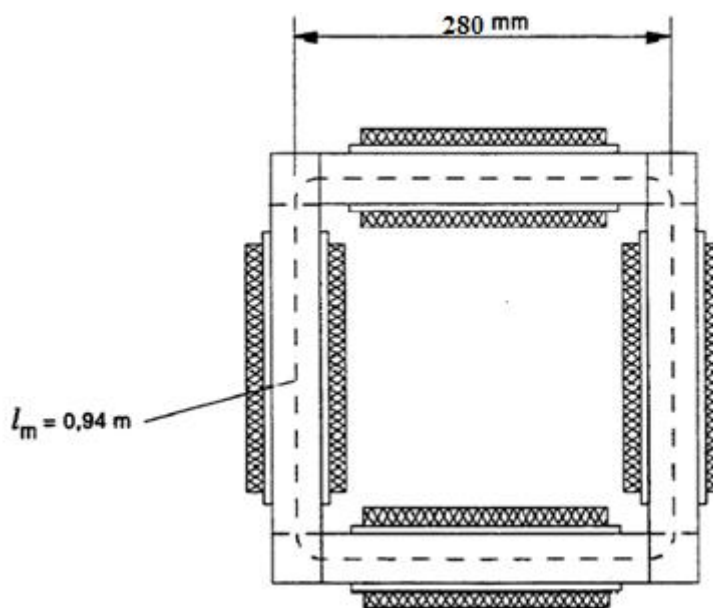
#### **IV-3-3-1-Mesure des pertes magnétiques :**

Cet essai est effectué sur un système comprenant deux parties : le cadre d'Epstein et l'appareil Vettiner.

##### **Description du cadre d'Epstein :**

Le cadre d'Epstein (figure IV.21) contenant les tôles constitue un transformateur, avec les bobinages primaire et secondaire. C'est un circuit fermé démontable, de forme carrée, utilisé pour caractériser les tôles magnétiques. Sa constitution a été soigneusement codifiée par de nombreux organismes de normalisation CEN (Comité Européen de Normalisation). Il se compose de quatre éléments bobinés constituant un noyau magnétique ; ce dernier comprend N bandes rectangulaires. Le nombre N étant multiple de 4, il est au moins égale à 16. Les dimensions recommandées pour chaque bande étant  $280 \times 30 \text{ mm}^2$ . Une inductance mutuelle de compensation du flux dans l'air

est présente au centre du cadre. Les enroulements sont répartis uniformément des bornes d'alimentation et de mesure sont raccordées à leurs extrémités. L'enroulement d'alimentation (primaire) est bobiné à l'extérieur tandis que l'enroulement de tension (secondaire) bobine à l'intérieur. L'enroulement primaire de l'inductance mutuelle est connecté en série avec l'enroulement primaire du cadre d'Epstein, alors que l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est connecté en opposition avec l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein. L'avantage primordial du circuit Epstein réside dans le fait qu'il s'agit d'un circuit démontable, facile à réaliser et utilisé pour 0,5 à 1, 0 kg de matériau. Dans les coins, il n'ya plus d'enroulement, par contre nous avons une double épaisseur de matière. Des mesures sont établies pour que le système se comporte comme un circuit fermé (homogène) ayant pour section, la section moyenne d'un côté (c'est -à-dire la section de  $N/4$  bandes) et pour longueur, la longueur conventionnelle du circuit  $l_m = 0,94$  m.



**Figure IV-21** : Schéma générale d'un cadre d'Epstein

#### **Appareil Vettiner :**

Cet appareil est constitué essentiellement de trois compartiments :

Le générateur, l'analyseur et d'un PC muni d'un logiciel voir la figure.



**Figure-IV-22** : appareil Vettiner

- **Procédure de l'essai : Préparation des éprouvettes :**

Elles doivent être découpées par un procédé permettant d'obtenir une coupe particulièrement franche, exempte de bavures, ayant les dimensions suivantes :

Largeur  $l = 30\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$

Longueur  $L = 280\text{mm} \leq L \leq 320\text{mm}$

Les longueurs des bandes doivent être toutes égales, avec une tolérance de  $\pm 0,5\text{mm}$ .

Avant de procéder aux étapes de l'essai, on doit vérifier les dimensions des éprouvettes, si elles sont conformes à la norme NF EN 10106.

Pour la tôle M530-50A, elle doit avoir les dimensions suivantes dans le sens longitudinal et transversal :

Largeur  $l = 30 \pm 0,2\text{mm}$ .

Longueur  $L = 280 \pm 0,1\text{mm}$ .



**Figure-IV-23** : Eprouvettes pour la détermination des pertes totales spécifiques.

**Contrôle avant vieillissement :****La pesée :**

L'opération consiste à faire passer les éprouvettes sur une balance de précision, la masse est :  $m_p = 1163.5g$ .

Après pesage on peut calculer la masse et la section active de l'échantillon.

**Calcul de la masse active :**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$m_a = \frac{L_m}{4 \cdot L} \cdot m_p$$

Avec :

L : Longueur d'une bande d'éprouvettes, en mètre.

$L_m$  : Longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètre ( $L_m = 0,94m$ ).

$m_p$  : La masse totale de l'éprouvette, en Kilogrammes.

$m_a$  : La masse active de l'éprouvette, en Kilogrammes.

$$m_a = \frac{0,94}{4 \cdot 280} \cdot 1163,5 = 0,9765Kg$$

**Calcul de la section active :**

$$A = \frac{m_p}{4 \cdot L \cdot \rho_m}$$

A : Section active de l'éprouvette, en mètre carrés.

$\rho_m$  : La masse volumique conventionnelle du matériau en essai ( $\rho_m = 7.65Kg/dm^3$ ).

$$A = \frac{1163,5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 280 \cdot 10^{-6} \cdot 7,65 \cdot 10^{-3}} = 1,357cm^2$$

Après calcul de la masse et la section active, les bandes doivent être empilées dans les solénoïdes de cadre d'Epstein en formant dans les coins des joints à double recouvrement. Les bandes découpées perpendiculaires à la direction de laminage soient toutes insérées dans deux branches opposées, et celles découpées parallèlement à la direction de laminage soient insérées dans les deux autres branches.

Les éprouvettes doivent ensuite être désaimantées par application d'un champ magnétique alternatif régulièrement décroissant.

### **Introduction des données dans l'analyseur :**

On fixe :

$$N_1 = 700 \text{ spires.}$$

$$N_2 = 700 \text{ spires.}$$

$$L_m = 0,94 \text{ m.}$$

$$B = 1,5 \text{ T.}$$

$$A = 1,357 \text{ cm}^2.$$

$$m_a = 0,9765 \text{ Kg.}$$

On obtient le résultat suivant :

Pour une induction  $B = 1,5 \text{ T}$ , les pertes totales spécifiques mesurées  $P_s = 4,67 \text{ W/kg}$ .

Les pertes spécifiques maximales garanties par le constructeur valent  $P_s = 5,30 \text{ W/kg}$ .  
(norme CEI 10106).

### **Contrôle après vieillissement :**

Les éprouvettes doivent subir un vieillissement dans un four sous une température de  $225^\circ\text{C}$  pendant 24 heures.

Après vieillissement les éprouvettes doivent être soumises aux mêmes étapes d'essai effectuées avant vieillissement.

Les résultats sont comme suit :

$$\text{La masse pesée : } m_p = 1163,5 \text{ g.}$$

$$\text{La masse active : } m_a = 0,979 \text{ Kg.}$$

$$\text{La section active : } A = 1,349 \text{ cm}^2.$$

$$\text{Les pertes spécifiques à } B = 1,5 \text{ T : } P_s = 4,670 \text{ w/Kg.}$$

Les résultats obtenus sont conforme à la norme EN10106.

**IV-3-3-2 : polarisation magnétique :**

Cet essai consiste à fixer les valeurs de champ magnétique  $\langle\langle H \rangle\rangle$  à 2500A/m ; 5000A/m et 10000A /m à l'aide de l'appareil Vettiner, ensuite prélèvement les valeurs de l'induction  $\langle\langle B \rangle\rangle$ .

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

<b>Champ magnétique (A/m)</b>	<b>Induction magnétique prélevée (T)</b>	<b>Induction magnétique minimale normalisée (T)</b>
2500	1.57	1.56
5000	1.66	1.65
10000	1.77	1.75

**Tableau –IV-10:** Résultats de mesure des inductions magnétiques.

Les résultats sont conformes à la norme NF EN10106.

**Acquisition des résultats :**

Nous pouvons recevoir les résultats sous forme de courbes de toutes les grandeurs : l'induction magnétique B, les pertes magnétiques spécifiques Ps et la perméabilité magnétique relative  $\mu_a$  en fonction du champ magnétique H.

**Résultats et discussion :**

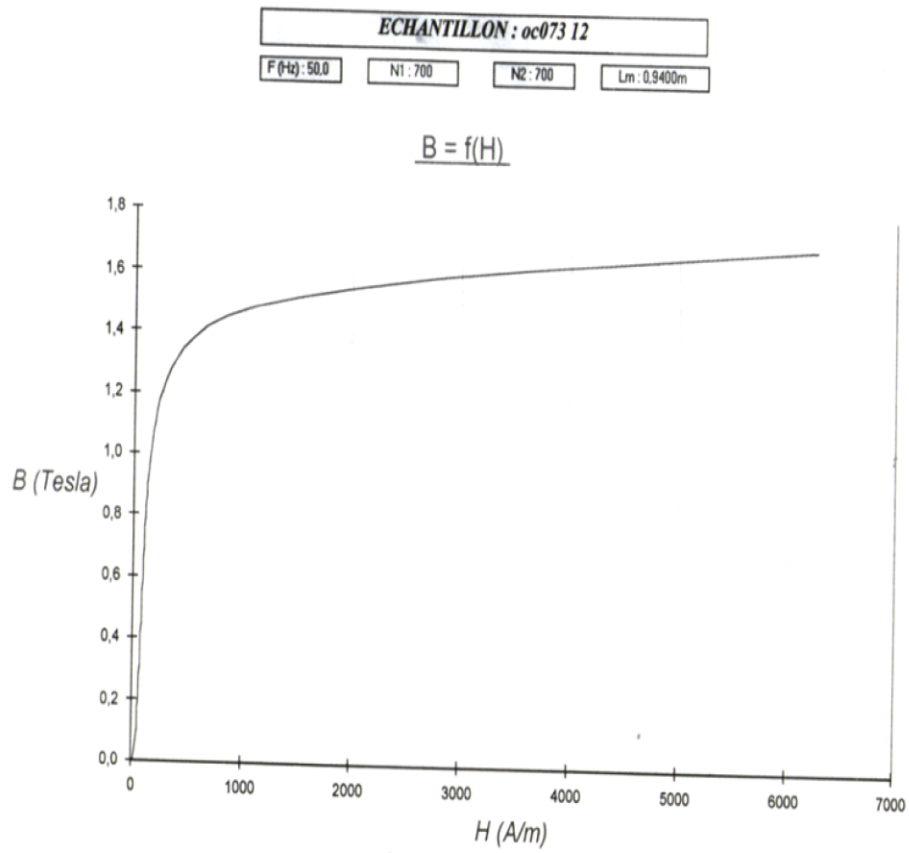
Sur la courbe de première aimantation (figure IV.24), on voit que l'application d'un champ croissant provoque l'apparition d'une induction magnétique B croissante jusqu'à une valeur maximale qui correspond à l'état de saturation. Cette courbe est caractérisée par trois régions :

- Une région linéaire où les champs sont faibles, on dit qu'on est dans le domaine d'aimantation initiale, dans cette partie l'aimantation est réversible.
- Une région non linéaire de champ moyen, dans cette partie l'aimantation est irréversible.
- Une région dite proche de la saturation où les champs forts.

Sur la courbe de perméabilité relative (figure IV.25), on peut distinguer deux régions ; une région linéaire de perméabilité relative proportionnelle au champ d'excitation et croissante jusqu'à une valeur maximale, une région non linéaire de perméabilité décroissante de manière exponentielle.

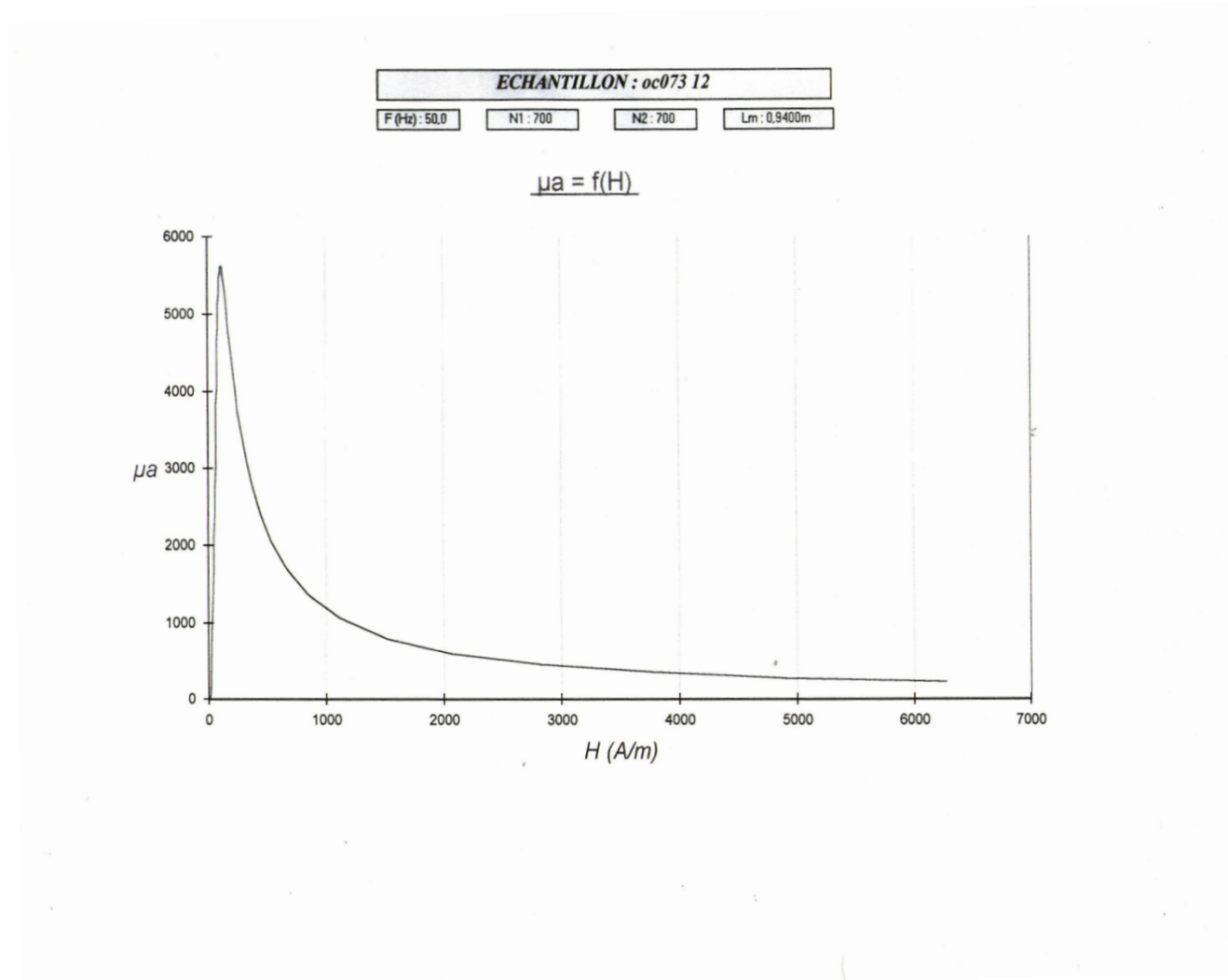
Pour la courbe des pertes spécifiques (figure IV.26), les variations de ces dernières sont données en fonction de l'induction, elle suit une loi parabolique

(Les pertes spécifiques à une fréquence fixe sont proportionnelles au carré de l'induction).



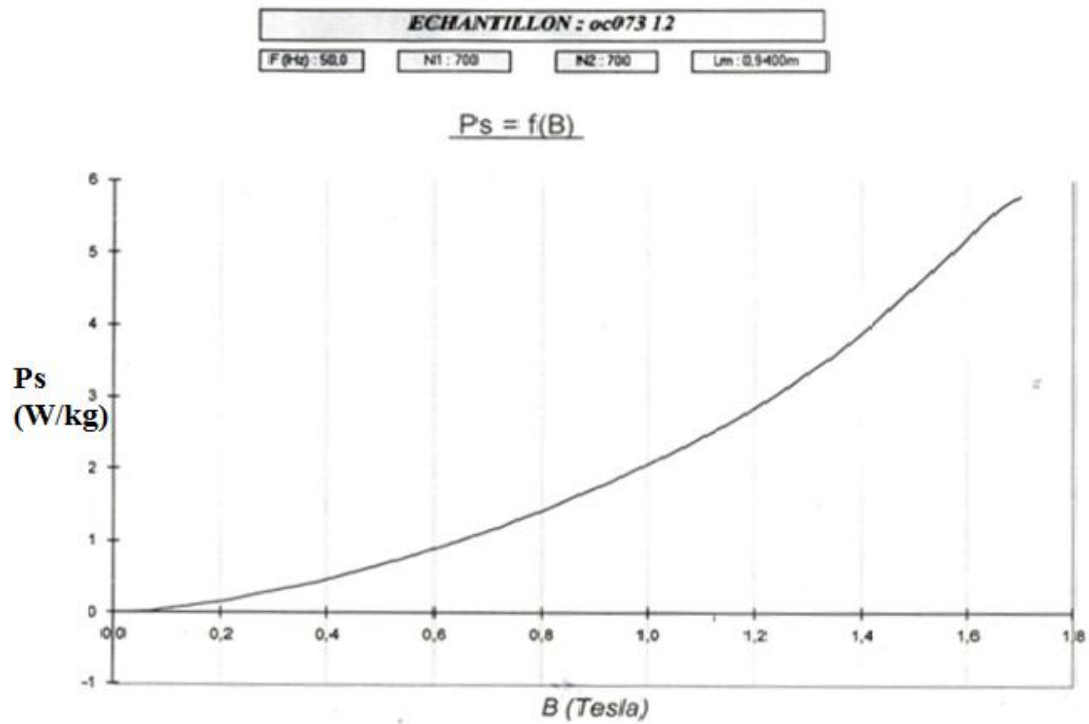
**Figure –IV-24** : courbe de première aimantation.

L'induction à saturation est atteinte pour des champs relativement faibles.



**Figure-IV-25-** : courbe de la perméabilité relative.

La valeur maximale de  $\mu_a$  est d'environ 5500 .



**Figure-IV-26** : courbe des pertes spécifiques.

Cette courbe a une allure parabolique puisque les pertes par hystérésis sont proportionnelles au carré de l'induction  $B$ .

**IV-3-3-3 : Anisotropie maximale des pertes :**

L'anisotropie maximale des pertes notée T en % se détermine la formule pratique suivante :

$$T = \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} * 100 \%$$

$W_1$  : Est la valeur des pertes, en watt par kilogramme, mesurée avec des tôles découpées perpendiculairement au sens du laminage.

$W_2$  : Est la valeur des pertes, en watt par kilogramme, mesurée avec des tôles découpées dans le sens du laminage.

On effectue deux mesures :

- une première mesure avec un cadre d'Epstein rempli de tôles découpées dans le sens transversal du laminage.
- une deuxième mesure avec un cadre d'Epstein rempli de tôles découpées dans le sens du laminage.

**Résultats des mesures :**

$W_1 = 4,66$  W/kg.

$W_2 = 4,37$  W/kg.

$$\text{L'anisotropie } T = \frac{|4,66 - 4,37|}{4,66 + 4,37} * 100 = 3,21\%$$

La valeur maximale à ne pas dépasser est de 10% selon la norme NF EN 10106.

**IV-3-3-4 : Facteur de foisonnement (entassement) :**

L'éprouvette doit être constituée d'au moins 16 bandes de même taille.

Elles doivent avoir une largeur de 60mm et une longueur de 100mm et une surface d'au moins 5000mm<sup>2</sup>, leur largeur et leur longueur doivent être égales avec une tolérance  $\pm 0.1$ mm. Les éprouvettes doivent être ébavurées.

Les éprouvettes sont placées entre les plateaux d'une presse et soumises à une pression de  $100\text{N/cm}^2$ . On mesure sous cette pression la hauteur de paquet au voisinage du milieu des deux petites côtes à une précision d'au moins  $0,1\text{ mm}$ .

Le facteur de foisonnement est calculé selon la formule suivante :

$$F = \frac{m_p}{\rho_v \cdot h \cdot s}$$

F : facteur de foisonnement.

$m_p$  : masse pesée du paquet de tôles magnétique en (g).

h : hauteur du plaque en (m).

$\rho_v$  : Masse volumique de l'éprouvette en ( $\text{Kg/dm}^3$ ).

S : section du paquet en ( $\text{cm}^2$ ).



**Figure-IV-27:** Eprouvette pour l'essai de facteur de foisonnement.

Dans notre cas les résultats sont comme suit :

$m_p$  : 8994g.

$S = l \cdot L = (59,8 \cdot 100,1)\text{ mm}^2 = 5985,98\text{ mm}^2$ .

h = 19,8mm

Le facteur de foisonnement est de  $F = 0,98$ .

Cette valeur est conforme à la norme NF EN 10106 qui indique une valeur minimale de 0,97.

**IV-3-3-5 : Essai de pliage :**

L'essai consiste à plier l'éprouvette à 90° alternativement de chaque côté de sa position initiale, suivant le mode défini par ISO 7799, le rayon de pliage choisi est de 5mm.

Un pliage à 90° à partir de la position initiale avec retour à la position initiale compte pour une unité. L'essai sera arrêté à l'apparition de la première fissure visible à l'œil nu.

Numéro d'éprouvettes	Nombre de pilages
1	64
2	64
3	63
4	65

**Tableau –IV-11 : Résultat des essais**

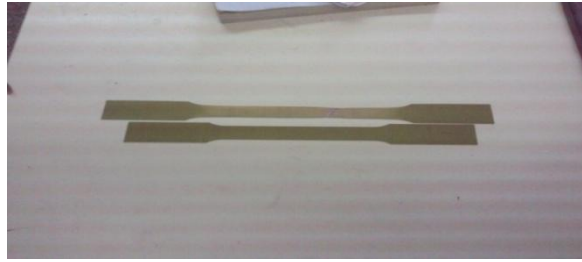
Les résultats sont conformes à la norme NF EN 10106 qui indique un nombre de pliages minimal de 10.



**Figure-IV-28 : Appareil pour essai de pliage**

**IV-3-3-6 : Résistance à la traction :**

Pour réaliser l'essai de traction on doit suivre les étapes suivantes :  
Usinage de l'éprouvette de la façon à avoir la forme suivante :



**Figure-IV-29** : Epreuve pour essai à la traction.

Mesure de l'épaisseur, dans notre cas  $e = 0,510\text{mm}$ .

Mesure la largeur  $l = 19,970\text{ mm}$ .

Calcul de la section par la formule suivante :

$$S = l * e = 19,970 * 0,510 = 10,184\text{ mm}^2$$

Mettre l'éprouvette à la machine d'attraction voir la figure IV-9.

Appliquer une charge  $f$  ( $f = \frac{1}{10}F$ ,  $F = 100\text{KN}$ ) tel que  $F$  est la force de traction de la machine.

Affichage d'une force sur la machine  $F_m = 4,27\text{ kN}$ .

La résistance de traction  $R_m$  peut être calculée par la relation suivante :

$$R_m = \frac{F_m}{S} = \frac{4,270}{10,184} = 425\text{ N/mm}^2$$

L'allongement ( $A$ ) en % il est calculé par la formule suivante :

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

$L_0 = 80\text{mm}$ , avant la lognement.

$L = 110\text{mm}$  , après la lognement.

$$\text{Donc } A = \frac{110 - 80}{80} * 100 = 37,5\%$$

Les résultats sont conformes à la norme NF EN 10106.

#### **IV-3-3-7 : Résistance d'isolement :**

Cet essai est effectué selon la norme CEI 404-11.

Cet essai consiste à déterminer la qualité d'isolement l'éprouvette de 300\*300 mm doit être placée entre le plateau et les 10 touches de contact, et une force de  $1345\text{N} \pm 5\%$  doit être appliquée progressivement.

On doit effectuer 10 lectures du courant de contact des touches sur chaque surface de l'éprouvette.

L'essai doit être effectué à une source d'alimentation en courant continu capable d'entretenir une tension stabilisée de 5 V aux bornes d'électrodes.

Chacune des 10 touches de contact doit avoir une surface de contact de  $64,5 \text{ mm}^2 \pm 1\%$  soit une surface totale de  $645 \text{ mm}^2 \pm 1\%$  pour les 10 touches.

Le dispositif électrique du circuit de stabilisation et du système de mesure de courant est illustré par la figure IV-31.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Courant (A)	Courant moyenne (A)
0,11	0.069
0,20	
0,05	
0,10	
0,07	
0,06	
0,05	
0,07	
0,09	
0,15	

**Tableau IV.12:** Résultats de mesure de courant des contactes.

La valeur de la résistance  $R_{\text{iso}}$  est calculée par la formule suivante :

$$R_{\text{iso}} = A \left[ \frac{U}{I_{\text{moy}}} - \frac{R}{10} \right]$$

$R$  : est la résistance en série avec chaque contact, égale à  $5\Omega$ .

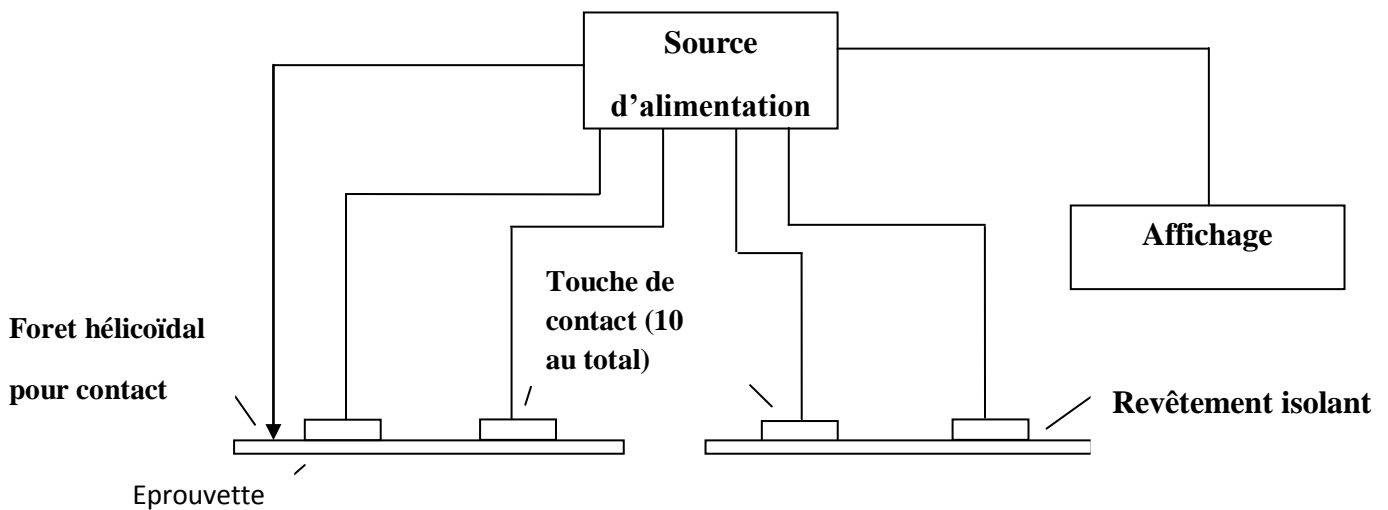
$A$  : l'air total des 10 touches en  $\text{mm}^2$ .

$U$  : est la tension appliquée à l'ensemble de contacts.

$I_{\text{moy}}$  : est le courant moyen des 10 touches.

$$R_{\text{iso}} = 645 \left[ \frac{0,5}{0,069} - \frac{5}{10} \right] = 43,51 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

Le dispositif électrique du circuit de stabilisation de du système de mesure de courant est illustré par la figure -31.



**Figure -IV-31** : schéma de principe de la mesure de la résistance d'isolement.

**Conclusion :**

La fabrication d'un moteur asynchrone nécessite l'utilisation de matériaux conformes aux exigences des normes publiées par la commission internationale d'électrotechnique (CEI).

## **Conclusion générale**

Le travail que nous avons réalisé au sein de l'entreprise Electro-Industries (EI), nous a été bénéfique sur plusieurs aspects, il nous a permis non seulement d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la technologie des différentes méthodes d'essais des matériaux électrotechniques, mais il nous a donné aussi l'occasion de constater l'importance de ces méthodes et d'apprécier les différents contrôles systématiques établis sur chacun de ces derniers afin de s'assurer une conformité au plan de la construction.

## **Fiches technique des équipements :**

### **La FICHE TECHNIQUE DE LA MACHINE DE TRACTION**

#### **Machine d'essai électromécanique RM 100**

**N° d'identité** : 610 023 007

**N°interne** : 650/31

**Fabrication ou fournisseur** : Schenk-Trebel 10

**KLD** : Fe

**Date de mise en marche** : 1985

**Température de fonctionnement** : 18 à 35°C

**Plage de mesure** : Cellule 1 : 0 à ± 100 KN

Cellule 2 : 0 à ± 10 KN

Cellule 3 : 0 à ± 0.1 KN

**Précision** : ± 0.05

**Course de traverse** : 1000 mm

## LA FICHE TECHNIQUE DE LA MACHINE (DUROMETRE)

Machine d'essai électromécanique RM 100

<b>N°d'identité</b>	: 620 304 001
<b>N°interne</b>	: 650/9
<b>Fabrication ou fournisseur</b>	: LABOTEC (Wolpert)
<b>Précision</b>	: 1 %
<b>KLD</b>	: 14
<b>Date de mise en marche</b>	: 1986
<b>Nombre de charge</b>	: 17
<b>Charges Brinell</b>	: 5 ; 10 ; 625 ; 30 ; 31.25 ; 62.5 ; 125 ; 187.5 ; 250
<b>Charges Vickers</b>	: 1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 1 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 125
<b>Charges Rockwell avec 98.1 N (10Kp) de préchage</b>	: HRA (60) ; HRB (100) ; HRB (150)
<b>Hauteur de la machine</b>	: 800 mm
<b>Hauteur d'essai</b>	: 0 à 300 mm
<b>Poids Net/ Brut</b>	: 200/300 kg
<b>Objectif grossissement</b>	: 70 et 140 x
<b>La durée d'essai (levier)</b>	: 6 à 10 s pour les charges au dessus de 1 à 5 (3Kp) ; Pour l'aluminium, les antifrictions et les alliages de Plombe 30 s

## FICHE TECHNIQUE DE CADRE EPSTIEN

### Appareil Cadre Epstein

**N°identification** : 620 322 040

**N° interne** : 650/33

**KLD** : 24

**Fournisseur ou Fabrication** : VETTINER

**Précision** : 0.5%

**Date de mise en marche** : 1999

**Température de fonctionnement** : 18 à 35 °C

**Mesure du champ** : H100= KA/m

**Gamme de courant** : 1, 4, 10, 40, 100 A

**Mesure d'induction (B)** : 2.5 Tesla maxi

**Fréquence** : 20 Hz jusqu' à 2000Hz

**Mesure de perte** : 0.2 jusqu' à 200 W

**Précision de mesure** : 0.5%

**Puissance** : 2 KVA

**Tension de sortie** : 0-50 V

**Courant maxi** : 40 A

**Fréquence de sortie** : 20-200 /100-1000 Hz

**Longueur** : 300 mm

**Poids des tôles laminées** : 1kg

**Ligne moyenne** : 250x 250 mm

**Longueur du circuit** : 940 mm

**Courant maxi prim** : 10 A ou 50A (rms)

Enroulement primaire principale 700 spire (4 x 175) bornes A et B

Enroulement secondaire principal 700 spire (4x175) bornes C et D

Enroulement primaire additionnel + 400 spires (4x100) bornes A et E

Enroulement secondaire additionnel + 800 spires (4x200) bornes Ket L

Amplificateur de puissance AC et /ou DC

Tension et fréquence programmable

Pilotage manuel ou par ordinateur

## FICHE TECHNIQUE DE LA BALANCE

**N° identification** : 620-311-006

**N° interne** : 650/48

**Désignation** : Balance analytique 221S << SARTORIUS>>

**KLD** : KLD 24

**Fournisseur ou fabricant** : SARTORIUS AGGOTTINGEN

**Data de mise en service** : 1999

**Température de fonctionnement** : +4 à 5°C

**Etendue de mesure** : 220g

**Précision de lecteur** : 0,0001g

# *Bibliographie*

- [1] Claude Devaux, « moteur asynchrone triphasé ». Université Montpellier 2, 2008 /2009.
- [2] DJ.KACI, H.BENAMARA, S.HASNA, « les différents modes de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé » Université Mouloud Mammeri, 2008.
- [3] Theodore wildi, «Electrotechnique », Institut de recherche d'Hydro-Québec, 2000.
- [4] Etienne Gaucheron, «Les moteurs électriques pour les mieux les piloter et les protéger Cahier technique /n°207», 2004.
- [5] G.VEINOTT, «Moteur asynchrone triphasé » Les moteurs électriques à puissance fonctionnaire, 2009.
- [6] M.BOUAMA, M.BADJA, « Mesure de la température statorique d'un moteur asynchrone triphasé à cage », mémoire DEUA, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2008.
- [7] S. BETTAHAR, L. ASSELGOU et L. AIDER : les différents matériaux électrotechniques utilisés dans la construction du moteur asynchrone (E-I) et leur contrôle). Mémoire de fin d'études DEUA. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [8] H. NEY ; N. MOREL « installation électrique » ; édition Patrick Gonidou, paris 2001.
- [9] W. SYBILLE « électrotechnique » 4<sup>ème</sup> édition.
- [10] Jean Barralis et Gerard Meader, précis : Métallurgie (Elaboration, structure, propriétés, normalisation) AFNOR NATHAN, Paris (2001).
- [11] Jean Paul, Bailon, Jean Marie Dorlot, des matériaux, 3<sup>ème</sup> Edition.
- [12] BENIF NADIA, BOUDISSA MALIKA, SAIDANI KENZA (caractérisation des tôles magnétiques utilisées dans la construction des machines électriques). Mémoire de fin d'études ING en électrotechnique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [13] Norme européenne NF EN 10317-0-1.

# *Résumé*

Dans le cadre de notre projet, il nous a été confié de déterminer le processus de contrôle des matériaux électrotechniques (fil de cuivre émaillé, le papier isolant et la tôle magnétique) utilisés dans la construction des moteurs asynchrones fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA.

Pour assurer le déroulement de notre travail nous avons élaboré le plan de travail suivant :

Après une introduction générale ;

Le chapitre I : Est consacré aux généralités sur la machine asynchrone triphasée ;

Le chapitre II : processus de fabrication du moteur asynchrone ;

Le chapitre III : Traite les généralités sur les matériaux électrotechnique ;

Le chapitre IV : Est consacré au procédé de contrôle des matériaux électrotechniques ;

Et enfin, on termine par une conclusion générale.