

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
Département D'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par
ROSTANE Rafik

Et

OUALI Mohand Arezki

Mémoire dirigé par Mme. Z.OUDNI

En collaboration avec Mme. S.Hadjaz à Electro-Industries

Thème

Dimensionnement d'un moteur asynchrone
à cage d'écureuil à 8 pôles

Mémoire soutenu publiquement le 26/09/2018 devant le jury composé de :

M. H.MOHELLEBI

Professeur, UMMTO, Président

Mme. Z.OUDNI

MCB, UMMTO, Encadreur

Melle. N.RADJA

MAA, UMMTO, Examinatrice

Mme. S.Hadjaz

Ingénieur, Electro-Industries, Encadreur

Remerciements

Louange à notre créateur qui nous a incité à acquérir le savoir et nous a donné la volonté et le courage pour y arriver. C'est à lui que nous adressons toute notre gratitude en premier lieu.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre chère promotrice, Mme Z. Oudni pour avoir dirigé ce travail, pour la documentation qu'elle nous a fourni, pour ses critiques, ses conseils et ses orientations durant toute la période de notre travail.

Nous tenons à remercier notre maitresse de stage. Mme S.Hadjaz, ingénieur au niveau de bureau d'étude au sein de l'entreprise, pour son accueil et son aide précieux.

Nous tenons à remercier tout particulièrement et témoigner toutes nos reconnaissances au personnel pour l'expérience durant ce stage au sein de l'entreprise.

Nous remercions aussi profondément les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles respectives ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail...

Rafik & Mohand Arezki

*Description technique de l'entreprise
ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA
Lieu de notre stage*

Présentation de l'entreprise :

L'entreprise Electro-Industrie (ex ENEL) est située sur la route nationale N°12 distante de 30 km du chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou et de 8 km de la commune d'Azazga, sur une superficie de 39.5 hectares.

Electro-Industrie est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des moteurs électriques, alternateurs, transformateurs de distribution et groupes électrogènes. Elle est également dotée d'un équipement adéquat qui offre au secteur industriel d'importantes capacités de sous-traitance.

Les produits Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes :

 Allemandes :

→ "DIN" (Degrés de protection des moteurs électriques).

→ "UDE" (Règlement relatif aux machines électriques).

 "CEI" (conformes aux recommandations Européennes).

 et aux normes internes sévères préconisées par le donneur de licence SIEMENS.

Le niveau de leur qualité a été approuvé par la clientèle locale (SONELGAZ, ENMTP, ENIEM) et étrangères (Russie, Pays Africains : Sénégal, Mali....). [1]

Introduction générale**Chapitre I : Généralités sur la machine asynchrone.**

Introduction	2
1. Classification des machines électriques	2
2. Les machines asynchrones	3
2.1. Les différentes parties du moteur asynchrone	4
2.2. Le bobinage	7
2.2.1. Enroulement concentrique	8
2.2.2. Enroulement imbriqué	8
2.2.3. Enroulement ondulé	9
3. Classification des moteurs à cage d'écureuil	9
4. L'isolation	10
5. Principe de fonctionnement	10
5.1. Vitesse de synchronisme	11
5.2. Etude à vide et en charge	11
5.3. Champ magnétique tournant	12
6. Le glissement	12
7. Le couple	13
8. Le bilan de puissance	14
9. Fonctionnement d'une machine asynchrone	16
10. Démarrage du moteur asynchrone	16
10.1. Démarrage étoile-triangle	16
10.2. Démarrage par autotransformateur	18
10.3. Démarrage résistif	19
11. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone	20
Conclusion	20

Chapitre II : Etapes de fabrication d'un moteur asynchrone.

Introduction	21
1. Bâtiment 2A	
1.1. Le découpage, encochage et l'emballage	21
1.1.1. Fabrication des tôles statorique et rotorique	22
1.1.2. Emballage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques	22
1.1.3. Découpage des barres de cuivre pour les rotors à cage d'écureuil	23
1.1.4. Fabrication des capots et roues de ventilateurs	23
1.2. Le moulage sous pression	23

2. Bâtiment 2B :	
2.1.L'usinage	24
2.1.1. Fabrication des arbres rotoriques	24
2.1.2. Usinage des différentes pièces en fonte et en alpac	25
2.2.Le bobinage	25
2.2.1. Préparation d'isolation	25
2.2.2. Préparation des bobines	26
2.2.3. Bobinage du paquet statorique	26
2.2.4. Contrôle électrique	27
2.2.5. Résinage	28
2.3.Le montage	28
2.3.1. Equilibrage du rotor	28
2.3.2. Pré-montage	29
2.3.3. Montage	29
2.4.Plates formes d'essais	31
2.4.1. Essais séries	31
2.4.2. Essais spéciaux	32
2.4.3. Autres essais	33
Conclusion	34

Chapitre III : Matériaux utilisés dans la construction du moteur asynchrone.

Introduction	35
1. Classification	35
2. Matériaux conducteurs	35
2.1.Bons conducteurs	35
2.2.Formes des conducteurs	36
2.3.Propriétés	36
2.3.1. Propriétés physique et chimique	36
2.3.2. Propriétés mécaniques	37
2.3.3. Propriétés électriques	39
2.3.4. Caractéristiques et applications	39
2.3.5. Caractéristiques des alliages métalliques conducteurs	42
2.3.6. Propriétés et applications	42
3. Matériaux magnétique	43
3.1.Définition des matériaux magnétique	43
3.2.Les relations et les lois de l'électromagnétisme	44
3.2.1. Excitation magnétique	44
3.2.2. Induction magnétique	44
3.2.3. Relation entre l'excitation et l'induction magnétique dans l'air	45
3.2.4. La perméabilité magnétique	45

3.2.5. Hystérésis magnétique	45
3.3. Classification magnétiques des matériaux	46
3.3.1. Matériaux diamagnétiques	46
3.3.2. Matériaux paramagnétiques	47
3.3.3. Matériaux ferromagnétiques	47
3.3.4. Matériaux antiferromagnétiques	48
3.3.5. Matériaux ferrimagnétiques	49
3.4. Type des matériaux magnétiques	49
3.4.1. Matériaux doux	50
3.4.2. Matériaux durs	51
3.5. Composition des tôles Fe-Si à grains non-orientés	52
3.5.1. Tôles semi-finies	52
3.5.2. Tôles finies	52
4. Matériaux isolants	53
4.1. Matériaux isolants usuels	53
4.2. Classification des matériaux isolants	54
4.2.1. En fonction de la tenue en température	54
4.2.2. En fonction de l'état physique	56
4.2.3. En fonction de l'origine	56
4.3. Applications des matériaux isolants en industrie électrique	60
4.3.1. Bobinage des machines	60
4.3.2. Câbles électriques	60
4.3.3. Isolateurs	61
4.3.4. Appareillage haute tension	61
5. Matériaux de construction mécanique	61
5.1. Fonte (carcasse)	61
5.1.1. Types de fonte	62
5.1.2. Les étapes de fabrication de la fonte d'acier	62
5.2. L'acier au carbone (arbre)	63
5.2.1. Définition	63
5.2.2. Désignation des métaux	64
5.2.3. Les étapes de fabrication de l'acier	66
5.2.4. Classement des aciers	67
5.2.5. Emplois des aciers	67
5.3. Plastique (ventilateur)	67
5.3.1. Définition	67
5.3.2. Emplois des plastiques	68
Conclusion	69

Chapitre IV : Dimensionnement du moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Introduction	70
1. Les dimensions principales et les contraintes électromagnétiques	70
1.1. Puissance électromagnétique	70
1.2. Induction dans l'entrefer	71
1.3. Longueur virtuelle de l'induit	71
1.4. Coefficient de longueur λ	71
1.5. Le flux utile par pôle	72
1.6. Nombre d'encoches par pôle et par phase	72
1.7. Le pas dentaire	72
1.8. Le courant nominal dans une phase statorique	72
1.9. Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche	72
1.10. Nombre de spires par phase	73
1.11. Section effective d'un conducteur	73
1.12. Choix de l'enroulement statorique	74
2. Dimensionnement de la feuille statorique	74
2.1. La largeur de la dent	75
2.2. Hauteur du dos du stator	76
2.3. Hauteur de la dent	76
2.4. Hauteur de l'encoche	76
2.5. Section occupée par les conducteurs	76
2.6. Coefficient de remplissage de l'encoche	77
3. Entrefer	79
4. Dimensionnement du rotor	79
4.1. Diamètre extérieur du rotor	79
4.2. Pas dentaire	79
4.3. Courant dans la barre rotorique	79
5. Dimensionnement de la feuille rotorique	80
5.1. Hauteur de la feuille rotorique	80
5.2. Largeur de la dent rotorique	81
5.3. Hauteur De La Dent Rotorique	82
5.4. Diamètre supérieur de l'encoche rotorique	82
5.5. Diamètre inférieur de l'encoche rotorique	82
5.6. Hauteur de l'encoche rotorique	82
5.7. Section de la barre rotorique	82
5.8. Densité de courant dans la barre rotorique	83

6. Dimensionnement de l'anneau rotorique.....	83
6.1. Section de l'anneau	83
6.2. Hauteur de l'anneau	83
6.3. Largeur de l'anneau.....	83
6.4. Diamètre de l'anneau.....	83
7. Calcul du circuit magnétique	84
7.1. Induction Dans La Culasse Du Stator.....	84
7.2. F.M.M dans la culasse du stator.....	85
7.3. Induction Dans La Dent Du Stator.....	85
7.4. F.M.M Dans La Dent Du Stator.....	85
7.5. F.M.M Dans L'entrefer	85
7.6. Induction dans la culasse rotorique.....	86
7.7. F.M.M Dans La Culasse Du Rotor.....	86
7.8. Induction Dans La Dent Du Rotor.....	86
7.9. F.M.M Dans La Dent Du Rotor.....	87
7.10. F.M.M Totale.....	87
7.11. Coefficient De Saturation Des Dents.....	87
7.12. Coefficient De Saturation De La Machine.....	87
7.13. Courant Magnétisant.....	87
Conclusion.....	89

Conclusion générale

Annexe

Bibliographie



Le cahier de charge du moteur que nous allons traiter :

- Fréquence du réseau d'alimentation : **$f = 50\text{Hz}$** .
 - Nombre de phases : **$m = 3$** .
 - Type du moteur : **130_8 pôles**.
 - Nombre de paire de pôles : **$p = 4$** .
 - Puissance nominale : **$P_n = 2.2\text{ kW}$** .
 - Tension nominale : **$U_n = 400\text{V}$** .
 - Couplage : **triangle (Δ)**.
 - Courant nominal : **$I_n = 6.3\text{A}$** .
 - Vitesse de rotation nominale: **$N_n = 750\text{ trs/min}$** .
 - Facteur de puissance : **$\cos\varphi = 0.71$** .
 - Rendement : **$\eta = 0.72$** .
 - Hauteur d'axe : **$h = 132\text{mm}$** .
 - Diamètre extérieur : **$D_{ext} = 200\text{mm}$** .
-

Dans le vaste champ de l'électromécanique, une des plus anciennes disciplines est l'ingénierie des machines électriques. En fait les premières tentatives de construction de machines électriques commencèrent avec la découverte des phénomènes d'induction et la mise en évidence des forces issues de l'interaction entre les champs électromagnétiques et les courants de conduction (Lois : Lenz, Laplace, Faraday ... etc.).

Ainsi et désormais le domaine de conception des machines électriques est l'une des plus prestigieuses découvertes du siècle dernier et reste aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherche. L'objectif visé par cette recherche est toujours le dimensionnement de nouvelles machines adaptées à la demande du marché.

Comme les machines électriques tournantes, la machine asynchrone, du côté de sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère sur marché. Cette machine est la plus utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels ou domestique de l'électricité, notamment pour des applications à vitesse variable du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

Pour bien déterminer les paramètres d'une machine asynchrone, il faut faire un bon choix du type de bobinage et les matériaux utilisés dans la construction afin de réaliser une machine fiable et robuste.

La caractérisation de ces machines entraîne à formuler des méthodes de dimensionnement qui s'appuie sur les équations tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et qui aboutit à une définition globale, le résultat obtenu est par la suite simulé grâce à un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ses performances à partir de ces spécifications géométriques, de construction et des conditions d'utilisation.

L'objectif de notre projet est d'aborder la conception des moteurs asynchrones triphasés. Tout d'abord en calculant les différents paramètres et caractéristiques d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil fabriqué au sein du complexe ELECTRO-INDUSTRIE (EX ENEL). Ceci en partant d'un cahier de charges donné, qui permet d'explorer automatiquement l'ensemble des solutions possibles, en utilisant la simulation de moteur asynchrone par Simulink, sous MATLAB.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres :

- ✚ Le premier chapitre, on présentera des généralités sur le moteur asynchrone triphasé. Les éléments de construction sont abordés au début du chapitre.
- ✚ Le deuxième chapitre, on évoquera le processus et les étapes de fabrication d'un moteur asynchrone au sein de l'Electro-Industrie (E-I).
- ✚ Le troisième chapitre, traitera les différents matériaux utilisés dans la construction et fabrication du moteur asynchrone et leurs différentes caractéristiques.
- ✚ Le quatrième et le dernier chapitre, sera consacré à la simulation et au calcul de la machine asynchrone.

Finalement on présentera une conclusion générale qui résume les résultats de nos travaux.

Introduction :

Généralement, on trouve dans l'industrie (équipements industrielles) de machines électriques telle que la plupart de ces machines sont asynchrone triphasé. Cette dernière à un rôle important tel qu'elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

La machine asynchrone est le type le plus utilisé pour les applications ou pour le contrôle de la vitesse. Pour une machine asynchrone, sa polarité résulte du peu d'entretien, de sa simplicité de construction et de sa robuste.

Ces machines sont intéressantes lorsque la vitesse à entraîner n'a pas à être constante.

1. Classification des machines électriques :**• Machines à courant continu :**

Les machines à courant continu (MCC) ont été largement utilisées dans les domaines nécessitant des entraînements à vitesse et position variable, grâce à la simplicité de la commande du flux et du couple à partir du courant d'excitation et du courant d'induit.

• Machines à courant alternatif :

Il existe deux types simples des machines conçues pour fonctionner en courant alternatif: les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

• Les machines synchrones :

Elles sont plus spécialement employées comme génératrice sous le nom alternateur et comme moteur quand on désire une vitesse constante. Ces moteurs sont également utilisés pour améliorer le facteur de puissance d'une installation électrique, il suffit de les surexciter pour qu'ils se comportent comme un condensateur. Les moteurs synchrones ont une vitesse rigoureusement constante qui dépend du nombre de pôles qu'ils possèdent et de la fréquence du courant au quel ils sont reliés.

$$N = \frac{60 * f}{p} \text{ (trs/mn)}. \quad \mathbf{I.01}$$

N : vitesse synchrone.

f : fréquence du courant de réseau.

p : nombre de paire de pôles.

Néanmoins, on le rencontre peu dans les applications et installations domestiques, car il est plus couteux à fabriquer et moins robuste que le moteur asynchrone.

Notre étude se porte sur le moteur asynchrone et sa conception.

2. Les machines asynchrones :

Elles sont utilisées principalement en moteur, branchées sur un réseau, elles peuvent fonctionner en génératrices quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme. L'excitation est fournie dans ce cas par le réseau qui règle la tension et la fréquence des courants débités.

Le mode de fonctionnement est employé comme procédé de freinage et de levage.

Le bobinage du rotor d'un moteur asynchrone (MAS) ordinaire n'est relié à aucune source de courant ce qui permet de le comparer à un transformateur dont le primaire serait constitué par l'enroulement statorique qu'on relie au réseau et le secondaire étant représenté par le bobinage du rotor.

La machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor, elle est basée sur l'utilisation du champ tournant. Il existe deux (02) types de moteurs asynchrones, qui se distinguent par la forme de leur rotor qui soit bobiné (à bague), soit à cage.

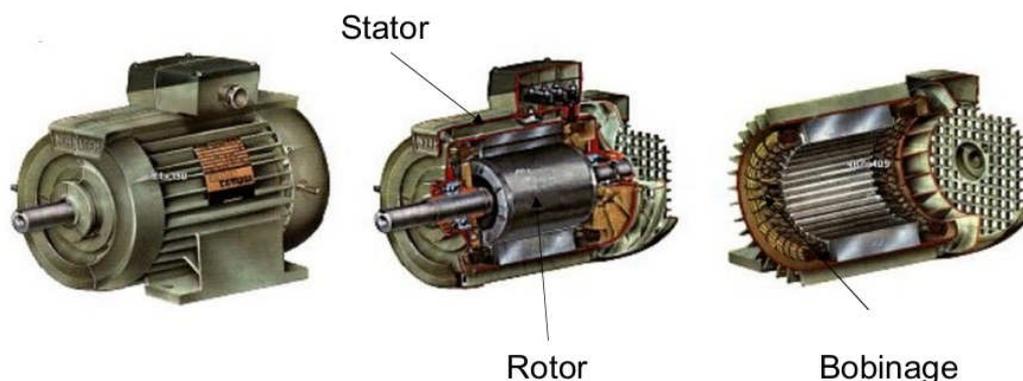


Figure I.1. Présentation du moteur asynchrone.

2.1. Les différentes parties du moteur asynchrone :

✚ Stator = inducteur :

Le stator est la partie statique ou fixe de la machine asynchrone.

Il se compose de :

- ✓ L'extérieur :
 - De la carcasse.
 - Des paliers.
 - Des flasques de paliers.
 - Du ventilateur refroidissant la machine.
 - Le capot protégeant le ventilateur.
- ✓ L'intérieur :
 - Un noyau en fer (paquet statorique) feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique.
 - Les enroulements (bobines en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Le stator d'une machine asynchrone est identique à celui de la machine synchrone alimenté par des courants triphasés de fréquence f en produisant un champ magnétique tournant.

L'entrefer :

Cette partie amagnétique (c'est de l'air ou un vide) est d'épaisseur la plus faible possible, elle permet le mouvement du rotor par rapport au stator.

Rotor = induit :

Le rotor est la partie mobile de la machine (asynchrone), il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor pour canaliser et faciliter le passage ou la circulation du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil dont les barreaux sont de forme trapézoïdale.

On distingue deux (02) types de rotor :

a. Rotor bobiné ou à bague :

Le rotor d'une machine à bague est constitué de trois bobines, chaque bobine est reliée à une bague qui permet la liaison électrique avec les bobines du rotor. Ce type de rotor a été conçu pour permettre la variation de résistance du rotor en insérant des rhéostats en série avec les bobines afin de réaliser certains démarrages.

***Symbole :**



Figure I.2. Présentation du rotor bobiné à bague.

b. Rotor à cage :

Il porte des barres conductrices très souvent en aluminium, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités de ces barres sont réunies (connectées), on dit que le rotor est en court-circuit.

***Symbole :**

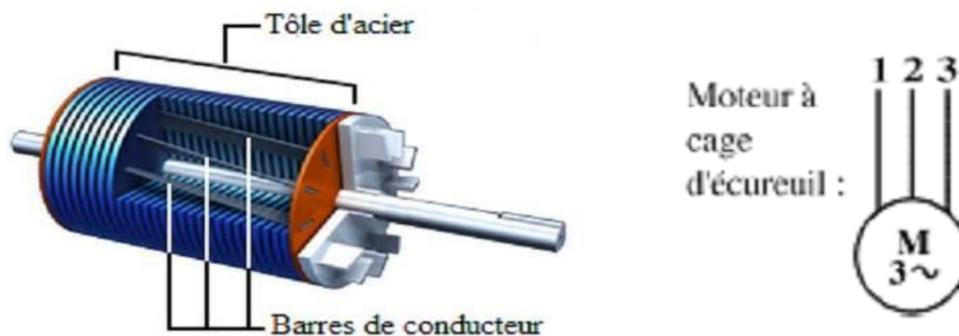


Figure I.3. Présentation du rotor à cage.

On distingue (03) trois types de rotor à cage :

❖ A simple cage :

Les encoches des rotors découpées dans l'acier ont le plus souvent une forme ovale avec un rapport plus moins grand entre la hauteur et la longueur de l'encoche, sont coulées des barres en aluminium conductrices pour former la cage d'écureuil.

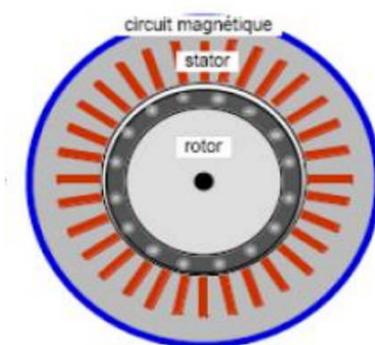


Figure I.4. Présentation du rotor à simple cage.

❖ A cage profonde :

C'est une cage constituée d'un type de barre plus profond que la précédente. Lors du démarrage d'un moteur de ce type, un phénomène physique fait circuler le courant dans la périphérie des conducteurs, comme l'extérieur de la cage a une section faible, la résistance est plus élevée et le courant limité. A la fin du démarrage le courant circule dans toute la surface de la cage.

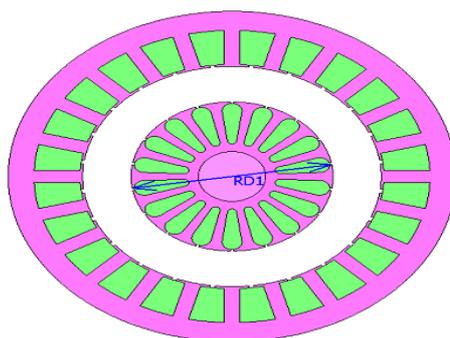


Figure I.5. Présentation du rotor à cage profonde.

❖ A double cages :

Le rotor à double cages d'écureuil comporte une cage supérieure de résistance relativement grande et inductance faible en laiton ou en bronze, et une cage inférieure de faible résistance en cuivre, la première fonctionne au démarrage et la deuxième en régime permanent.

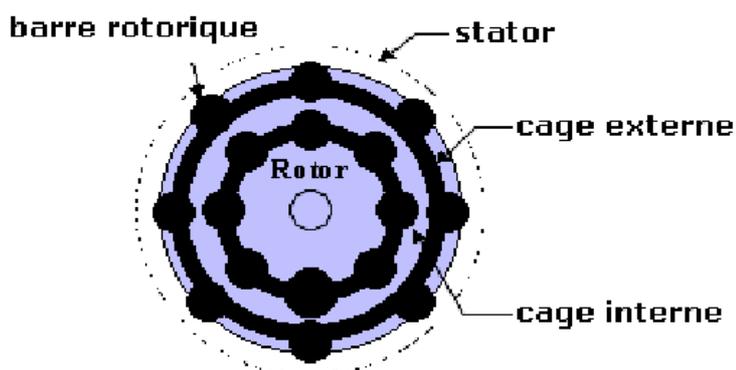


Figure I.6. Présentation du rotor à double cages.

Les autres pièces constituant la machine asynchrone à cage sont représentées au dessous dans la figure suivante :

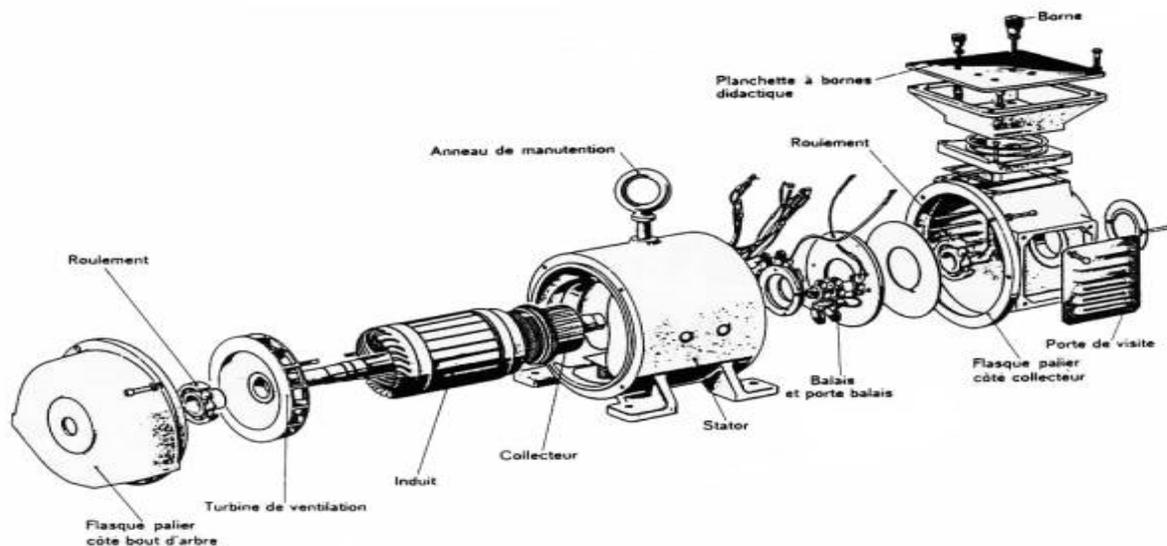


Figure I.7. Présentation des autres pièces d'une machine asynchrone.

2.2. Le bobinage :

On peut effectuer le bobinage d'une machine asynchrone de plusieurs façons, mais habituellement on utilise que trois types (enroulement imbriqué, enroulement concentrique et enroulement ondulé).

Chaque type présente ses avantages, l'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators des moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus. L'enroulement concentrique utilisé dans le cas des petits moteurs, par contre l'enroulement ondulé est idéal pour les rotors à bagues du moteur asynchrone.

L'enroulement concentrique est obligatoirement à couche unique, contrairement aux deux autres types qui peuvent être des bobines à simple couche. Les groupes de bobines formées peuvent se relier en série ou en parallèle et permettre d'utiliser le moteur sous plusieurs tensions.

2.2.1. Enroulement concentrique :

Généralement l'enroulement concentrique est le type le plus utilisé dans la fabrication d'un bobinage à simple couche, chaque bobine occupe et remplit deux encoches. La différence réside dans le fait que les bobines, au lieu d'être toutes identiques sont décalées d'une encoches les unes aux autres, et sont à l'intérieur d'une phase, de dimensions différentes et placées les unes autour des autres.

2.2.2. Enroulement imbriqué :

Le bobinage imbriqué appelé aussi bobinage à pôle orienté, il nécessite une bobine par pôle et par phase c'est-à-dire autant de bobines et des pôles. On trouve :

a. Enroulement imbriqué à simple couche :

Dans le cas d'un enroulement imbriqué à simple couche, chaque bobine forme l'enroulement qui occupe deux encoches. Puisqu'il doit y avoir autant d'enroulements qu'il y a de phases, le nombre d'encoches doit être un multiple de deux fois le nombre de phases.

b. Enroulement imbriqué à double couches :

Chaque bobine est formée de la moitié des conducteurs contenus dans une encoche et disposés de façon que l'un des côtés de la bobine soit dans le haut d'une encoche (côté supérieur) et l'autre dans le fond (côté inférieur).

2.2.3. Enroulement ondulé :

L'enroulement ondulé est habituellement un bobinage à double couches, les conducteurs qui occupent des places analogiques sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Il faut toujours garder à l'esprit que chaque phase doit être séparée de deux autres phases de 120° .

L'enroulement ondulé contient une bobine par paire de pôles et par phase.

Le couplage des bobines et des barres peut s'effectuer sous la forme imbriquée ou ondulée, dans ce dernier cas on peut avoir un enroulement ondulé progressif ou un enroulement ondulé rétrograde.

a. Enroulement ondulé progressif :

On parcourt toutes les bobines d'une phase en progressant toujours dans le même sens.

b. Enroulement ondulé rétrograde :

Après avoir parcouru une partie d'un bobinage en progressant dans un sens celui-ci s'inverse pour parcourir la seconde moitié.

3. Classification des moteurs à cage d'écureuil :

Selon le critère de la NEMA (Nation Electrical Manufacturers Association), on peut classifier les moteurs à cage d'écureuil selon la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et des matériaux utilisés. Plus cette résistance est grande, plus que le courant de démarrage est grand.

Selon NEMA, on peut classifier le moteur asynchrone comme se suit :

- **Classe A** : moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal.
- **Classe B** : moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage.
- **Classe C** : moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage.
- **Classe D** : moteurs à fort glissement.
- **Classe F** : moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage.

De ce classement on peut déduire que le choix d'une encoche appropriée nous aide à donner au moteur les caractéristiques souhaitées.

4. L'isolation :

L'isolation entre les conducteurs, les bobines et le circuit magnétique peut s'effectuer à l'aide de plusieurs types de matériaux similaires imprégnés d'huile ou non. On utilise aussi des matières inorganiques comme le mica, l'amiante, la fibre de verre, utilisé seul ou agglomérées à l'aide de produits tels l'asphalte, la gomme et des résines synthétiques. De nos jours, les développements dans le domaine de la chimie ont amène sur le marché toute une gamme de produit synthétique, selon le domaine d'application et les températures d'utilisation.

Les principaux isolants sont : le polyvinyle, le polyuréthane, nylon, l'époxy et le polyester qui ont des caractéristiques isolantes thermiques spécifiques.

Une utilisation des isolants avec une durée de vie acceptable oblige une température de 4 classes :

- **Classe A** : température élevée de 105°C.
- **Classe B** : 130°C.
- **Classe F** : 155°C.
- **Classe H** : 180°C.

❖ Signification d'une classe d'isolation :

C'est la température maximale admissible c'est-à-dire que doivent supporter les matériaux conducteurs et les isolants pour éviter l'échauffement, voir l'endommagement du circuit magnétique ou de l'ensemble.

Il y a aussi le vernis pour couvrir les fils. Il est plus fiable si le fil est isolé en deux couches.

5. Principe de fonctionnement :

Le principe réside à l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives.

Le passage et circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique, le dernier (sa direction et son intensité) est fonction du courant.

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant.

Pour entretenir la rotation de la machine, il faut faire varier soit le courant dans les conducteurs, soit le champ magnétique.

En régime établi, le rotor de la machine tourne à la vitesse angulaire inférieure à celle de synchronisme, c'est-à-dire le rotor d'une machine asynchrone ne tourne jamais à la vitesse de synchronisme.

5.1. Vitesse de synchronisme :

Le moteur asynchrone triphasé démarre seul, et il prend rapidement sa vitesse de régime en charge. Sa fréquence de rotation est proche à celle de synchronisme, mais toujours inférieur, elle diminue entre la marche à vide et en charge.

Le tableau suivant nous montre les différentes vitesses de synchronismes:

		Nombre de paire de pôles			
		1	2	3	4
		Vitesse du champ tournant en tour par minute			
Fréquence de l'alimentation	100 Hz	6000	3000	2000	1500
	50 Hz	3000	1500	1000	750
	25 Hz	1500	750	500	375

Tableau I.1. Présentation des différentes vitesses de synchronismes.

5.2. Etude à vide et en charge :

5.2.1. Etude à vide :

À vide, le moteur n'entraîne pas de charge. Dans ce fonctionnement, le rotor tourne pratiquement au synchronisme $g \approx 0$ (0.7 %).

L'intensité du courant en ligne est importante (20% du courant nominal) et le facteur de puissance est faible : il s'agit essentiellement d'un courant réactif, ou magnétisant, qui crée le champ magnétique.

5.2.2. Etude en charge :

Le stator étant toujours alimenté par le réseau, augmentons progressivement la charge entraînée par le moteur jusqu'au fonctionnement nominal. Nous constatons que:

- L'intensité du courant absorbé croit
- Le facteur de puissance augmente (0.1 à 0.8)
- La fréquence de rotation diminue

Le facteur de puissance augmente: le moteur fournissant maintenant de la puissance, le stator appelle un courant actif.

5.3. Champ magnétique tournant :

Les trois bobines produisent un champ magnétique variable qui à la particularité de tourner autour de l'axe du stator suivant la fréquence de la tension d'alimentation, ce champ magnétique est appelé champ tournant.

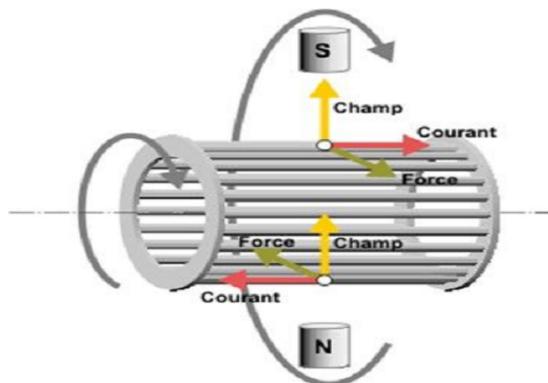


Figure I.8. Présentation des bobines qui produisent le champ magnétique.

6. Le glissement :

On appelle glissement le rapport de la vitesse de rotation de glissement à la vitesse de rotation de synchronisme.

$$g = \frac{ng}{ns} = \frac{ns - n}{ns} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad \text{I.02}$$

$$\text{Tel que : } \Omega_s = 2\pi n_s, \quad \Omega = 2\pi n. \quad \text{I.03}$$

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour cent (%). Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement.

7. Le couple :

Le couple d'une machine asynchrone est fonction la puissance de la machine et de la vitesse de rotation.

Le couple varie avec la fréquence de rotation pour la machine et pour la charge entraînée. Les caractéristiques de la machine et de la charge se croisent en un point qui est le point de fonctionnement pour le quel les couples (machine et charge) sont égaux (identiques).

❖ Caractéristiques :

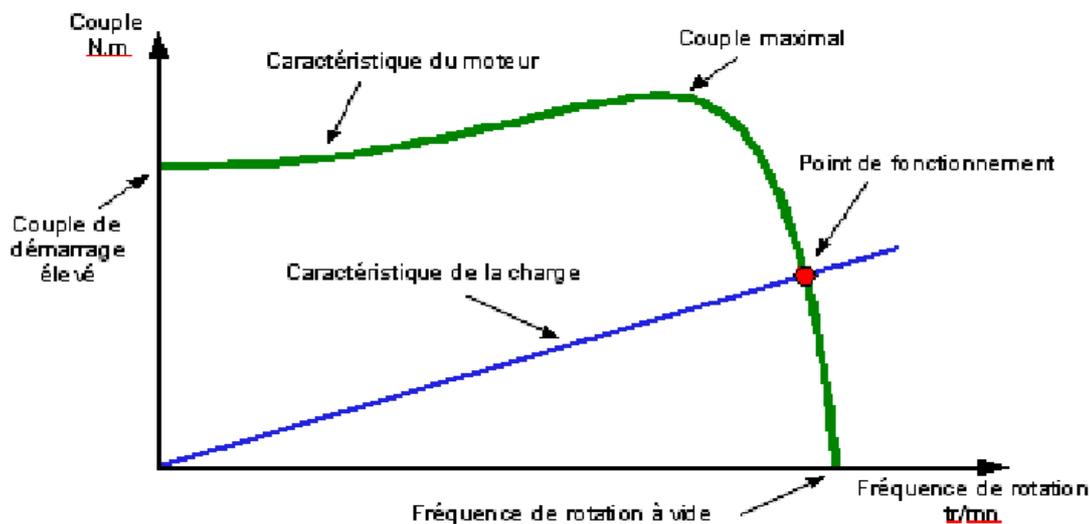


Figure I.9. Présentation du développement du couple.

La caractéristique montre que le moment du couple utile:

- est important au démarrage.
- présente un maximum;
- varie de façon presque linéaire au voisinage de la fréquence de rotation nominale.

Cette zone correspondant au fonctionnement normal du moteur.

8. Le bilan de puissance :

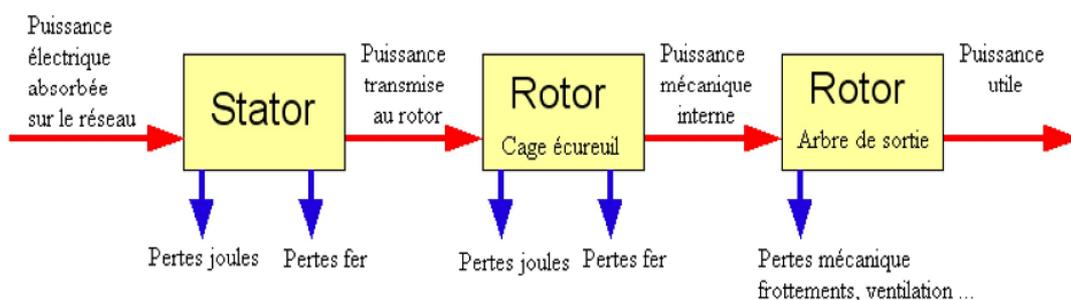


Figure I.10. Présentation du bilan de puissance.

❖ Observation :

• Puissance reçue :

Un moteur asynchrone triphasé constitue un récepteur triphasé équilibré et la puissance qu'il reçoit quel que soit le couplage :

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

I.04

- **Puissance transmise au roto(P_{tr}) :**

Il existe deux types de pertes au rotor.

- **Les pertes par effet Joule:**

$$P_{js} = \frac{3}{2} RI^2 \quad \text{I.05}$$

Avec R: résistance entre deux bornes du stator couplé.

- **Les pertes magnétiques ou fer(P_{fs}) :**

Qui ne dépendent que de la tension U et de fréquence f, sont constantes. Le rotor ne reçoit donc que :

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad \text{I.06}$$

Cette puissance est transmise du stator au rotor par le champ magnétique sous la forme d'un couple électromagnétique de moment T qui tourne à la vitesse de synchronisme Ω_s

$$P_{tr} = T \cdot \Omega_s \quad \text{I.07}$$

- **Puissance totale au rotor: P_r :**

Le rotor reçoit le couple électromagnétique de moment T et tourne à la vitesse Ω .

Sa puissance totale est:

$$P_r = T \cdot \Omega \quad \text{I.08}$$

$$T = P_{tr} / \Omega_s = P_r / \Omega \Rightarrow P_r = (\Omega / \Omega_s) P_{tr}$$

$$\text{sachant que : } g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s = 1 - \Omega / \Omega_s \Rightarrow \Omega / \Omega_s = 1 - g$$

$$P_r = (1 - g) P_{tr} \quad \text{I.09}$$

$P_r < P_{tr}$ à cause des pertes rotoriques.

- **Pertes rotoriques :**

- **Pertes magnétiques ou fer :**

Le champ magnétique tourne à la vitesse $\Omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n_s / 60$ et le rotor à la vitesse $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$.

Pour un référentiel lié au rotor, le champ magnétique tourne à la vitesse :

$$\Omega_r = \Omega_s - \Omega = 2 \cdot \pi \cdot (n_s - n) / 60 \quad \text{I.10}$$

Les courants de Foucault induits au rotor ont pour fréquence:

$$f_r = 60 \cdot p \cdot (n_s - n) = 60 \cdot (n_s - n) \cdot n_s / n_s = 60 \cdot p \cdot g \cdot n_s = g \cdot f \quad \text{I.11}$$

On pourra négliger les pertes magnétiques au rotor, car en marche normale, donc f_r est faible.

$$P_{fr} \approx 0$$

- **Pertes par effet Joule :**

Elles ne sont pas mesurables car le rotor est en court-circuit.

$$P_{jr} = P_{tr} - P_r = P_{tr} - (1 - g) P_{tr} = g \cdot P_{tr} = P_{jr} \quad \text{I.12}$$

- **Pertes mécaniques :**

La vitesse de rotation varie peu en marche normale, ces pertes $p_{méc}$ sont pratiquement constantes.

- **Puissance utile :**

Le moteur développe un couple utile de moment T_u en tournant à la vitesse Ω celle du rotor.

$$P_u = T_u \cdot \Omega = P_r - P_{méc} \quad \text{I.13}$$

9. Fonctionnement d'une machine asynchrone :

La machine asynchrone est réversible c'est-à-dire qu'elle peut fonctionner, soit en moteur ou elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice ou elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique contrairement au moteur.

10. Démarrage du moteur asynchrone :

Le courant de démarrage est très important (4 à 8 fois I_n) le courant nominal. Pour ne pas détériorer le moteur, il convient de réduire cet appel de courant par :

- Utilisation de résistances de démarrage.
- Démarrage sous tension réduite.

Pour le démarrage sous tension réduite, nous allons voir :

10.1. Démarrage étoile-triangle :

Lors d'un démarrage étoile-triangle, la machine est d'abord connectée au réseau (source) avec un couplage étoile, quand le démarrage est effectué, on passe en triangle.

Cette méthode consiste à diminuer, le temps de démarrage, la tension d'alimentation.

10.1.1. Couplage étoile :

Symbole : Y

Les 3 enroulements ont un point commun, U2, V2, W2 puis les 3 phases sont branchées aux extrémités U1, V1, W1.

Dans le cas d'un couplage étoile les enroulements sont soumis à la tension simple (V).

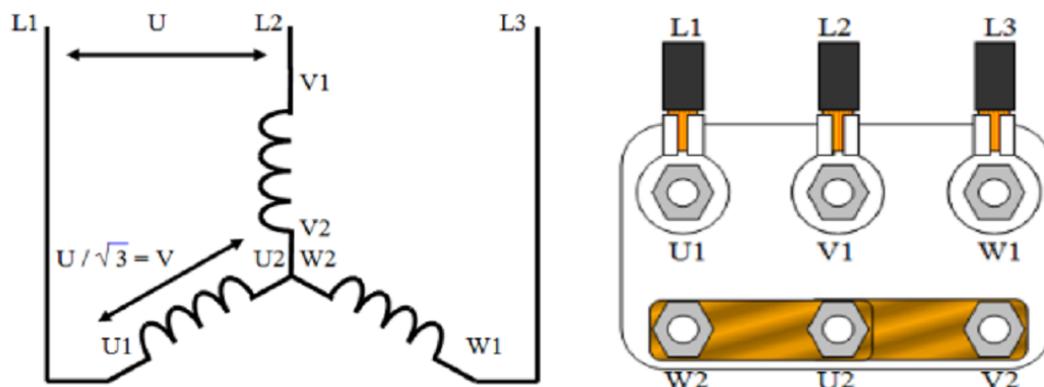


Figure I.11. Présentation de la méthode du couplage étoile.

10.1.2. Couplage triangle :

Symbole : Δ

Les 3 enroulements sont montés en série pour former un triangle puis les 3 phases sont branchées aux sommets du triangle.

Dans le cas d'un couplage triangle les enroulements sont soumis à la tension composée (U).

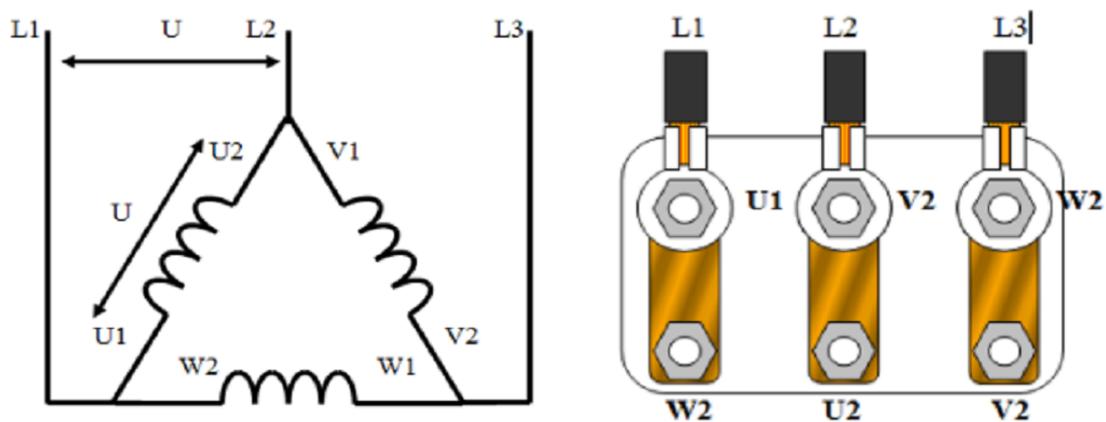


Figure I.12. Présentation de la méthode du couplage triangle.

10.2. Démarrage par autotransformateur :

Cette méthode consiste à augmenter progressivement la tension aux bornes des phases du moteur à l'aide d'un autotransformateur triphasé, et l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée.

- **Liaison avec le réseau EDF :**

La machine (moteur) est reliée au réseau par certains dispositifs de sécurité et de commande :

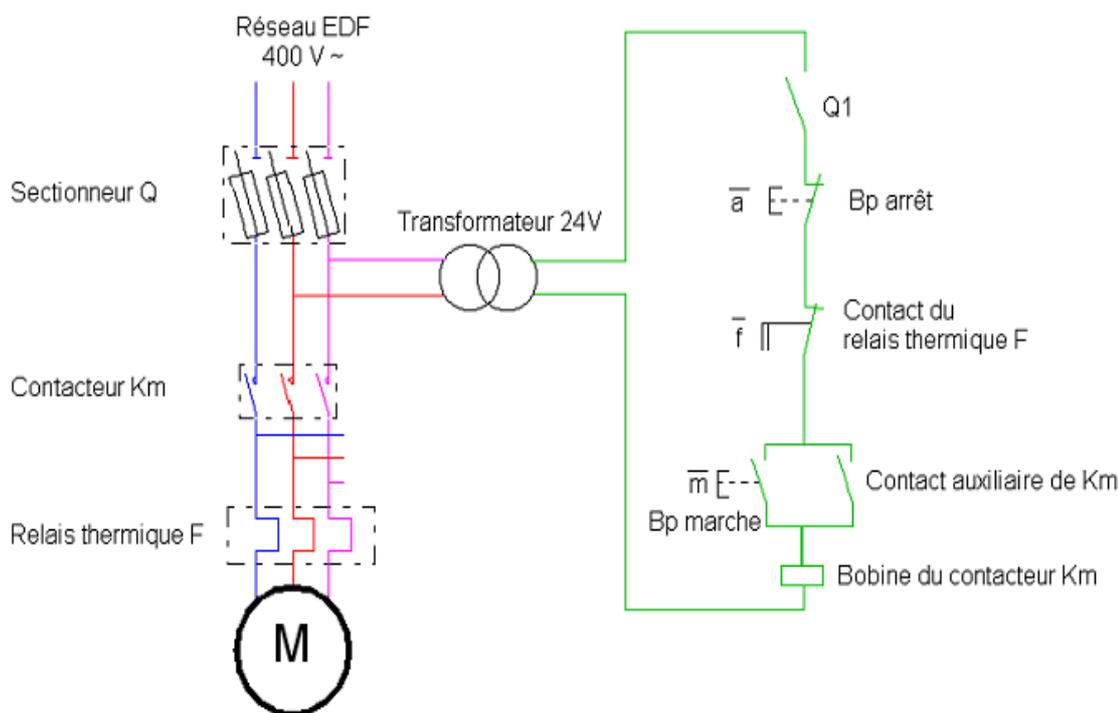


Figure I.13. Présentation de la méthode de liaison avec le réseau.

- Le sectionneur avec fusibles permet de déconnecter le moteur du réseau pour une maintenance. Il le protège également contre les risques de court-circuit grâce aux fusibles.
- Le contacteur permet d'alimenter le moteur par une commande manuelle ou automatique.
- Le relais thermique protège le moteur contre les surcharges de courant.
- Le transformateur abaisse la tension à une valeur de (24 V) pour garantir la sécurité des utilisateurs.

10.3. 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 effectué, on le court-circuite. Cette opération peut être effectuée progressivement par un opérateur à l'aide de rhéostats de démarrage.

Tableau comparatif de deux modes de démarrage des moteurs asynchrones triphasés :

	Démarrage étoile triangle	Démarrage par auto transformateur
Courant de démarrage	33%	40/65/80%
Surcharge en ligne	1.3 à 1.6 In	1.7 à 4 In
Couple en % de Cd	33%	40/65/80%
Couple initiale au démarrage	0.2 à 0.5 Cn	0.4 à 0.85 Cn
avantages	<ul style="list-style-type: none"> → Démarreur simple et économique. → couple au démarrage important 	<ul style="list-style-type: none"> → bon rapport couple/courant. → possibilités de réglages des valeurs au démarrage.
inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> → pointe de courant très importante. → Démarrage brutal. 	<ul style="list-style-type: none"> → nécessite une auto-transformatrice onéreuse. → présente des risques de réseau perturbé.

Tableau I.2. Comparaison entre Démarrage par auto transformateur et Démarrage étoile triangle.

11. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone :

Les avantages et inconvénients du moteur asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">★ La robustesse★ La simplicité de construction★ Leur bas cout★ Un rendement excellent	<ul style="list-style-type: none">★ Non découplage naturel★ Non linéarités

Tableau I.3. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu les généralités sur les machines électriques en particulier la machine asynchrone, sur la quelle on a fait des recherches et une description. On a vu aussi les différentes parties de la machine (mécanique et magnétique).

Introduction :

Electro-industries est une entreprise nationale qui se situe à 30 Km du chef lieu de la wilaya de Tizi Ouzou, génère un chiffre d'affaire de 1.8 milliard de dinars.Elle se compose de deux unités essentielles :

- Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT (URT).
- Unité de fabrication des moteurs électriques et prestation technique (UMP).

Les produits fabriqués par l'entreprise sont conformes aux recommandations CEI aux normes allemandes (DIN/VDE).

La fabrication des moteurs asynchrones triphasés et monophasés à différents types est assurée par l'unité moteurs asynchrones et prestation (UMP).

Avant le lancement de la fabrication des moteurs, les pièces et matières d'achats nécessaires pour leur réalisation sont soumises à divers services de contrôle (section réception marchandises et service laboratoire affilié au service contrôle de l'UMP).

Après cette phase de contrôle, vient le lancement de la production des moteurs suivant le programme de réalisation afin de garantir une bonne qualité du produit.

Les phases de production des moteurs électriques à l'entreprise Electro-industrie se déroulent dans deux bâtiments de l'unité moteurs asynchrones et prestation.

1. Bâtiment 2A :

On trouve dans ce bâtiment les ateliers de découpage,encochage,empaquetage et atelier de fonderie sous pression.

Il existe aussi un atelier pour l'emmanchement de l'arbre dans le paquet rotorique.

Les travaux dans ce bâtiment se réalisent suivant un programme délivré par les constructeurs.

1.1. Le découpage,encochage et l'empaquetage :

L'atelier de découpage,encochage et empaquetage assure la transformation des tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces comme suite :

- 1- Le découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques.
- 2- L'empaquetage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques.
- 3- Le découpage et l'emboutissage des agrafes.
- 4- Le découpage des barres de cuivre.
- 5- La fabrication des capots et les roues de ventilateur.

1.1.1. Fabrication des tôles statorique et rotorique :

Au premier lieu, l'entreprise effectuera l'achat des rouleaux de tôles dans le marché de nature:

- Déjà isolées (les deux faces pour les moteurs de grande puissances et une face pour les petites puissances).

- Non isolées, leur isolation est faite au sein de l'électro-industrie avec des produits chimiques (dans des fours par oxydation), et cela pour les moteurs de petites puissances.

Ensuite les tôles sont envoyées dans le magasin qui se trouve dans l'atelier de fabrication des tôles statoriques et rotoriques à fin de les transformer.

❖ **Les procédés de découpage des feuilles statoriques et rotorique :**

Il existe trois procédés de découpage :

- Découpage automatique successif.
- Découpage automatique par outil à encocher.
- Découpage semi-automatique (unitaire) par outils à encocher.

❖ **Remarque :**

Le découpage automatique successif avec la presse rapide est le procédé le plus utilisé dans cet atelier.

Ce procédé permet de découper et d'encocher dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques pour certains types de moteurs (petites et moyennes puissances) de forte commande.

Après le découpage et l'encochage des tôles statoriques et rotoriques, ils passent vers l'atelier de l'emballage.

1.1.2. Emballage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques :

La réalisation des paquets statoriques et rotoriques se fait à partir de tôles magnétiques à l'aide d'une presse à emballer.

L'ensemble est fixé par des agrafes pour les paquets statoriques à l'aide de rivets ou de circlips pour certains paquets rotoriques non coulés (barres en cuivre).

1.1.3. Découpage des barres de cuivre pour les rotors à cage d'écureuil :

Le découpage des barres de cuivre se fait selon des longueurs appropriées aux types des moteurs, elles sont de nature en cuivre prend des formes plates ou rondes pour le remplissage des encoches rotoriques des moteurs.

❖ **Remarque :**

Les extrémités des barres sont court circuitées à l'aide des anneaux en cuivre.

1.1.4. Fabrication des capots et roues de ventilateurs :

Selon le type de moteur, les capots et les roues sont produits à partir des tôles, soit galvanisées pour des petits moteurs, soit d'acier laminé à froid pour les moyens et grands moteurs.

Les tôles sont découpées sous forme de disque, l'emboutissage se fait avec l'emboutisseuse et les parties planes sont pressées sous forme de grille avec un poinçon matrice.

❖ **Remarque :**

Les ventilateurs sont achetés en plastique pour les petits moteurs et en fonte ou en acier pour les moyens et grands moteurs.

Ces derniers sont achetés brutes avant les adresser à l'usinage.

1.2. Le moulage sous pression :

Dans l'atelier de moulage se fait la fabrication des pièces en aluminium et en alpax (alliage d'aluminium).

En particulier l'injection sous pression de l'aluminium pure dans les encoches rotoriques pour les moteurs de petite puissance ainsi que les carcasses, les boîtes à borne et les flasques.

2. Bâtiment 2 :

Ce bâtiment est décomposé en trois ateliers essentiels :

- Atelier d'usinage.
- Atelier de bobinage et contrôles électriques.
- Plats formes d'essais.

Il comporte aussi un magasin pour le stockage des produits misent en vente.

2.1. L'usinage :

L'usinage se fait dans un atelier indépendant suivant les étapes :

2.1.1. Fabrication des arbres rotoriques :

a. Découpage :

Pour chaque type des moteurs à fabriquer, les arbres rotoriques sont réalisés à l'aide d'une scie mécanique qui découpe des ronds d'acier à des longueurs brutes et spécifique.

b. Centrage et dressage :

Le centrage et le dressage se font par le perçage des trous de centrage, le taraudage et le filage, il se font à l'aide d'une machine à tourner parallèle qui fait la mise en longueur de l'arbre.

c. Tournage :

L'arbre passe par cette étape pour réaliser les cotes fonctionnelles (bouts d'arbre, logements de roulements et la partie conique d'emmanchement).

d. Fraisage des clavettes :

Le fraisage des logements de clavettes se fait à partir des fraises verticales.

e. Rectification :

La rectification se fait à l'aide d'une rectifieuse cylindrique qui rectifie le logement de roulement et les bouts d'arbres.

❖ Remarque :

Une fois l'arbre est prêt, il est envoyé au bâtiment 2A pour l'emmancher dans le paquet rotorique.

2.1.2. Usinage des différentes pièces en fonte et en alpac :

L'entreprise Electro-industrie achète ces différentes pièces en matière brute, ensuite elles seraient mises en plusieurs modifications :

a. Carcasse :

- Usinage de diamètre intérieur de la carcasse à l'aide des tours verticaux, pour les pièces en fonte et tours à commande numérique pour celle en alpac, pour recevoir le paquet statorique.
- Tournage des bords de centrage et mise en longueur pour les pièces en fonte.
- Perçage et taraudage des trous de fixation.

b. Flasques As (côté entraînement), Bs (côté ventilation) :

- Tournage des bords de centrage et du logement de roulement et de sa profondeur (jeux axial).
- Perçage et taraudage des trous de fixation et d'entrée des cables.
- Fraisage des surfaces d'appuis et de fixation.

2.2. Le bobinage :

L'atelier de bobinage est reparti en trois secteurs essentiels :

2.2.1. Préparation d'isolation :

L'isolation est très importante dans l'industrie de fabrication des moteurs électriques, les conducteurs doivent toujours être isolés par mesure de sécurité à fin d'éviter les court-circuits qui déminuent la qualité de la matière, en revanche il apporte le maximum de sécurité aux personnes.

Le constructeur à besoin de matériaux isolants de haute qualité et supportent les effets mécaniques produits par le fonctionnement de la machine.

Touts types d'isolants pour toutes les machines sont préparés dans ce secteur à savoir :

- Caniveaux d'encoches.
- cales de fermeture.
- guaines isolantes.
- séparateurs de phases.
- câble de raccordement.
- les lames intermédiaires.

2.2.2. Préparation des bobines :

Le cuivre est la matière utilisée pour préparer les bobines.

D'abors, le cuivre est contrôlé puis il est transporté au magasin pour être remis aux machines pour la confection des bobines qui se fait par des gabarits montés sur les machines qu'on appelle bobineuses qui ont réglées selon le nombre de spires par faisceaux.

Enfin, les bobines sont prêtes, elles sont retirées de la machine, attachées et envoyées dans le secteur de bobinage.

2.2.3. Bobinage du paquet statorique :

a. Insertion des bobines dans le paquet statorique :

Suivant le schéma de bobinage délivré par le constructeur pour chaque types des moteurs que les bobines sont introduites dans le paquet statorique, déjà isolé avec des caniveaux d'encoches.

Le bobinage à double couches nécessite les lames intermédiaires et les cales de fermeture pour éviter les court-circuits entre les faisceaux insérés dans la même encoche, alors que les séparateurs de phase sont insérés pour éviter les court-circuits entre phases.

Après cela on procède à la formation des têtes des bobines manuellement avec un mandrin et un marteau (maillet) pour respecter l'homogénéité et les dimensions des têtes des bobines sur les côtés AS et BS.

b. Connection des bobines :

Les bobines de chaque phase sont liées entre elles de façon précise selon le schéma de bobinage afin d'obtenir trois grands enroulements, chacun d'eux à une entrée et une sortie, ces derniers sont connectés et soudés à des câbles de raccordement qui assurent la liaison électrique avec la boîte à borne.

Les bobines sont reliées en série ou en parallèle selon le besoin de client.

Dans le cas des petits et moyens moteurs, l'entrée et la sortie de chaque phase sont distinguées des autres avec des couleurs :

Phase U: orange

Phase V: noire

Phase W: rouge

Ou bien elles sont définies par des indices (U1,V1,W1),(U2,V2,W2).

❖ Remarque :

Pour un observateur situé en face des connections, l'entrée des phases sont situées à droite, les sorties à gauche.

c. Fretage et pressage des cables:

Cette étape se fait manuellement à l'aide d'un fil isolant, donc le stator subit un fretage, ensuite le stator passe à la presse hydraulique pour donner la forme et les dimensions définitives des têtes du paquet de deux côtés.

2.2.4. Contrôle électrique :

Cette opération consiste à contrôler s'il n'y a pas de court-circuit entre spires, entre phases et court-circuit à la masse.

Elle consiste aussi à mesurer la résistance ohmique de chaque phase et les comparer à la résistance de consigne.

Enfin, le contrôle de polarité des trois phases, c'est-à-dire vérifier le nombre de pôles et le sens de rotation.

❖ Remarque :

Avant d'entamer cette étape, il existe un contrôle visuel dont on vérifie les isolants et le fretage des têtes et la taille des têtes des bobines.

2.2.5. Résinage :

Dans ce secteur on met de la résine au bobinage du stator pour le rendre plus solide et impacte.

La méthode suivie est l'impregnation dans un bain de résine, puis séché dans le four à 150°C, ensuite on passe au nettoyage du paquet bobiné imprégné après refroidissement.

L'impregnation se fait de goutte à goutte pour les petits moteurs.

Le stator est prêt à être monté, maintenant il transite au magasin de stockage intermédiaire.

2.3. Le montage :

Cet atelier est reparti en trois secteurs, chaque secteur assure une tâche spécifique :

2.3.1. Equilibrage du rotor :

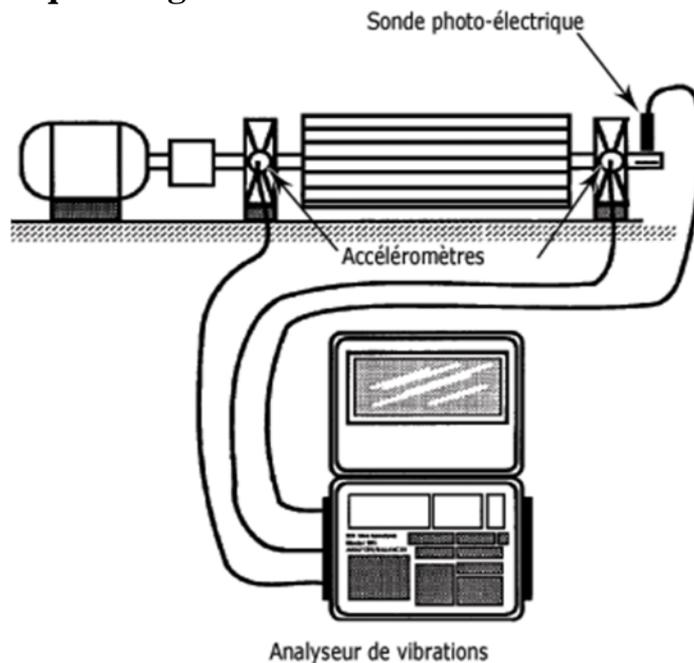


Figure II.1. Présentation des utiles d'équilibrage du rotor.

Cette opération consiste à vérifier le rotor dans le but d'assurer une rotation uniforme de ce dernier et détecter les défauts et compenser les balourds provenant des défauts d'usinage, malformation des barres de cuivre et manque d'homogénéité de la machine. Ces balourds provoquant une rapide usure des roulement à billes.

Le réglage et rétablissement de l'équilibrage s'effectue par :

- Arrachement de la matière en plus pour les cages en cuivre.
- Assemblage des rondelles plates sur les anneaux de court-circuits pour les cages en aluminium.

Avant d'envoyer le rotor au magasin intermédiaire, l'opération s'achève par une couche de peinture antirouille.

2.3.2. Pré-montage :

Dans ce secteur se fait l'emmanchement du paquet statorique dans la carcasse à l'aide d'une presse avec la mise en longueur et tournage des bords de centrage de la culasse (côtés As et Bs), et pour faciliter cette tâche il est préférable de huiler l'intérieur de la carcasse.

Cette étape se termine par fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe et peinture du diamètre extérieur du stator avec une peinture antirouille.

2.3.3. Montage :

Le montage se déroule en plusieurs étapes comme suite :

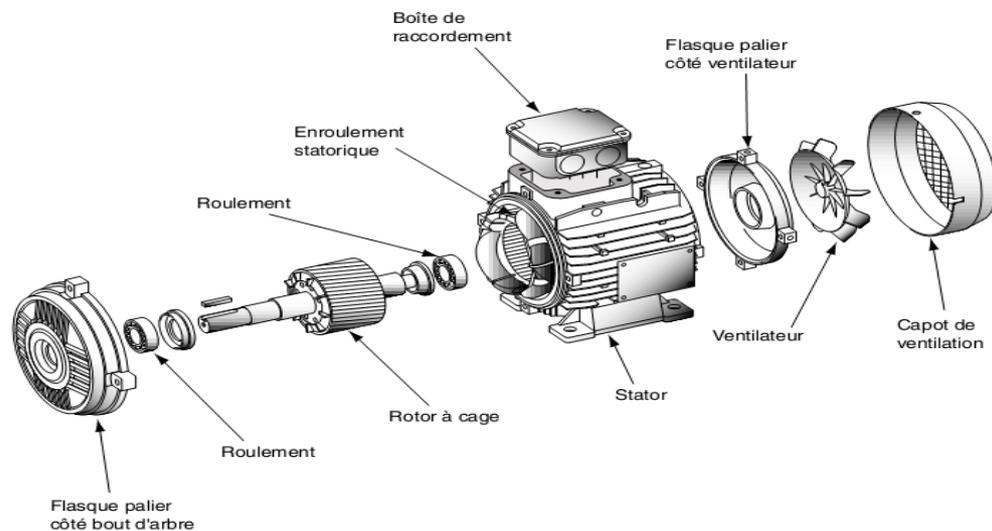


Figure II.2. Présentation du processus de montage d'un moteur asynchrone.

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

Maintenant que le montage est terminé, le moteur sera mener aux plates fomes d'essais. [1]

2.4. Plates formes d'essais :

Dans cet atelier, on effectue des essais sur les moteurs fabriqués dans le but de contrôler et de juger la qualité du moteur en comparant les différentes valeurs relevées lors des essais à celles données par le constructeur, ils permettent de détecter les défauts d'origines mécaniques et électriques.

On prélève un échantillon sur lequel on effectue différents essais mécaniques et électriques pour chaque série de moteur pour évaluer les performances du moteur et identifier les défauts au cours des différents essais.

Les essais des moteurs s'effectuent sur deux plates formes :

- Essais séries.
- Essais spéciaux.

2.4.1. Essais séries :

Les essais à vide, en court-circuit et à haute tension (2000 V) s'effectuent sur les moteurs pour mesurer la résistance des enroulements statorique entre l'entrée et la sortie de chaque phase à l'aide d'un ohmmètre, ainsi que le contrôle visuel pour objectif de contrôler le bon montage du moteur (vis, plaque signalitique, liberté du rotor, raccordement des fils).

Les essais permettent aussi de détecter des bruits électriques et mécaniques.

[1]

a. Essai à vide :

Dans ce cas, le moteur est alimenté sous une tension nominale U_n , on mesure :

- Le courant à vide I_0
- La puissance à vide P_0
- Le facteur de puissance à vide $\cos \dots$

Cet essai assure le contrôle des bruits électriques et mécaniques qui s'effectue à l'aide d'un sonomètre ou d'un tournevis que l'opérateur déplace sur différentes parties externes du moteur pour écouter et distinguer les bruits étranges.

b. Essai en court-circuit à rotor bloqué :

Sous un courant nominal I_n , on alimente un moteur à rotor bloqué et on mesure :

- La puissance en court-circuit P_{cc}
- La tension en court-circuit U_{cc}
- Le facteur de puissance $\cos \dots$

Les résultats obtenus vérifient le bon fonctionnement du rotor.

c. Essai à haute tension :

Cette opération s'effectue à 2000V, pour objectif de contrôler les courts-circuits dans les enroulements et vérifie la bonne isolation entre phases, entre phase et la masse.

2.4.2. Essais spéciaux :

Les essais faits dans cette plate forme sont effectués pour mesurer la résistance des enroulements et la comparer à la résistance de consigne (elle ne doit pas dépasser 5% de R_n). Ils permettent aussi de mesurer la résistance entre phases et les comparer entre elles (la tolérance est de 3% entre les résistances R_{uv}, R_{vw}, R_{uw}).

La valeur de la résistance consigne est donnée pour une température de 20°C donc elle pourra changer en fonction de la température ambiante.

❖ Exemple :

Pour une température de 20°C, la résistance $R_n = 8.8 \Omega$.

$$\text{A } 35^\circ\text{C : } R_n = \frac{235+35}{235+20} * 8.8$$

$$R_n = 9.31 \Omega$$

Dans cette plate forme un autre essai se fait, il s'agit de l'essai en charge, appelé aussi essai d'échauffement, il s'effectuera pour juger la bonne tenue de la classe d'isolation du moteur et de déterminer la température limite à la puissance nominale, on prélève donc la température de la carcasse à froid.

❖ Remarque :

Si le moteur tourne sous sa tension nominale, il s'échauffe et 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 dure jusqu'à ce que la température limite de la carcasse soit atteinte et stabilise, à ce moment précis, toutes les données électriques et mécaniques sont prélevées ($I_n, N, \cos \phi, \text{rend}$) et les comparer à la plaque signalétique.

2.4.3. Autres essais :

Ils sont des essais supplémentaires, se font sur les moteurs en cas de modification des matières ou en cas de nécessité (anomalie). Aussi ces essais se réalisent pour des prototypes.

a. Essai de freinage :

Cet essai se réalise avec une machine qui s'appelle la dynamofrein. Il permet de voir la capacité du moteur à supporter les surcharges pendant un temps précis sans décrocher.

b. Essai des tensions en charges :

Dans cet essai, le moteur fonctionne en charge à sa valeur nominale, en donnant à son bout d'arbre sa puissance utile nominale puis on procède à la variation de la tension tout en maintenant la puissance utile constante, en agissant toujours sur les poids.

A chaque valeur de la tension on prélève :

- la vitesse.
- le courant absorbé.
- la puissance absorbée.
- le facteur de puissance.
- le rendement.

Cet essai nous guide à trouver la valeur optimale de la tension, celle qui donne les meilleurs paramètres de marche du moteur, et les comparer à ceux prévus sur la plaque signalitique.

Après que le produit est passé par ses essais, s'il est juger bon, il transit à la peinture antirouille puis à l'emballage pour le livrer. [1]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montrer toutes les étapes de fabrication du moteur asynchrone à cage d'écureuil à l'entreprise Electro-industrie. Dans ce qui suit nous allons voir tous les matériaux utilisés pour la réalisation de ces moteurs.

Introduction :

Les machines électriques et les matériaux qui les constituent évoluent et leurs applications industrielles se diversifient. Bien connaître les caractéristiques et les usages de chaque matériau est essentiel pour répondre aux cahiers des charges toujours plus exigeants des secteurs d'application des matériaux.

1. Classification :

Les matériaux peuvent être classés en quatre groupes selon leur fonction :

- Les matériaux conducteurs pour véhiculer le courant électrique.
- Les matériaux magnétiques pour canaliser l'induction magnétique.
- Les matériaux isolants pour isoler les conducteurs électriques.
- Les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication des interrupteurs électronique de puissance.

Dans notre chapitre, on s'intéressera qu'aux matériaux : conducteurs, magnétiques et isolants.

2. Matériaux conducteurs :

Un conducteur électrique est un matériau qui laisse circuler le courant électrique. Les matériaux conducteurs ne conduisent pas de la même manière. La conductivité dépend de la nature des matériaux aussi de leurs tailles. Plus que la section d'un matériau est grande, mieux il conduit le courant électrique.

❖ Remarque :

Plus la résistance d'un matériau est élevée et moins il conduit le courant électrique.

2.1. Bons conducteurs :

Certains matériaux offrent une faible résistance au passage du courant, ce sont des matériaux bons conducteurs.

De tous les solides, l'argent est le meilleur conducteur d'électricité mais, en raison de son coût prohibitif, son usage est très rare.

Dans les applications générales, le matériau le plus employé est le cuivre. On utilise les conducteurs d'aluminium pour les lignes de transport d'énergie.

2.2. Formes des conducteurs :

Les conducteurs électriques ont plusieurs formes selon leurs applications dans l'industrie, on les rencontre sous formes :

- Fils de section ronde, carrée ou plate.
- Câbles toronnés.
- Barres.

Les fils rond obtenus directement par tréfilage, ils représentent la majorité des conducteurs.

Les fils bons conducteurs de section carrée et rectangulaire employés pour les enroulements des moteurs et génératrices permettent une meilleur utilisation du volume des encoches.

Les barres de métal constituant la cage d'écureuil du rotor d'un moteur asynchrone étant court-circuitées par deux anneaux à leurs extrémités. Le champ tournant engendre alors une tension alternative dans ces barres de métal, cette tension induite fait circuler des courants intenses (courant de Foucault).

2.3. Propriétés :

Dans notre étude, on s'intéressera qu'aux propriétés nécessaires en électrotechnique.

2.3.1. Propriétés physique et chimique :

a. Propriétés physique :

- **La masse volumique :**

C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau, on l'exprime par kg/m^3 ou bien g/cm^3 .

- **Point de fusion :**

Un matériau à l'état solide passe à l'état liquide, toujours à la même température, il est exprimé en degré Celsius.

- **Dilatation :**

Une barre chauffée s'allonge d'autant qu'elle est portée à une température plus élevée.

On définit le coefficient de dilatation α pour chaque matériau comme suite :

Connaissant la longueur d'une barre à 0° C, on peut déterminer sa longueur à une température T° par la relation suivante :

$$L_T = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \text{III.01}$$

L_T : Longueur à T °C.

L_0 : Longueur à 0 °C.

ΔT : Différence de température entre 0° et T°.

- b. Propriétés chimiques :**

L'oxydation est une réaction chimique dans laquelle un composé se combine avec un ou plusieurs atomes d'oxygène.

- ❖ **Exemple :**

Oxydation du fer qui produit la rouille :



L'oxydation attaque la plus part des métaux, ces derniers sont sensible aussi aux acides, alors que d'autre matières sont insensible aux agents chimique comme les matières plastiques.

2.3.2. Propriétés mécaniques :

- a. Résistance à la traction :**

La résistance à la traction correspond à la capacité d'un matériau à résister à des charges, à des forces sans rompre en raison d'une concentration de contrainte ou de déformation. [6]

b. Diagramme de traction :

Il s'agit d'un diagramme contrainte-déformation sur lequel on porte la contrainte en ordonnée et la déformation relative ou l'allongement en abscisse.

Le diagramme de traction présente deux zones :

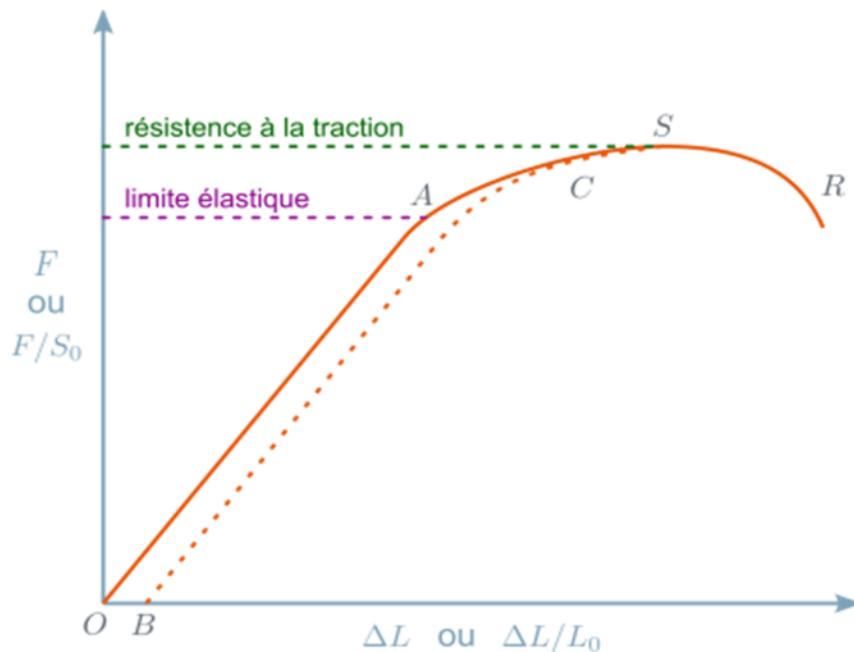


Figure III.1 : Allongement d'un matériau en fonction de la force de la traction.

Sur cette courbe, on indique deux zones essentielles :

- **Partie O-A :**

C'est la zone des déformations élastiques, dans cette zone l'allongement est faible et proportionnel à la contrainte. Si la sollicitation cesse, le matériau reprend sa forme initiale.

- Le point A correspond à la limite élastique.

- **Partie A-S :**

À cette zone, l'allongement est important. Si la force appliquée sur l'objet s'annule, le matériau ne reprend pas sa position initiale.

- Le point S : correspond à la limite de résistance à la traction.
- Le point R : le matériau se rompt, c'est-à-dire la charge de rupture a été atteinte.

c. Résistance à la rupture :

La résistance à la rupture d'un matériau est le rapport de la force maximal applicable (en N) par la section de l'objet (en mm²).

$$Rr = \frac{Fm}{S} \quad \text{III.03}$$

Rr : Résistance à la rupture en Pa.

Fm : La force maximal exercée en N.

S : La section du matériau en m².

2.3.3. Propriétés électriques :**❖ Résistance d'un conducteur :**

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

- Sa longueur
- Sa section
- La résistivité de la substance qui le constitue.

La relation entre la résistance et les trois facteurs énumérés donne la relation suivante :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \text{III.04}$$

R : Résistance du conducteur en Ohms (Ω).

ρ : Résistivité de la substance en Ohm-mètre ($\Omega \cdot m$).

l : Longueur du conducteur en mètre (m).

S : Surface du conducteur en mètre carré (m²).

La résistivité d'un conducteur électrique représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique, il varie suivant la nature de la substance dont est constitué le conducteur.

2.3.4. Caractéristiques et applications :

Le tableau suivant présente les caractéristiques des matériaux conducteurs les plus connus et leurs application dans l'industrie :

Désignation et composition	Masse volumique (kg/m ³)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C)	Résistivité à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coefficient de température (10 ⁻⁴ /°C)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté (H.B)
Cuivre Cu	8.9	1085	400	17	1.7	39	25 à 30	10 à 40	50 à 90
Aluminium Al	2.7	660	222	23	2.8	43	80 à 170	1 à 45	15 à 45
Fer Fe	7.9	1540	75	12	9.7	55			
Argent Ag	10.5	960	408	20	1.6	38	157		55
Or Au	19.3	1064		19	2.1	30			36
Etain Sn	7.3	232	27		11.5	43	80		
Plomb Pb	11.3	327	35	29	21	42	50		

Tableau III.1. Les caractéristiques des matériaux conducteurs. [4]

a. Cuivre :

C'est un bon conducteur. Malléable (laminage, filage....).

Pure ou faiblement allié :

- Fils.
- Câbles.
- Barres.
- Lames collecteur.
- Bagues de moteur.
- Appareillages en alliages.

b. Aluminium :

C'est un conducteur très léger. Protégé par la faible couche d'aluminium qui se forme à sa surface.

Très malléable (moulage, laminage, filage, usinage.....).

- Câbles.
- Câbles aériens.
- Barres.
- Cage de moteur.

c. Fer :

C'est un conducteur facilement oxydable, magnétique.

Grand nombre d'alliages.

- Matériau magnétique.
- Résistances.

d. Argent :

C'est un conducteur à excellentes propriétés électriques.

Grande résistance à l'oxydation.

- Contact électrique.
- Fusibles.

e. Or :

C'est un conducteur de métal rare.

Inaltérable et inoxydable.

- Câblage microélectronique.
- Contacts.

f. Etain :

C'est un conducteur à faible température de fusion. Allié au :

- cuivre dans les laitons.
- Plomb pour les soudures électriques.

g. Plomb :

C'est un conducteur mou, ductile et malléable.

Bonne résistance à la corrosion. Toxique.

- Batteries.
- Soudures électriques.
- Armures de câbles électriques.

2.3.5. Caractéristiques des alliages métalliques conducteurs :

Désignation et composition	Masse volumique (kg/m ³)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Coefficient dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C)	Résistivité à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coefficient de température (10 ⁻⁴ /°C)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté (H.B)
Laitons Cu+15% à 40% Zn	≈ 8	≈ 940		18	6.5	10	300 à 600	10 à 45	50 à 80
Bronzes Cu+10%Sn+Zn Cu+10%Al+Zn	≈ 9	900		17	12 à 15	5	200 à 240	5 à 20	60 à 70

Tableau III.2. Les caractéristiques des alliages métalliques conducteurs. [4]

2.3.6. Propriétés et applications:**a. Laitons:**

Il est Résistant à l'oxydation. Usinage.

- Petites pièces de matériels électriques.
- Cosses.
- Douilles.
- Culots.
- Raccords.

b. Bronzes:

Il est utilisé pour le moulage.

- Pièces moulées.
- Pièces frottantes.
- Collecteurs.
- Portes balais.

3. Matériaux magnétique :

Le principe de fonctionnement des machines électriques est basé sur la production d'un champ magnétique c'est-à-dire lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, il y a apparition des phénomènes magnétiques qui peuvent être caractérisé par les champs de vecteur appelés \vec{H} ou \vec{B} .

- \vec{H} : champ d'excitation magnétique, son unité est Ampère par mètre (A /m).
- \vec{B} : induction magnétique, son unité est Tesla (T).

La présence du champ magnétique influence de manière plus au moins complexe sur les matériaux magnétique qui sont destinés à conduire et canaliser le flux magnétique, puis le transporter du lieu de production (inducteur) vers lieu d'utilisation (induit) avec minimum de pertes possible.

3.1. Définition des matériaux magnétique :

Chaque matériau est caractérisé par une excitation magnétique (H), c'est le siège d'une induction magnétique (B), lorsqu'on augmente l'excitation H dans une bobine munie d'un noyau magnétique, l'induction B varie selon une courbe appelée courbe de première aimantation, représentée sur la figure III-1

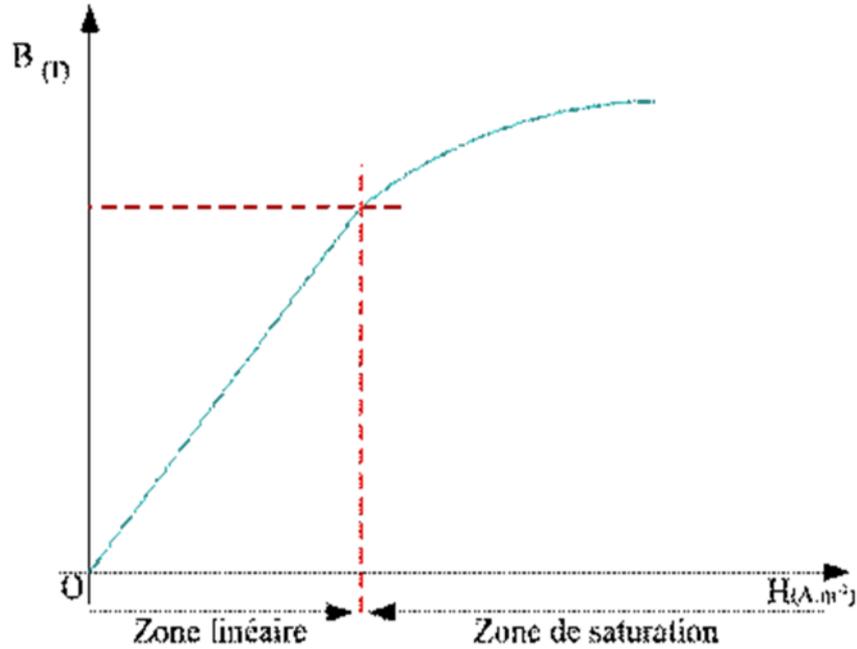


Figure III-2 : courbe de première aimantation

3.2. Les relations et les lois de l'électromagnétisme :

3.2.1. Excitation magnétique :

Pour un conducteur de longueur l :

$$H = \frac{N \times I}{l} [\text{A/m}] \quad \text{III.05}$$

H : en ampère par mètre.

$N \cdot I$: en ampère-tour.

l : en mètre.

3.2.2. Induction magnétique :

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l} [\text{T}] \quad \text{III.06}$$

B : s'exprime en Tesla.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: est la perméabilité magnétique de l'air.

3.2.3. Relation entre l'excitation et l'induction magnétique dans l'air :

$$B_0 = \mu_0.H$$

III.07

3.2.4. La perméabilité magnétique :

Elle se mesure par H/m, elle représente la facilité que possède un matériau à canaliser le champ magnétique.

Les matériaux magnétiques ne sont pas tous aussi perméable les uns que les autres, par exemple la perméabilité du l'acier est supérieure à celle de fer doux, on dit que l'opposition(ou réluctance) au passage des lignes de force pour le fer doux sera donc plus grande.

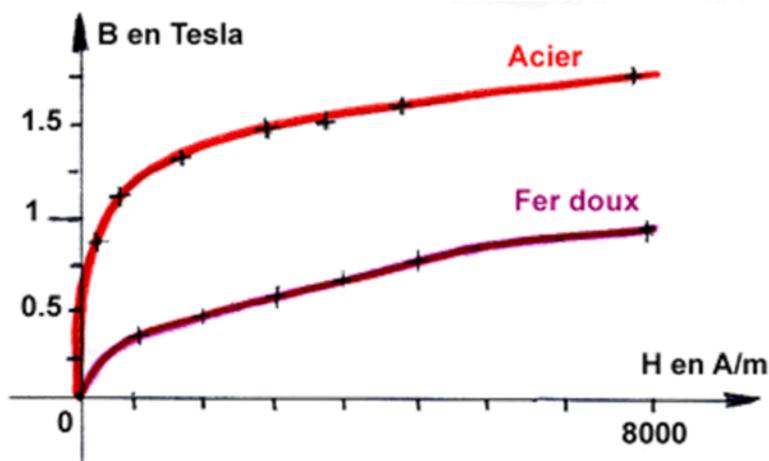


Figure III-3 : courbe d'aimantation de deux matériaux magnétiques.

3.2.5. Hystérésis magnétique :

Dans un matériau magnétique, les domaines tendent à garder leurs orientations. En effet, par une réaction semblable au frottement, les domaines s'opposent à tout changement d'orientation imposé par un champ extérieur ; de même, une fois orienté, ils essaient de garder leur orientation en s'opposant de nouveau à tout autre changement. Ce phénomène qu'on appelle hystérésis. [5]

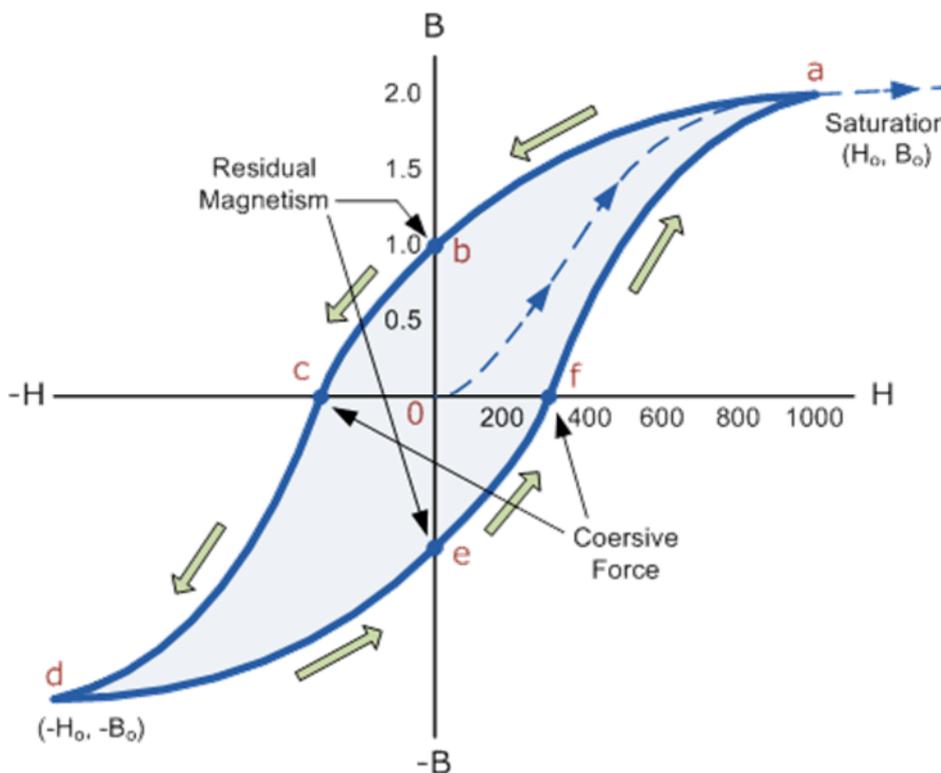


Figure III-4 Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique.

3.3. Classification magnétiques des matériaux :

Nous pouvons caractériser un matériau par son vecteur aimantation qu'on note M relié à H par la relation suivante : $M = \chi \cdot H$ III.08

- χ : susceptibilité magnétique

Aussi la susceptibilité est reliée à la perméabilité par la relation : $\mu r = 1 + \chi$.

Selon la susceptibilité magnétique, les matériaux peuvent être classés en :

3.3.1. Matériaux diamagnétiques :

Ce sont des substances qui s'aimantent très faiblement en sens inverse du champ magnétique.

- Caractérisés par une susceptibilité χ négative, de faible amplitude et indépendante de la température et de l'intensité du champ magnétique excitateur.
- On les rencontre dans les substances ayant des atomes sans moment magnétique permanent.

- L'application d'un champ magnétique extérieur produit couple qui s'agisse sur le mouvement (déplacement) orbital des électrons. Ce dernier provoque un moment magnétique $\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{M} = \mathbf{0} \\ \mathbf{H} > 0 \rightarrow \mathbf{M} < 0 \end{cases}$ de direction opposé au champ extérieur. [4]

❖ **Exemple :**

Cu, Zn, Ag, Pb....

3.3.2. Matériaux paramagnétiques :

Ce sont des métaux qui s'aimantent dans le sens du champ magnétique comme les métaux ferromagnétiques, mais leur induction reste faible par rapport au champ, leurs perméabilité relative est constante et très légèrement supérieure à 1.

- Caractérisés par une susceptibilité χ positive, de faible amplitude (10^{-6} à 10^{-2}).
- On les rencontre dans les substances ayant des atomes possèdent un moment magnétique permanent, lorsque ces moments sont indépendants les uns les autres.
- Sous l'action d'un champ magnétique ces moments tendent à s'aligner selon la direction du champ appliqué H , ce qui fait augmenter l'aimantation M du matériau $\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{M} = \mathbf{0} \\ \mathbf{H} > 0 \rightarrow \mathbf{M} > 0 \end{cases}$. [4]

❖ **Exemple :**

Na, Al, U, Pt....

3.3.3. Matériaux ferromagnétiques :

Ce sont des matériaux qui s'aimant fortement en présence d'un champ magnétique, peut prendre une valeur élevée. D'autre part, ces matériaux peuvent conserver leurs aimantations après annulation du champ magnétique (aimant permanent).

- Caractérisés par des susceptibilités très élevées, elles peuvent atteindre jusqu'à $+10^6$ pour certains.

- Leurs comportement résultent de l'alignement de moments magnétiques permanents, ces moments sont orientés parallèlement les uns aux autres par une interaction d'échange appelée « couplage ferromagnétique ».
- L'aimantation maximale « aimantation à saturation » est obtenue lorsque tous les moments magnétiques sont alignés avec le champ appliqué.

A cette aimantation à saturation correspond une « induction à saturation » tel que :

$$\mathbf{B}_s \approx \mu_0 * \mathbf{M}_s \text{ avec } \mathbf{M}_s = \mathbf{m}_a * \mathbf{N} \quad \text{III.09}$$

\mathbf{m}_a : le moment magnétique par atome.

\mathbf{N} : le nombre d'atomes.

- La perméabilité des matériaux ferromagnétiques varie de façon importante avec l'induction et dépend du passé magnétique avec des valeurs différentes (cycle ou phénomène d'hystérésis).
- Les métaux ferromagnétiques sont très utilisés en électrotechnique, principalement le fer et ses alliages, pour la construction des circuits magnétiques des machines électriques. [4]

❖ **Exemple :**

Le fer (Fe), le Cobalt (Co), le Nickel (Ni), quelques terres rares.

On trouve aussi d'autres matériaux comme :

3.3.4. Matériaux antiferromagnétiques :

- Ces matériaux présentent une susceptibilité positive faible.
- Leurs atomes portent des moments magnétiques permanent, ces derniers sont fortement liés les uns les autres c'est-à-dire ne sont plus indépendants.

❖ **Exemple :**

MnO, MnS, NiCr, FeS₂...

3.3.5. Matériaux ferrimagnétiques :

Ces matériaux sont d'une classe d'oxydes appelés *ferrites*.

- Le fort couplage antiferromagnétique existant entre les deux familles de sites A et B provoque une aimantation M même en absence d'un champ magnétique appliqué.
- Les deux sites A et B possèdent des moments magnétiques m_A et m_B tel que leurs nombres différent le plus souvent $m_A \neq m_B$. [4]

3.4. Type des matériaux magnétiques :

La taille et la forme du cycle d'hystérésis pour les matériaux magnétique (ferromagnétique et ferrimagnétique) est d'une importance, tel que la surface du cycle représente une perte magnétique par unité de volume du matériau et par cycle (magnétisation - démagnétisation). Cette perte d'énergie se manifeste sous forme de chaleur dissipée.

Selon la taille et la forme du cycle d'hystérésis, les matériaux magnétiques sont classés en deux (02) catégories :

3.4.1. Matériaux doux :

Les matériaux magnétiques doux ceux dans lesquels le champ coercitif est faible inférieur (<1000 A/m). Ces matériaux présentent peu de défauts dans leur structure cristalline.

Ils sont caractérisés par :

- Une très haute perméabilité.
- Une induction à saturation élevée.
- Un faible champ coercitif.
- Des faibles pertes par hystérésis (faible surface du cycle).

❖ Applications des matériaux doux :

On utilise un matériau magnétique doux lorsque celui-ci doit canaliser un flux magnétique variable à hautes fréquences. Ces matériaux sont utilisés dans :

- Les noyaux (circuits magnétiques) des transformateurs, des moteurs et des générateurs.
- Les inductances de précision des circuits électroniques.
- Les écrans magnétiques....

Dans ce qui suit un tableau regroupe quelques matériaux magnétiques doux les plus utilisés et leurs propriétés :

Matériau	Composition (%)	Perméabilité maximale (μ_r)	Induction rémanente B_r (T)	Champ coercitif H_c (A/m)
Fer pur		5000	2.0	80
Fe-Si	4Si (non orienté)	8000	1.4	56
	4Si (orienté)	50 000	1.2	7.2
16 Alfenol	Fe-16Al	80 000	0.4	3.5
Ni-Fe	Ni-50Fe (non orienté)	70 000	0.8	4
	Ni-50Fe (orienté)	10^5	1.45	0.8 à 1.6
Permalloy	Ni-22Fe	10^5	0.87	0.6
Supermalloy	Ni-15Fe-5Mo-0.5Mn	10^6	0.7	0.4

Tableau III.3. Présentation des matériaux magnétiques doux les plus utilisés. [4]

3.4.2. Matériaux durs :

Les matériaux magnétiques durs ceux qui sont caractérisés par :

- Un champ coercitif élevé (généralement >10 kA/m).
- Une induction rémanente élevée.
- Un large cycle d'hystérésis.

❖ Applications des matériaux durs :

On utilise ces matériaux lorsque le champ magnétique engendré par le matériau doit rester stable et élevé si possible.

Ils sont utilisés dans les :

- Aimants permanents.
- Aimants de levage.
- Noyaux de haut-parleurs.
- Moteurs électriques de faible puissance.

Dans ce qui suit un tableau regroupe quelques matériaux magnétiques durs les plus utilisés et leurs propriétés :

Matériau	Composition (%)	Champ coercitif H_c (10^3 A/m)	Induction rémanente B_r (T)	Facteur mérite $(BH)_{max}$ (KJ/m^3)
Acier au carbone	0.6C-0.85	3.3	1	1.44
	1C-0.5Mn (trempé)	4	0.95	1.60
Acier au chrome	0.9C-3.5Cr-0.3Mn	5.2	0.97	2.3
Acier au cobalt	0.7C-17Co-8W-2.5Cr	11	0.95	5.2
Ferrox dur (fritté)	Ferrite ($BaO.6Fe_2O_3$)	120	0.2	7.3
Ferrox dur (orienté)	Ferrite ($BaO.6Fe_2O_3$)	240	0.4	24
Nd-Fe-B (fritté)	$Nd_2-Fe_{14}-B$	848	1.16	255

Tableau III.4. Présentation des matériaux magnétiques durs les plus utilisés. [4]

3.5. Composition des tôles Fe-Si à grains non-orientés :

Les alliages Fe-Si actuels en tôles à grain non orientés contiennent de 0.1% à 3.2% de silicium.

L'ensemble des considérations techniques (niveau des pertes, facilité de découpage...) ou économique a conduit à proposer, suivant l'application, deux classes de tôles de composition voisines, mais de présentation sensiblement différente.

3.5.1. Tôles semi-finies :

Elles sont livrées à l'utilisateur à l'état non traité. Ces tôles correspondent souvent à des nuances moins chargées en silicium et dans des épaisseurs plus fortes. Elles sont utilisées principalement dans les petits moteurs à fonctionnement intermittent.

Ces tôles après découpage en pièces doivent être recuites par l'utilisateur dans des chaudières à 720°C-800°C pendant 5 à 10 minutes. Ce recuit se termine sous atmosphère oxydante qui développe un film d'oxyde suffisant pour isoler les tôles entre elles.

3.5.2. Tôles finies :

Elles sont livrées à l'utilisateur prêtes à l'emploi. Elles possèdent toutes leurs caractéristiques magnétiques et il n'est pas nécessaire de les s'émettre à un traitement thermique. Elles ont été également revêtus d'une fine couche isolante sur chaque face.

❖ Remarque :

Le type d'isolant et l'épaisseur de la tôle dépendent de la machine à construire. Pour fabriquer des tôles à grains non orientés, le laminage à froid permet d'avoir des tôles avec une grande régularité au niveau de l'épaisseur, et un excellent état de surface qui permet d'obtenir un bon coefficient de remplissage des circuits magnétique.

4. Matériaux isolants :

Les isolants sont des matériaux ayant une résistivité très élevée (10^6 à $10^{18}\Omega.m$), car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Les isolants sont des matériaux destinés à isoler les pièces actives dans les machines électriques, pour des raisons, les matériaux utilisés doivent avoir une bonne rigidité diélectrique et une bonne tenue à la chaleur.

Ces matériaux sont utilisés pour protéger les utilisateurs de l'énergie électrique.

Il y a différents types d'isolants qui sont classés selon les applications en (solide, liquide ou gaz) et selon l'environnement dans lequel ces dispositifs seront placés.

4.1. Matériaux isolants usuels :

4.1.1. Silicone :

Matière plastique mais avec du silicium à la place du carbone.

4.1.2. Mica :

Silicate alumino-potassique.

4.1.3. Micanite :

Aggloméré de mica et de gomme-laque.

4.1.4. Verre :

Solide amorphe obtenu par fusion à base de silicate et de silice additionné de : potasse, soude, chaux et d'éléments divers.

4.1.5. Email :

Enduit vitreux (à base de silice, de potasse et d'oxydes métalliques) appliqué à froid sur verre ou métal et fixé après fusion.

4.1.6. Céramique :

Nom commun donné au mélange d'argiles (silicate d'aluminium) plus ou moins pures avec d'autres substances (sable, craie, quartz qui est un cristal de silice pure SiO_2).

4.1.7. Huile minérale :

Par opposition à huile végétale, il vaudrait mieux dire huile organique, produit visqueux organique, extrait du pétrole ou synthétisée. Certaines ont des qualités isolantes.

4.1.8. Plastique :

Colloïde à très grosses molécules malléables à chaud et durcissant à froid.

❖ Remarque :

Les isolants électriques possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes :

- Mauvaise tenue en température inférieure à 200°C en général (sauf pour le verre et le mica).
- Rigidité diélectrique élevée ($\approx 10\text{kV/mm}$).
- Très forte résistivité électrique ($> 10^6\Omega.m$).
- Constante diélectrique relative $\epsilon_r > 1$ (≈ 2 à 8).
- Mauvaise conductivité thermique (isolant thermique).
- Solide, liquide ou gaz.
- Densité voisine de 1.

4.2. Classification des matériaux isolants :

Plusieurs méthodes peuvent être adoptées pour classer les isolants :

4.2.1. En fonction de la tenue en température :

La norme **NFC 51-111** définit des classes d'isolants selon leur tenue en température, qui dépend de la matière isolante, mais aussi des matières d'agglomérations et d'imprégnation.

Dans ce qui suit un tableau de classification des matériaux isolants en fonction de la température :

Classe	Matières Isolantes	Matières d'agglomération	Matières d'imprégnation
Y 90°C max	Coton, papier, bois, polyéthylène, PVC, caoutchouc		
A 105°C max	Isolants de la classe Y imprégnés par un diélectrique liquide		Vernis à base résines naturelles
	Papier vernis	Vernis à base résines	Huiles isolantes
E 120°C max	Résine moulées avec charge cellulosique Stratifiés coton, papier	Résines mélanines	
B 130°C max	Amiante, fibre de verre		Résine synthétique avec huile Résines époxydes
	Tissu de verre imprégné Amiante imprégnée	Vernis à base de résines synthétiques et d'huile	
	Mica aggloméré	Résines synthétiques époxydes	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante	Résines mélanines	
F 155°C max	Fibre de verre		polyuréthanes
	Tissu de verre imprégné Amiante imprégnée Mica aggloméré	Résines alkyles, époxydes Silicone-alkyles	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante		
H 180°C max	Fibre de verre		Résine silicone sélectionnée
	Tissu de fibre de verre et d'amiante imprégné Elastomère de silicone	Résines et élastomère de silicone	
	Mica aggloméré Stratifié de tissu de verre	Résine silicone sélectionnée	
C >180°C	Mica aggloméré Tissu de verre ou d'amiante traitée		Résine silicone stable jusqu'à 225°C
	Mica, porcelaine, céramique, verre, quartz		Liants en verre ou ciment

Tableau III.5. Classification des matériaux isolants en fonction de la température. [4]

4.2.2. En fonction de l'état physique :**a. Solide :**

On trouve :

- Mica.
- Bois.
- Céramique.
- Plastique.....

b. Liquide :

On trouve :

- Huiles.
- Vernis.....
- Pyralène.

c. Gaz :

On trouve :

- Air sec.
- Azote.
- SF6.....

4.2.3. En fonction de l'origine :**a. Minérale :**

On trouve :

- Mica.
- Porcelaine.
- Verre.
- Amiante.....

b. Organique :

On trouve :

- Bois.
- Papier.
- Coton.
- Soie.
- Caoutchouc (latex).....

c. Synthétique :

On trouve :

- Plastique (thermoplastiques, thermodurcissables).
- Silicones.

❖ Silicones :

Molécules dont les atomes de carbone ont été remplacés par du silicium.

❖ Thermoplastiques :

Plastiques ramollis à chaud (il peut être moulé, formé ou extrudé), et durci à froid. Le processus est réversible.

❖ Thermodurcissables :

Plastiques durcis par un procédé thermique. Le processus est irréversible.

Dans ce qui suit un tableau de classification des matériaux isolants en fonction de l'état physique et en fonction de l'origine :

❖ Caractéristiques des quelques isolants les plus utilisés:

Désignation		Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_r	
Unités		kg/m ³	°C	N/ mm ²	$\Omega.m$	kV/ mm		
Isolants solides	Origine minérale	Mica	3000	200		10 ¹³	100 à 200	6 à 7
		Verre	2500	>180		10 ¹⁰ à 10 ¹⁷	25 à 45	6
		Porcelaine	2500	>180	100	10 ¹²	16	5
		Amiante	1800 à 2200	>180		10 ⁹	3	2
	Origine organique	Bois	600 à 900	105	140	10 ⁴	5	9
		Papier	800 à 1300	60	70 à 120	10 ¹⁰ à 10 ¹⁶	60 à 80	6
		Caoutchouc	960	60	32	10 ¹⁴	20 à 30	3
		Coton		90 à 120	50 à 100	10 ⁹	5 à 10	3 à 4
Isolants liquides		Huile minérale	850 à 950	145		10 ¹³	9 à 10	2
		Pyralène	1300 à 1500			10 ¹⁰	20	5
Isolants gazeux		Air sec				10 ¹⁴	3	1
		SF6					7.5	1
Thermodurcissables		Silicone	1800	180	40 à 80	10 ¹⁴ à 10 ¹⁶	300	2.5
Thermoplastiques		PVC	1400	60	4	10 ¹²	35	5
		Caoutchouc néoprène	1240	70	4	10 ¹⁰	14	7

Tableau III.6. Caractéristiques des quelques isolants les plus utilisés. [4]

❖ Propriétés et emplois:

Désignation		Propriétés	Emplois	
Unités				
Isolants solides	Origine minérale	Mica	Très grande rigidité diélectrique.	Agglomérés à des résines.
		Verre	Grande résistance mécanique mais très fragile.	Isolateurs des lignes aériennes. Fibre et tissus de verre.
		Porcelaine	Résiste aux chocs thermiques et à la chaleur.	Isolateurs HT. Support de résistances électriques. Pièces moulées.
		Amiante	Bonne résistance à la chaleur et au feu mais craint l'humidité.	Support de résistances. Isolant de conducteurs.
	Origine organique	Bois	Très léger. Peu coûteux.	Poteaux, tableaux, moulures, cales isolantes, panneaux.
		Papier	Très sensible à l'humidité. Souple.	Rubans imprégnés pour câbles haute tension. Cartons, rubans, produits stratifiés.
		Caoutchouc	Elastique. Attaqué par les huiles. Vulcanisées par addition de soufre.	Produits en bande ou moulés. Isolation des conducteurs et câbles.
		Coton	Très souple. Economique. Bonne résistance à la traction.	Fils, rubans, toile, isolation en bobinage avec imprégnation
Isolants liquides	Huile minérale	Rigidité diélectrique. Chute avec la présence d'humidité.	Isolation des transformateurs.	
	Pyralène	Ininflammable.	Interdit depuis 1990.	
Isolants gazeux	Air sec	Rigidité très élevée à la pression de 10 bars : 225kV/mm.	Isolation des lignes aériennes. Interrupteurs. Disjoncteur pneumatique.	
	SF6	Rigidité diélectrique égale à 2.5 fois celle de l'air.	Disjoncteurs haute tension.	
Thermodurcissables	Silicone	Excellentes propriétés électriques et mécaniques, mais coûteux.	Huiles, graisses, caoutchouc. Poudre à mouler, résine, vernis.	
Thermoplastiques	PVC	Le plus utilisé, peut se coller facilement, très souple.	Isolation et graines pour conducteurs et câbles, feuilles plaques, tubes.	
	Caoutchouc néoprène	Très élastique, résiste aux huiles et aux solvants.	Isolement des fils et des câbles.	

Tableau III.7. Propriétés et emplois quelques isolants les plus utilisés. [4]

3.1. Applications des matériaux isolants en industrie électrique :

3.1.1. Bobinage des machines :

a. **Basse tension :**

Fils conducteurs émaillés.

b. **Haute tension :**

Barres conductrices isolées par du papier, mica, verre.....

3.1.2. Câbles électriques :

Un câble électrique est constitué d'une âme conductrice métallique (Cuivre ou Aluminium) recouvert d'un isolant, d'un écran et d'un revêtement extérieur, complété si besoin par une gaine d'étanchéité et par une armure.

L'enveloppe isolante, mais aussi les gaines et revêtements extérieurs sont constitués de matières synthétiques.

On trouve :

- **PVC** : Polychlorure de vinyle.
- **PE** : Polyéthylène.
- **PR** : Polyéthylène réticulé.
- Caoutchouc silicone.

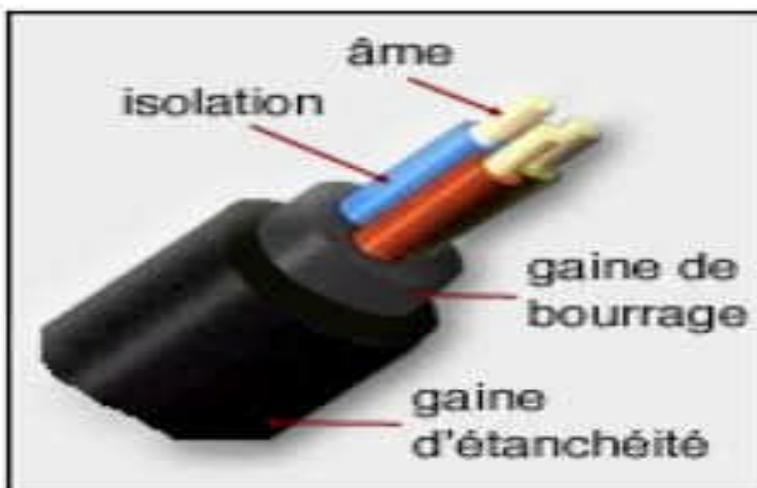


Figure III.5. Composants d'un câble électrique.

3.1.3. Isolateurs :

Ils sont en verre ou en porcelaine et sont utilisés pour isoler :

- Les bornes de sortie des appareillages hautes tension (sectionneur, disjoncteur...).
- Les câbles haute tension des pylônes de transport d'énergie électrique.

3.1.4. Appareillage haute tension :

L'isolement interne est renforcé par un isolant supplémentaire :

- **Solide** —————> résine.
- **Liquide** —————> huile minérale.
- **Gaz** —————> SF₆ dans les disjoncteurs hauts tension.

4. Matériaux de construction mécanique :

Ce sont les matériaux utilisés pour la fabrication des pièces destinées à transmettre et à recevoir des charges mécaniques et à donner pour certains éléments les formes requises afin que la machine fonctionne correctement (normale).

On trouve :

4.1. Fonte (carcasse) :

La fonte est un métal. C'est un alliage de fer et de carbone (comprenant de 2.11% à 6.67% de carbone).

La fonte brute s'apparente à une matière première obtenue en sortie de haut fourneau (fonderie), cette appellation prend en compte le fait que la qualité de cette fonte qui est utilisée à l'état liquide, ce n'est qu'un état intermédiaire de fabrication de l'acier ou de fonte de moulage.

La fonte a une excellente coulabilité ; c'est-à-dire, qu'elle a une grande facilité pour remplir un moule. Sa température de fusion est comprise entre 1135°C et 1350°C en fonction de la qualité de carbone et de silicium qu'elle contient.

4.1.1. Types de fonte :**a. Fonte grise :**

Contient de 3.5% à 6% de carbone sous forme de graphite. Elle est obtenue après refroidissement très lent, on s'en sert pour fabriquer des machines-outils qui ne se déforment pas ou bien des canalisations car elle supporte la soudure. La fonte sert aussi à fabriquer des pièces mécaniques (de forme intérieure et extérieure), des blocs moteurs et des tambours de frein.

b. Fonte blanche :

Contient de 2.2% à 3.5% de carbone sous forme de carbone de fer. Elle est obtenue après un refroidissement lent.

La fonte blanche est très résistante à l'usure, elle est employée en fonderie d'art.

❖ Remarque :

- On obtient des fontes spéciales en mélangeant au minerai de fer et de carbone d'autres matériaux en petite quantité comme le silicium, l'aluminium, le manganèse, le nickel, le chrome, le molybdène...
- L'acier est obtenu à partir de la fonte brute qui sort d'un haut fourneau grâce à une opération de fusion oxydante qui lui enlèvera une partie de son carbone (décarburation).
- Abusivement, on parle de fonte d'aluminium, de font d'acier ou de fonte d'inox.

4.1.2. Les étapes de fabrication de la fonte d'acier :**a. Fusion**

Le processus de fonte d'alliages ferreux pour obtenir de l'acier liquide est réalisé dans les fours de fonderie.

b. Coulage :

Une fois la fusion est terminée, l'acier passe par poche de coulée, l'acier liquide est versé dans les moules en sable déposés dans la zone de coulée.

Après la solidification du métal en acier, la pièce est soumise à tous les processus ultérieurs, afin d'arriver au design et la forme souhaitée.

c. Démoulage :

Les pièces sont démoulées grâce à la séparation du sable de moulage, de la pièce coulée, dans le moule de sable.

Ensuite les pièces sont passées par le grenailage, le découpage, le traitement thermique, ébavurage et contrôle de qualité.

d. Usinage :

Le processus de fonderie conclut par la finition des pièces, qui consiste à l'usinage des pièces en fonte jusqu'à l'obtention des dimensions et des tolérances requises par le client.

4.2. L'acier au carbone (arbre) :**4.2.1. Définition :**

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié.

Parmi les aciers non alliés, les aciers les plus répandus sont les aciers destinés à la déformation à froid, les aciers de construction métallique et les aciers revêtus métalliques.

a. Aciers de construction métallique :

Les constructions requièrent toujours une certaine rigidité et une certaine résistance, si bien que les aciers de construction doivent toujours avoir une résistance minimale.

D'un autre côté, ces aciers à résistance supérieure sont moins déformables.

b. Aciers pour formage à froid :

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les aciers pour formage à froid et emboutissage doivent répondre aux exigences suivantes :

- une limite d'élasticité peu élevée.
- un allongement élevé.

c. Aciers revêtus métalliques :

Pour garantir une longévité accrue à une tôle d'acier dans un environnement agressif,

il faut arriver à une meilleure résistance à la corrosion. C'est pourquoi le support en acier reçoit un revêtement métallique.

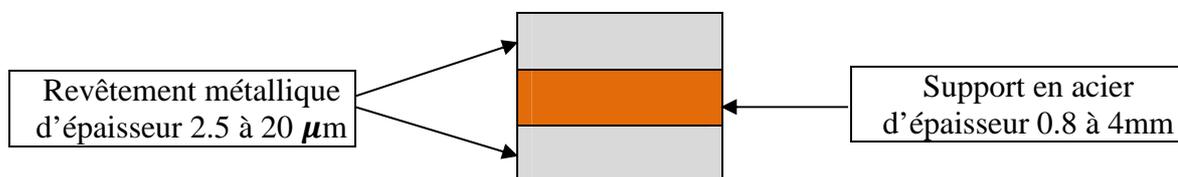


Figure III.6. Revêtement d'acier métallique.

4.2.2. Désignation des métaux :

L'objectif est d'être capable de donner la composition exacte des métaux grâce à leur désignation chimique.

Dans ce qui suit nous allons voir les différents types d'acier. Nous allons en étudier quatre :

- ⇒ aciers dit « d'usage courant ».
- ⇒ aciers non alliés.
- ⇒ aciers faiblement alliés.
- ⇒ aciers fortement alliés.

a. Aciers non alliés (ISO) :

Ce sont des aciers ou la teneur en manganèse est inférieure à 1%. La désignation se compose de la lettre **C** suivit du pourcentage de la teneur moyenne en carbone multiplié par 100. Ce sont des aciers que l'on utilise généralement pour le traitement thermique.

❖ Exemple : C 40

- ✓ acier non allié.
- ✓ 0,40% de carbone.

b. Aciers d'usages courants (ISO) :

La désignation commence par la lettre **S** pour les aciers d'usage général (matière pour l'atelier) et par la lettre **E** pour les aciers de construction mécanique (charpente métallique)

Le nombre qui suit indique la valeur minimale de la limite d'élasticité en mégapascals (MPa ; en sachant que $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$)

❖ Exemple : S 325

- ✓ C'est un acier d'usage général.
- ✓ La limite d'élasticité est de 325 Mpa.

c. Aciers faiblement alliés (ISO) :

Ce sont des aciers ou la teneur en manganèse est supérieure ou égale à 1% et ou la teneur de chaque élément d'alliage est inférieure à 5%.

❖ Remarque :

Lorsqu'il n'y a pas de chiffre (ce qui détermine sont pourcentage) attribué à un métal on dit qu'il y a des traces de ce métal (cela veut dire que la teneur de ce métal dans la désignation est inférieure à 1%).

❖ Exemple : 55 Cr 3

- ✓ Acier faiblement allié.
- ✓ 0,55% de carbone.
- ✓ 0,75% de Chrome ($3 : 4 = 0,75$).

d. Aciers fortement alliés (ISO) :

Ce sont des aciers ou la teneur d'au moins un élément d'alliage est supérieure ou égal à 5%.

La désignation se compose de la lettre X suivie de la même désignation que celle des aciers faiblement alliés, à l'exception des valeurs des teneurs qui sont des pourcentages nominaux réels.

La partie en rouge est la différence entre les aciers faiblement alliés et les fortement alliés.

❖ Remarque :

Lorsqu'il n'y a pas de chiffre (ce qui détermine sont pourcentage) attribué à un métal on dit qu'il y a des traces de ce métal (cela veut dire que la teneur de ce métal dans la désignation est inférieure a 1%).

❖ Exemple : X 30 Cr 13

- ✓ acier fortement allié.
- ✓ 0,30% de carbone.
- ✓ 13% de chrome.

4.2.3. Les étapes de fabrication de l'acier :**⇒ Comment fabrique-t-on l'acier ?**

Le processus de fabrication s'effectue en trois grandes étapes :

a. Le passage des matières premières à l'acier liquide

Il y a deux façons de fabriquer de l'acier liquide :

- Par la filière fonte.
- Par la filière électrique.

b. Le passage de l'acier liquide aux demi-produits.**c. Le passage des demi-produits aux produits finis**

Trois étapes sont alors nécessaires :

- Le laminage à chaud.
- Le laminage à froid.
- Le revêtement.

4.2.4. Classement des aciers :

Nous étudierons successivement les six classes suivantes :

a. Aciers extra-doux exceptionnels ou mieux fers :

Fondus pour lesquels $R < 45 \text{ kil par m/m}^2$.

b. Aciers très-doux proprement dits :

Correspondant à $R > 40 \text{ kil mais} < 50 \text{ kil. Par m/m}^2$.

c. Aciers doux ordinaires :

$R > 50 \text{ kil mais} < 60 \text{ kil par m/m}^2$.

d. Aciers durs ordinaires :

$R > 60 \text{ kil mais} < 70 \text{ kil par m/m}^2$.

e. Aciers très-durs :

$R > 70 \text{ kil mais} < 80 \text{ kil par m/m}^2$.

f. Aciers très-durs exceptionnels :

$R > \text{que } 80 \text{ kil par m/m}^2$.

4.2.5. Emplois des aciers :

Dans l'industrie, l'utilisation de l'acier pour rôle de fabriquer l'arbre du rotor.

4.3. Plastique (ventilateur) :**4.3.1. Définition :**

Le plastique est un matériau polymère, il est fabriqué à partir de produits pétrolières, cette matière est utilisée dans la construction des machines électriques essentiellement pour fabriquer des ventilateurs à ces machines.

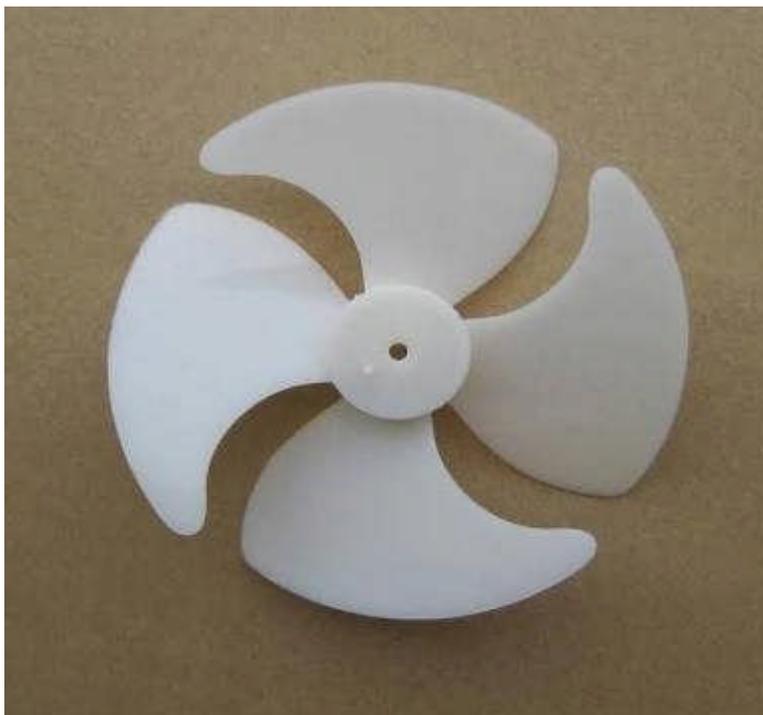


Figure III.7. Ventilateur en plastique.

4.3.2. Emplois des plastiques :

Ces types de ventilateurs en plastique sont utilisés pour des petits et moyens moteurs.

❖ Remarque :

Le choix de tous ces matériaux utilisés dans la fabrication (conducteurs, magnétiques, isolants et mécaniques) dépend de leurs propriétés :

1- Electriques :

Résistivité, conductivité, constant diélectrique.

2- Magnétiques :

Perméabilité, degré de saturation, induction rémanente, champ correctif.

3- Physiques et mécaniques :

Densité, dilatation, point de fusion, dureté, sensibilité à la corrosion.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu les généralités sur les matériaux utilisés dans la construction d'un moteur asynchrone en particulier les matériaux conducteurs, magnétiques et isolants, sur lesquels on a fait des recherches et des descriptions.

On a vu aussi les différents matériaux d'un moteur asynchrone (matériaux de construction mécanique).

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons s'intéresser à la conception des machines asynchrone, particulièrement à un moteur asynchrone à cage d'écureuil (8 pôles) et on présentera la méthode utilisée pour le dimensionnement de l'enroulement statorique et rotorique et le calcul du circuit magnétique de ce moteur.

1. Les dimensions principales et les contraintes électromagnétiques :

Avant de commencer le dimensionnement d'un moteur électrique, il faut bien définir quelques paramètres essentiels, en premier lieu de ses dimensions principales :

- Le diamètre intérieur du stator D_1 .
- La longueur de l'armature magnétique li .

1.1. Puissance électromagnétique :

Lors du fonctionnement d'un moteur asynchrone, il y a transmission d'énergie de stator vers le rotor cela se fait sous forme d'un champ tournant à travers l'entrefer.

Ce transfert d'énergie a un rapport direct avec les forces électromagnétique développées dans le rotor, engendrant un couple moteur qui représente le couple électromagnétique de moteur. Cette puissance est donnée : [7]

$$P_i = m \cdot E_n \cdot I_n \text{ avec : } E_n = K_e \cdot U_n$$

$$\Rightarrow K_e = \frac{E_n}{U_n} K_e = 0,9 \div 0,98$$

$$P_i = m \cdot K_e \cdot U_n \cdot I_n \text{ [W]}$$

$$P_i = K_e \cdot S_n \Rightarrow P_i = \frac{K_e P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} \text{ [W]} \quad \text{IV.01}$$

Avec:

U_n : tension nominale.

m_1 : nombre de phases du stator.

E_n : force électromotrices [v].

I_n : courant de phase [A].

S_n : puissance apparent [V.A].

η : rendement du moteur.

$\cos \varphi$: facteur de puissance.

1.2. Induction dans l'entrefer :

L'induction B_δ dans l'entrefer est l'une des grandeurs les plus importantes dans le dimensionnement des machines électrique.

Elle caractérise l'utilisation magnétique de la machine, il est indiqué de prendre des valeurs les plus élevées que possible de B_δ .

Toutefois, afin d'évite la saturation du fer magnétique, dans certains cas particuliers on atteindrent des valeurs B_δ allons jusqu'à 1,3T. [7]

Son expression est telle que :

$$B_\delta = \frac{6,11.Pn.10^{12}}{\alpha_i.K_f.Ken1.D1^2.A.li.Nn} \quad [T] \quad \text{IV.02}$$

α_i : coefficient de recouvrement polaire.

$Ken1$: coefficient de bobinage de l'enroulement du stator

K_f : coefficient de forme

A : charge linéaire

$D1$: diamètre intérieure du stator

1.3. Longueur virtuelle de l'induit :

Elle est exprimée par cette formule :

$$li = \frac{6,11.Pn.10^{12}}{\alpha_i.K_f.Ken1.D1^2.A.B_\delta.Nn} \quad [mm] \quad \text{IV.03}$$

1.4. Coefficient de longueur λ :

$$\lambda = \frac{li}{\tau} \quad \text{IV.04}$$

τ : Pas polaire avec : $\tau = \frac{\pi.D1}{2p}$

La longueur virtuelle doit vérifier la condition suivante :

$$0,7 < \lambda < 1,3.$$

1.5. Le flux utile par pôle :

Le flux par pôle Φ est une grandeur physique mesurable caractérisant l'intensité et la répartition spatiale de l'induction magnétique à travers une surface orienté son calcul se fait à base de cette expression suivante :

$$\Phi = B\delta \cdot \alpha i \cdot \tau \cdot li \cdot 10^{-6} \text{ [Wb]} \quad \text{IV.05}$$

1.6. Nombre d'encoches par pôle et par phase :

Le nombre d'encoches par pôle et par phase q du stator présenté par cette formule :

$$q = \frac{z}{2p.m} \quad \text{IV.06}$$

1.7. Le pas dentaire :

Le pas dentaire est défini comme étant la distance séparant les deux axes de deux encoches voisines.

Il est donné par :

$$t_1 = \pi \cdot D_1 / Z \text{ [mm]} \quad \text{IV.07}$$

1.8. Courant nominal dans une phase statorique:

Le courant nominal dans une phase est donné par cette expression :

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{m1 \cdot U_n \cdot \eta_{nom} \cdot \cos\phi_{nom}} \quad \text{IV.08}$$

Avec :

P_n : puissance nominale en [kW].

U_n : tension simple en [V].

η_{nom} : rendement nominal.

$\cos\phi_{nom}$: facteur de puissance nominal.

1.9. Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche :

$$U_{en1} = \frac{A \cdot t1 \cdot A1 \cdot 10^{-3}}{I_n} \quad \text{IV.09}$$

$A1$: nombre de branches parallèles de l'enroulement statoriques

Dans notre cas $A1=3$.

1.10. Nombre de spires par phase :

Son expression est donné par :

$$W1 = \frac{p.q.U_{en1}}{A1} \quad \text{IV.10}$$

q : nombre d'encoche par pôle par phase.

1.11. Section effective d'un conducteur :

$$S1_{eff} = \frac{I1n}{A1.J1} [\text{mm}^2]. \quad \text{IV.11}$$

J1 : densité de courant elle est donnée en fonction du diamètre extérieur suivant le degré de protection de la machine et de la classe d'isolation.

❖ Remarque :

Si : $S_{eff} > 1.8 \text{ mm}^2$

On devise cette section en sections élémentaires.

$$S1_{el} = \frac{S1_{eff}}{N_{el}} [\text{mm}^2] \quad \text{IV.12}$$

La section des conducteurs étant normalisée, on choisira la section normalisée la plus proche de celle calculée.

• Les sections normalisées sont données par le tableau suivant :

<i>d</i>	<i>d_{iso}</i>	<i>q</i>	<i>q_{iso}</i>
0.53	0.567	0.22	0.252
0.58	0.60	0.26	0.282
0.61	0.62	0.292	0.301
0.63	0.64	0.311	0.321
0.75	0.815	0.442	0.521
0.80	0.865	0.503	0.581
0.85	0.915	0.667	0.657
0.90	0.965	0.735	0.731
0.95	1.08	0.785	0.915

Tableau IV.1. Présentation des sections normalisées.

1.12. Choix de l'enroulement statorique :

L'enroulement adopté est concentrique à une seule coche, ces enroulements sont surtout utilisés pour les machines à faible puissance. Vu leurs facilités de construction et leur rapidités de réalisation.

2. Dimensionnement de la feuille statorique :

La feuille statoriques est représentée par la figure :

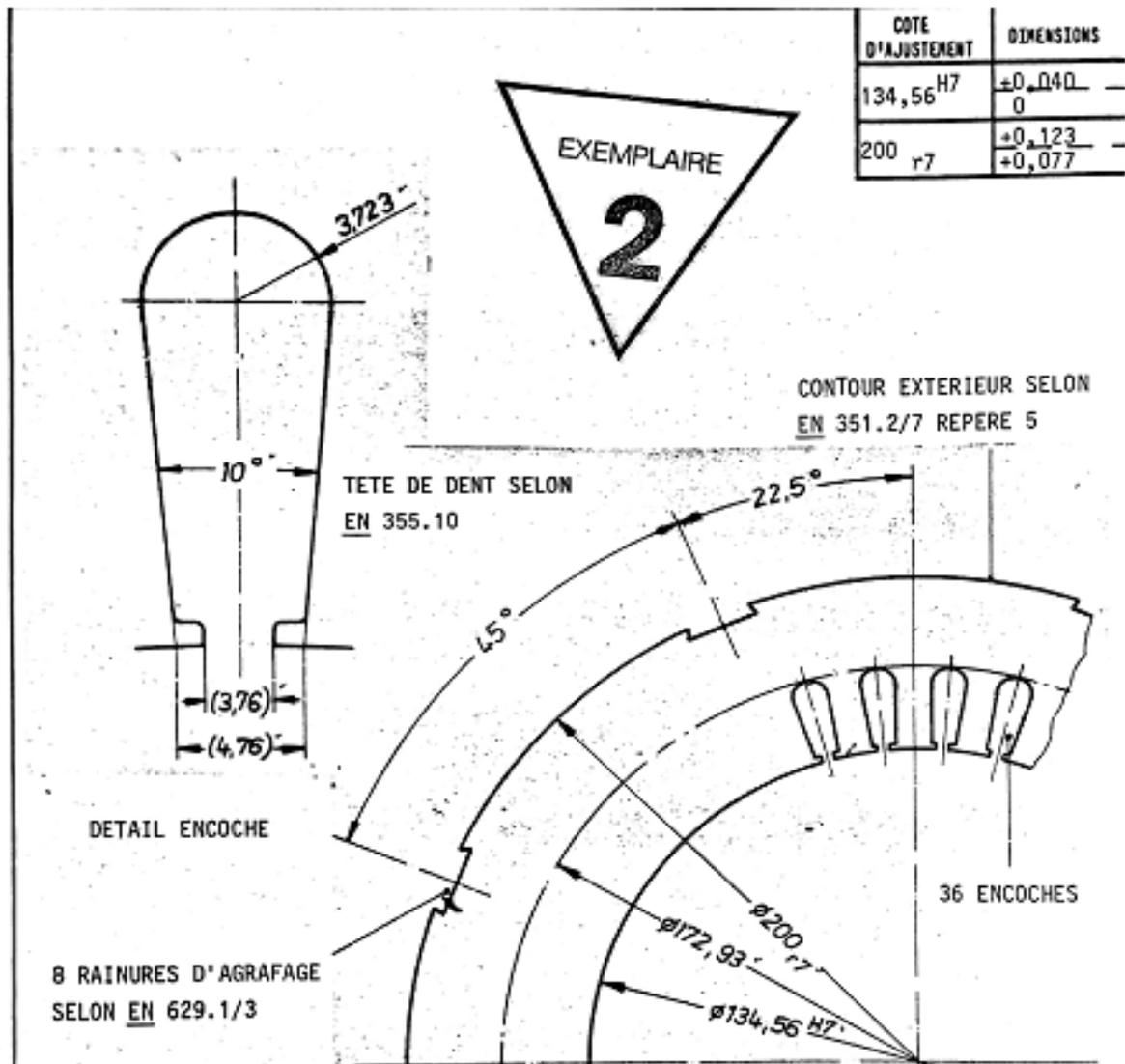


Figure IV.1. Présentation de la feuille statoriques.

2.1. La largeur de la dent :

En basant sur la loi de la conservation de flux, la largeur de la dent est donnée par :

$$\mathbf{bZ1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_f \cdot B_{Z1max}} \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.13}$$

Avec :

t_1 : pas dentaire ;

B_δ : induction dans l'entrefer ;

K_f : coefficient de remplissage du paquet statorique et rotorique ;

B_{Z1max} : induction maximale dans la dent du stator ;

Les valeurs normalisées de l'induction maximale dans la dent du stator sont données en annexe par le tableau suivant :

h [mm]	$2p$	B_{Z1max}	B_{c1}
50-132	2.4	1.75-1.95	1.50-1.65
	6	1.75-1.95	1.45-1.60
	8	1.70-1.90	1.20-1.35
160	2	1.75-2.0	1.45-1.70
	4	1.75-2.0	1.45-1.70
	6	1.70-1.85	1.35-1.50
	8	1.70-1.85	1.10-1.20
180-250	2	1.70-1.90	1.45-1.65
	4.6	1.70-1.90	1.45-1.65
	8	1.70-1.85	1.10-1.20

Tableau IV.2. Présentation des valeurs normalisées de l'induction maximale dans la dent du stator.

2.2. Hauteur du dos du stator :

Elle est définie par l'expression suivante :

$$h_{c1} = \frac{0.5(\alpha_i \cdot \tau \cdot B\delta)}{K_f \cdot B_{c1\max}} [\text{mm}] \quad \text{IV.14}$$

Avec :

τ : pas polaire.

α_i : coefficient de recouvrement polaire.

$B_{c1\max}$: induction magnétique admissible dans le dos du stator.

2.3. Hauteur de la dent :

Elle est donnée géométriquement par :

$$h_{z1} = 0.5 (D_{\text{ext}} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.15}$$

2.4. Hauteur de l'encoche :

Elle est donnée par :

$$H_{\text{enc1}} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.16}$$

Avec:

h_{f1} : la hauteur de fente de l'encoche statoriques.

$$h_{f1} = (0.8 \div 1.2) \quad [\text{mm}]$$

h_{k1} : la hauteur de la clavette, elle donnée par :

$$h_{k1} = 0.5 (b_{\text{enc1}} - b_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.17}$$

b_{f1} = largeur de la fente d'encoche statoriques.

$$b_{f1} \leq 4 \quad [\text{mm}]$$

2.5. Section occupée par les conducteurs :

Pour une encoche trapézoïdale, la section occupée par les conducteurs est donnée par :

$$S_{\text{enc1}} = 0.5 (b_{\text{enc1}} + b_{\text{enc2}}) h_{\text{enc1}} - S_{\text{iso}} \quad [\text{mm}^2] \quad \text{IV.18}$$

S_{iso} : la section occupée par l'isolation de l'encoche.

$$S_{iso} = e_1 (b_{enc2} + 2h_{enc1}) + e_2 \cdot b_{enc1} + e_3 \frac{(b_{enc2} + b_{enc1})}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad \text{IV.19}$$

Avec:

e_1 : épaisseur de revêtement de l'encoche.

$$e_1 = (0.37 \div 0.4) \quad [\text{mm}]$$

e_2 : épaisseur de fermeture de l'encoche.

$$e_2 = 0.5 \quad [\text{mm}]$$

e_3 : épaisseur de la cale du milieu.

$$e_3 = 0.5 \quad [\text{mm}]$$

2.6. Coefficient de remplissage de l'encoche :

Il est donné par la formule suivante :

$$K_{ra} = \frac{W_{enc1} \cdot N_{el} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad \text{IV.20}$$

Avec:

W_{enc1} : nombre de conducteurs dans l'encoche.

d_{iso} : diamètre du conducteur avec isolation.

S_{enc1} : section d'encoche.

N_{el} : nombre de conducteurs élémentaires.

N_b : K_{ra} doit être compris entre 0.7 et 0.75

- Résultats du dimensionnement du stator :

Désignation	Symbole	Représentation Dans le programme	Résultat	Unité
Nombre de pôle	P	P	8	-
Diamètre extérieure du stator	D1ext	Dext	200	mm
Diamètre intérieure du stator	D1int	D1	134.56	mm
La puissance électromagnétique	Pn	Pn	2.2	kW
Nombre d'encoche par pôle et par phase	q	q	1.5	-
Le pas polaire	τ	tau	52.841	-
Le pas dentaire	t1	t1	11.742	mm
Nombre de conducteurs par encoche	Uen1	Uen1	225.923	-
Nombre de spire	W1	W1	451.847	-
Courant dans la phase statorique	Inn	Inn	3.586	A
Longueur virtuelle de l'induit	l_i	li	68.472	mm
Coefficient de longueur	λ	landa	1.295	-
Flux utile par pôle	φ	phi	0.0022	Wb
Force électromotrice	En	En	380	V
Section effective d'un conducteur	S1eff	S1eff	0.213	mm ²
Largeur de la dent statorique	bz1	bz1	5.225	mm
Hauteur du dos statorique	hc1	hc1	7.524	mm
Hauteur de la dent	hz1	hz1	25.195	mm
Hauteur utile de l'encoche statorique	henc1	henc1	23.815	mm
Hauteur de la clavette	hk1	hk1	0.38	mm
Section de l'encoche statorique	Senc1	Senc1	77.012	mm ²
Section occupée par l'isolation de l'encoche	Siso	Siso	24.442	mm ²
Section occupée par les conducteurs dans l'encoche	Sen1	Sen1	48.228	mm ²
Coefficient de remplissage de l'encoche	Kra	Kra	0.75	-

Tableau IV.3.Présentation des résultats du dimensionnement du stator.

3. Entrefer :

Pour réduire le courant magnétisant et avoir donc un bon facteur de puissance, l'entrefer doit être maintenu le plus faible possible.

Mais un entrefer assez grand est avantageux pour minimiser les pertes supplémentaires dues à la pulsation des champs harmoniques.

Dans notre cas : $\delta=0.28\text{mm}$.

4. Dimensionnement du rotor :

4.1. Diamètre extérieur du rotor :

Connaissant le diamètre intérieur du stator et l'épaisseur de l'entrefer, le diamètre extérieur du rotor s'exprime par :

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad \text{IV.21}$$

4.2. Pas dentaire :

Le pas dentaire est donné la formule :

$$t_2 = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} \quad \text{IV.22}$$

Z_2 : nombre d'encoche rotorques.

4.3. Courant dans la barre rotorique :

En général, le courant dans une phase de l'enroulement rotorique est donné par :

$$I_2 = \frac{I_n \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1} \cdot \cos\phi_{nom}}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{en2}} \quad [\text{A}] \quad \text{IV.23}$$

Avec :

I_n : courant nominal statoriques en [A].

m_1 : nombre de phases du stator.

K_{en1} : facteur de bobinage statoriques.

m_2 : nombre de phases rotorques.

K_{en2} : facteur de bobinage rotorques.

W_2 : nombre de spires rotorques.

5. Dimensionnement de la feuille rotorique:

La feuille rotorique est représentée par la figure

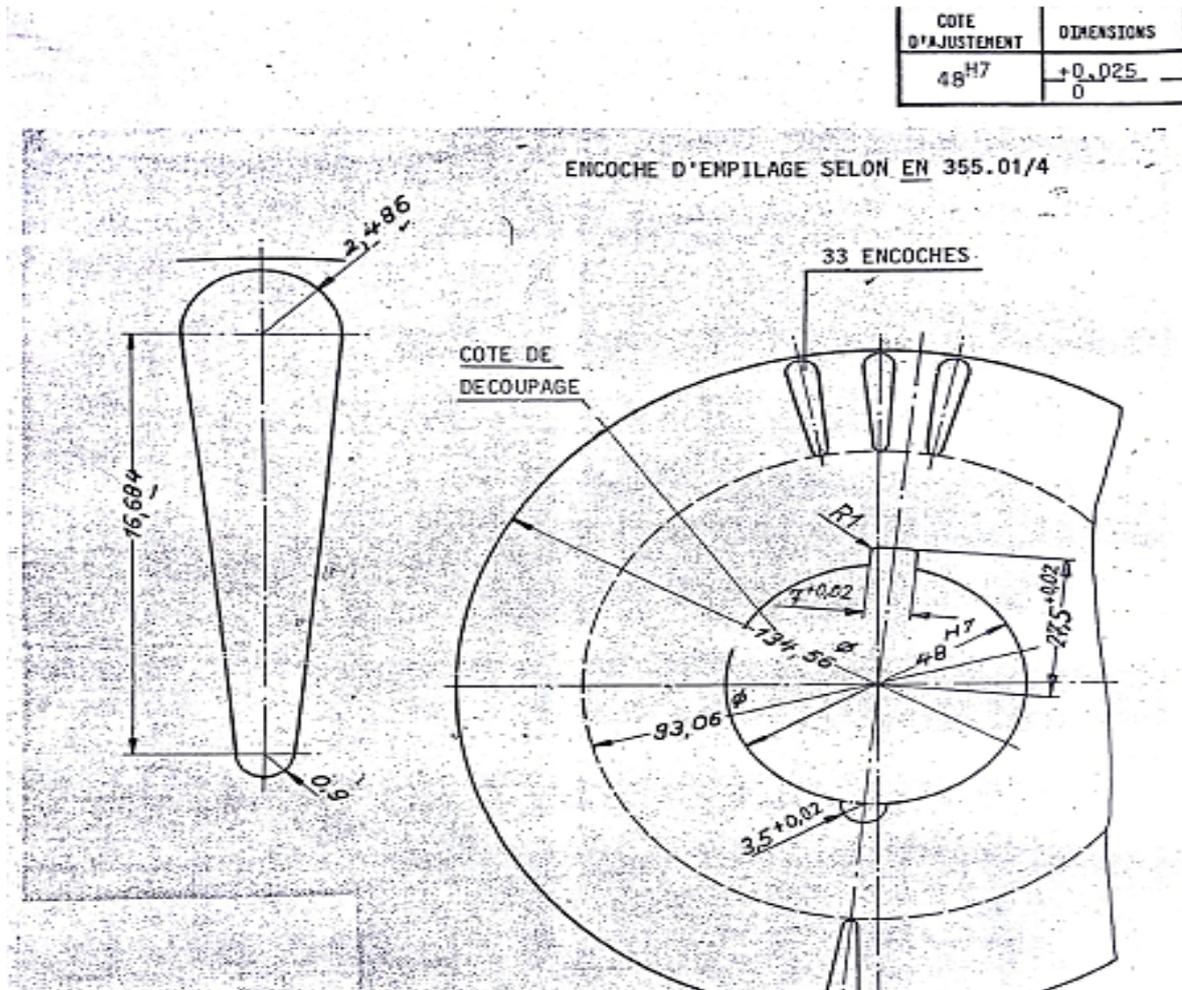


Figure IV.2. Présentation de la feuille rotorique.

5.1. Hauteur de la feuille rotorique :

La hauteur de la culasse rotorique est donnée par :

$$hc2 = 0.5 \frac{\alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{K_f \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.24}$$

Avec:

τ : le pas polaire. B_δ : induction dans l'entrefer.

B_{c2} : induction dans la culasse rotoriques.

K_{fer} : coefficient de remplissage du paquet rotoriques.

5.2. Largeur de la dent rotorique :

En se basant sur la loi de conservation du flux, la largeur de la dent est donnée par :

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_{\delta}}{K_f \cdot B_{z2_{\max}}} [\text{mm}] \quad \text{IV.25}$$

Avec :

t_2 : pas dentaire au rotor ;

$B_{z2_{\max}}$: induction maximale dans la dent du rotor.

L'induction maximale dans la dent rotorique est donnée par le tableau suivant :

$h[\text{mm}]$	$2p$	$B_{z2_{\max}}$	B_{c2}
50-132	2	1.75-1.95	1.35-1.45
	4	1.75-1.95	1.15-1.25
	6	1.70-1.95	1.05-1.15
	8	1.70-1.90	0.75-0.85
160-225	2	1.75-1.95	1.35-1.45
	4	1.55-1.80	1.15-1.25
	6	1.65-1.90	1.05-1.15
	8	1.65-1.90	0.75-0.85
180-250	2	1.60-1.85	1.35-1.45
	4	1.80-2.00	1.15-1.25
	6	1.65-1.900	1.05-1.15
	8	1.65-1.90	0.75-0.85

Tableau IV.4. Présentation des valeurs normalisées de l'induction maximale dans la dent rotorique.

5.3. Hauteur De La Dent Rotorique :

$$h_{z2} = 0.5 (D_2 - D_{2int}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.26}$$

D_{2int} : diamètre intérieur du rotor.

$$D_{2int} \approx (0.3 \div 0.35) D_2 \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.27}$$

D_2 : diamètre extérieur du rotor.

5.4. Diamètre supérieur de l'encoche rotorique :

Le diamètre supérieur de l'encoche est donné par l'expression :

$$d_{22} = \frac{[\pi.(D_2 - 2h_{f2}) - Z_2.bZ_2]}{(Z_2 + \pi)} [\text{mm}] \quad \text{IV.28}$$

Avec :

h_{f2} : hauteur de la fente de l'encoche rotoriques.

5.5. Diamètre inférieur de l'encoche rotorique :

Il est donné par l'expression suivante :

$$d_2 = \frac{[\pi.(D_2 - 2h_{z2}) - Z_2.bZ_2]}{(Z_2 - \pi)} [\text{mm}] \quad \text{IV.29}$$

Le schéma de l'encoche rotoriques est donné par

5.6. Hauteur de l'encoche rotorique:

La hauteur de l'encoche est donnée géométriquement par :

$$h_{enc2} = h_2 + 0.5 (d_{22} + d_2) \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.30}$$

Avec :

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0.5 (d_{22} + d_2) \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.31}$$

5.7. Section de la barre rotorique :

La section de la barre rotorique est donnée par l'expression suivante :

$$S_b = 0.125.\pi (d_{22}^2 + d_2^2) + 0.5 (d_{22} + d_2) .h_2 \quad [\text{mm}^2] \quad \text{IV.32}$$

5.8. Densité de courant dans la barre rotorique :

Elle est donnée par :

$$J_b = \frac{I_b}{S_b} [\text{A/mm}^2] \quad \text{IV.33}$$

$$J_b: (2.5 \div 3.5) [\text{A/mm}^2].$$

6. Dimensionnement de l'anneau rotorique:

6.1. Section de l'anneau :

Elle est donnée par :

$$S_{an} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2P} [\text{mm}^2] \quad \text{IV.34}$$

6.2. Hauteur de l'anneau :

Elle est donnée par :

$$h_{an} = (1.1 \div 1.25) h_{z2} [\text{mm}] \quad \text{IV.35}$$

6.3. L'arguer de l'anneau :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} [\text{mm}] \quad \text{IV.36}$$

6.4. Diamètre de l'anneau:

$$D_{anmoy} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad \text{IV.37}$$

❖ **Résultat du dimensionnement de cage rotorique :**

Désignation	Symbole	Représentation Dans le programme	Résultat	Unité
Diamètre extérieur du rotor	D2	D2	134	Mm
Diamètre intérieur du rotor	D2int	D2int	48	Mm
Pas dentaire	t2	t2	12.756	Mm
Courant dans la barre rotorique	I2	I2	195.760	A
Hauteur de la feuille rotorique	hc2	hc2	7.331	Mm
Largeur de la dent rotorique	bz2	bz2	5.530	Mm
Hauteur De La Dent Rotorique	hz2	hz2	35.668	Mm
Diamètre supérieur de l'encoche rotorique	d22	d22	2.480	Mm
Diamètre inférieur de l'encoche rotorique	d2	d2	0.900	Mm
Hauteur de l'encoche rotorique	henc2	henc2	4.760	Mm
Section de la barre rotorique	Sb	Sb	58.129	mm ²
Densité de courant dans la barre rotorique	Jb	Jb	3.034	A/mm ²
Section de l'anneau	San	San	100.709	mm ²
Hauteur de l'anneau	han	han	452.802	Mm
L'arguer de l'anneau	ban	ban	2.352	Mm
Diamètre de l'anneau	Danmoy	Danmoy	91.197	Mm

Tableau IV.5. Présentation des résultats du dimensionnement de cage rotorique.

7. calcul du circuit magnétique :**7.1. Induction Dans La Culasse Du Stator :**

L'induction dans culasse du stator est donnée par l'expression :

$$B_{C1} = 0.5 \frac{\alpha_i \cdot \tau \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot h_{C1}} [T] \quad \text{IV.38}$$

7.2. F.M.M dans la culasse du stator :

La f.m.m dans le dos stator est exprimée par :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} [A] \quad \text{IV.39}$$

H_{c1} : l'intensité du champ dans la culasse stator donnée par le tableau de magnétisation de la culasse du stator $B_{c1}(h_{c1})$. voir tableau

L_{c1} : la longueur des lignes de champ dans la culasse du stator, elle est donnée par :

$$L_{c1} = \frac{\pi(D_{ext} - h_{c1})}{2P} [mm] \quad \text{IV.40}$$

7.3. Induction Dans La Dent Du Stator :

L'induction magnétique dans la dent de la session est donnée par l'expression :

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{K_{fer} \cdot b_{Z1}} [T] \quad \text{IV.41}$$

7.4. F.M.M Dans La Dent Du Stator :

Elle est exprimée par :

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_{Z1} \cdot 10^{-3} [A] \quad \text{IV.42}$$

H_{Z1} : l'intensité du champ magnétique dans la dent du stator est obtenue à partir du tableau de magnétisation des dents statoriques $B_{Z1}(H_{Z1})$. Voir tableau T.A.5.

h_{Z1} : hauteur de l'encoche en [mm].

7.5. F.M.M Dans L'entrefer :

La f.m.m dans l'entrefer est donnée par :

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot 10^3 [A] \quad \text{IV.43}$$

K_{δ} : coefficient de KARTER :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad \text{IV.44}$$

Avec :

$K_{\delta 1}$: coefficient qui prend en considération l'existence des encoches dans le stator, il est donné par :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{(t_1 - b_{f1} + 5 \frac{\delta \cdot t_1}{b_{f1}})} \quad \text{IV.45}$$

$$K_{\delta 2} = 1$$

7.6. Induction dans la culasse rotorique :

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$B_{C2} = \frac{0.5 \alpha_1 \tau B_{\delta}}{K_{fer} h_{C2}} \quad [T] \quad \text{IV.46}$$

7.7. F.M.M Dans La Culasse Du Rotor :

La f.m.m dans la culasse du rotor est donnée par :

$$F_{C2} = H_{C2} \cdot L_{C2} \cdot 10^{-3} [A] \quad \text{IV.47}$$

L_{C2} : longueur moyenne des lignes de champ dans la culasse du rotor.

$$L_{C2} = (\pi/2P) \cdot (D_2 - 2h_{Z2} - h_{C2}) + h_{c2} [mm] \quad \text{IV.48}$$

H_{C2} : l'intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique.

Elle est donnée par le tableau

7.8. Induction Dans La Dent Du Rotor :

$$B_{Z2} = \frac{t_2 B_{\delta}}{K_{fer} B_{Z2}} [T] \quad \text{IV.49}$$

7.9. F.M.M Dans La Dent Du Rotor :

Elle donnée par :

$$F_{Z2} = H_{Z2} (h_{Z2} - 0.4 b_2) \cdot 10^{-3} [\text{A}] \quad \text{IV.50}$$

H_{Z2} : l'intensité du champ dans la dent rotorique.

Elle est donnée par le tableau de magnétisation des dents rotorique $B_{Z2}(H_{Z2})$.

7.10. F.M.M Totale :

La f.m.m totale est la somme des f.m.m partielles du circuit magnétique :

$$F = \sum F_i = 2F_{\delta} + 2F_{Z1} + 2F_{Z2} + F_{C1} + F_{C2} [\text{A}] \quad \text{IV.51}$$

7.11. Coefficient De Saturation Des Dents :

Il est donné par :

$$K_{uZ} = \frac{F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad \text{IV.52}$$

7.12. Coefficient De Saturation De La Machine :

Il est défini comme étant le rapport de f.m.m total à la f.m.m de l'entrefer :

$$K_u = \frac{\sum F_i}{2F_{\delta}} \quad \text{IV.53}$$

7.13. Courant Magnétisant :

Le courant magnétisant est donnée par :

$$I_{\mu} = \frac{P.F}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}} \quad \text{IV.54}$$

Avec :

P : nombre de paire de pôles.

m₁ : nombre de phases du stator.

W₁ : nombre de spires d'une phase statorique.

K_{enr1} : facteur de bobinage de l'enroulement statorique.

- **Résultat de calcul du circuit magnétique :**

Désignation	Symbole	Présentation dans le programme	Résultat	Unité
Induction Dans La Culasse Du Stator	Bc1	Bc1	1.900	T
Longueur des lignes de champ dans la culasse du stator	Lc1	Lc1	75.585	Mm
F.M.M dans la culasse du stator	Fc1	Fc1	2.698	A
Induction Dans La Dent Du Stator	Bz1	Bz1	1.900	T
F.M.M Dans La Dent Du Stator	Fz1	Fz1	0.521	A
F.M.M Dans L'entrefer	Fδ	Fdelta	252.261	A
Induction dans la culasse rotorique	Bc2	Bc2	1.950	T
Longueur moyenne des lignes de champ dans la culasse du rotor	Lc2	Lc2	29.059	Mm
F.M.M Dans La Culasse Du Rotor	Fc2	Fc2	1.371	A
Induction Dans La Dent Du Rotor	Bz2	Bz2	1.950	T
F.M.M Dans La Dent Du Rotor	Fz2	Fz2	0.843	A
F.M.M Totale	Ft	Ft	511.322	A
Coefficient De Saturation Des Dents	Kuz	Kuz	1.005	-
Coefficient De Saturation De La Machine	Ku	Ku	1.013	-
Courant Magnétisant	Iu	Iu	1.746	A

Tableau IV.6. Présentation des résultats de calcul du circuit magnétique.

Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons dimensionnés les parties essentielles du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (rotor, stator et le circuit magnétique).

Le dimensionnement définitif du moteur asynchrone se fait à l'aide d'un outil informatique utilisant un logiciel industriel performant (dans notre cas sous MATLAB) afin de satisfaire un cahier de charge.

Conclusion générale

Dans ce travail, on a utilisé un logiciel informatique MATLAB « langage de programmation et ce développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques. Il est utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul » afin de dimensionner un moteur asynchrone à cage d'écureuil de 2.2 KW.

Pour dimensionner la machine asynchrone à cage, on l'a défini par sa constitution et son fonctionnement, puis le bobinage afin d'effectuer les calculs sur les différentes parties (Stator, Rotor et le circuit magnétique), ces calculs nous ont aidé à avoir les caractéristiques de cette machine. Tel que notre travail est structuré en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principaux éléments de conception de la machine asynchrone à cage. Puis nous avons présenté le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, son bon rendement et de son excellente fiabilité.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la procédure de fabrication d'un moteur asynchrone et les différentes étapes.

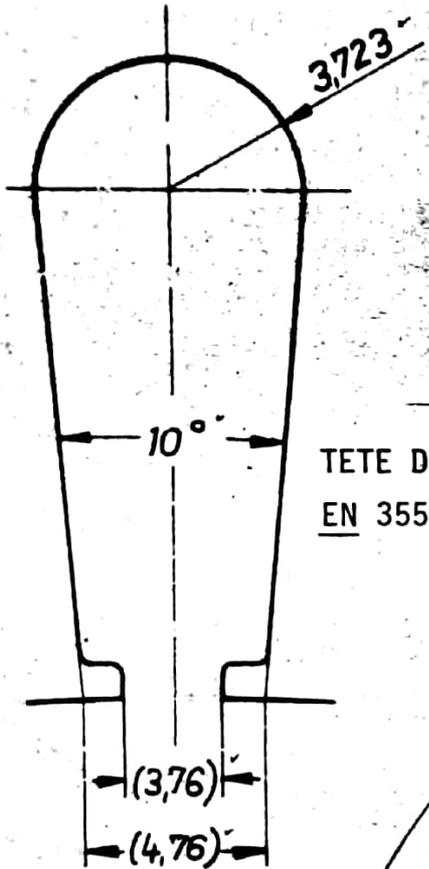
Dans le troisième chapitre, on a vu matériaux utilisés dans la construction du moteur asynchrone tel que leurs propriétés et caractéristiques.

Le quatrième chapitre et le dernier, est consacré aux calculs et l'examen des résultats de la procédure de dimensionnement à savoir quelques paramètres de la machine (rendement, la vitesse, tension nominale, courant nominal...).

On dira alors que le domaine de calcul d'une machine électrique est très vaste et l'amélioration d'une méthode de calcul des machines est un sujet d'actualité.

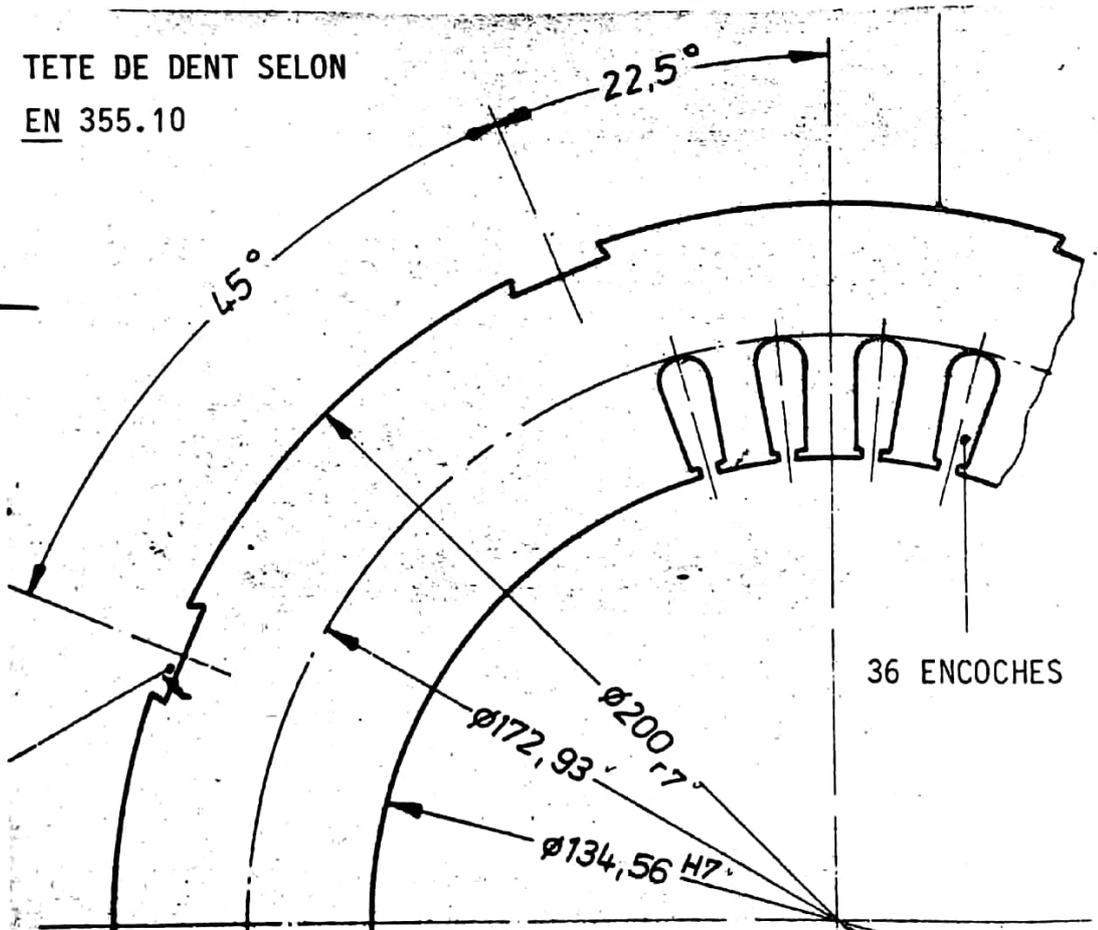
Espérons que ce travail servira de référence pour les promotions futures, afin d'améliorer les résultats de calcul.

COTE D'AJUSTEMENT	DIMENSIONS
134,56 ^{H7}	$\begin{matrix} +0,040 \\ 0 \end{matrix}$
200 _{r7}	$\begin{matrix} +0,123 \\ +0,077 \end{matrix}$



TETE DE DENT SELON
EN 355.10

CONTOUR EXTERIEUR SELON
EN 351.2/7 REPERE 5



36 ENCOCHES

DETAIL ENCOCHE

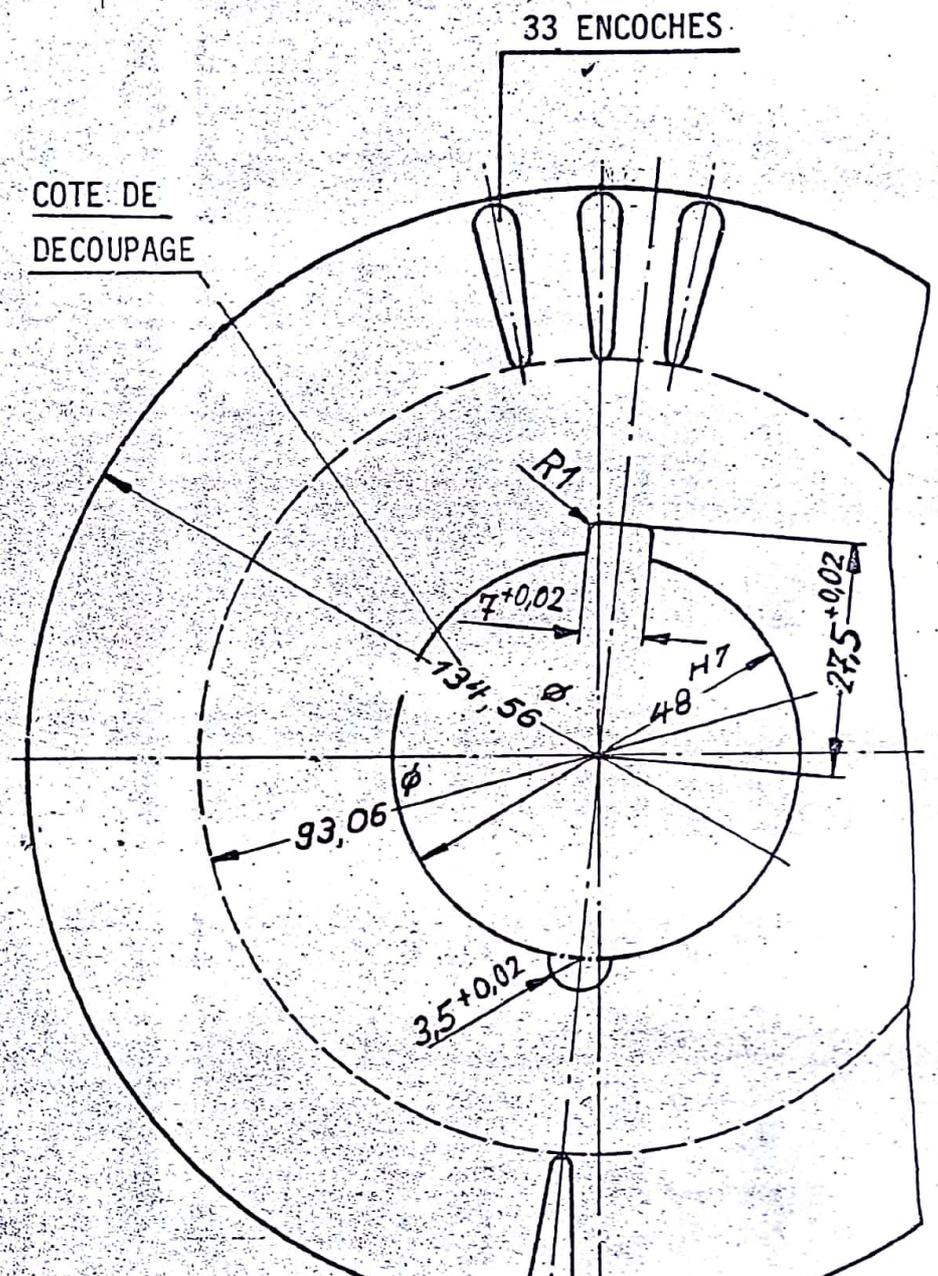
8 RAINURES D'AGRAFAGE
SELON EN 629.1/3

COTE D'AJUSTEMENT	DIMENSIONS
48 ^{H7}	$\frac{+0,025}{0}$

ENCOCHE D'EMPILAGE SELON EN 355.01/4



COTE DE
DECOUPAGE



B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm].									
0.4	1.24	1.27	1.3	1.33	1.36	1.38	1.41	1.44	1.47	1.5
0.5	1.54	1.57	1.6	1.64	1.67	1.71	1.74	1.77	1.8	1.84
0.6	1.88	1.91	1.94	1.98	2.01	2.05	2.08	2.12	2.16	2.24
0.7	2.33	2.26	2.29	2.33	2.36	2.4	2.43	2.47	2.50	2.53
0.8	2.56	2.59	2.62	2.65	2.68	2.71	2.74	2.77	2.80	2.89
0.9	2.86	2.90	2.93	2.97	3.01	3.04	3.08	3.12	3.16	3.20
1.0	3.24	3.29	3.33	3.38	3.42	3.46	3.50	3.55	3.60	3.65
1.1	3.70	3.75	3.80	3.95	3.91	3.96	4.01	4.06	4.11	4.17
1.2	4.24	4.30	4.36	4.42	4.48	4.55	4.61	4.67	4.73	4.79
1.3	4.86	4.95	5.04	5.14	5.24	5.33	5.63	5.74	5.84	5.95
1.4	5.86	5.98	6.10	6.22	6.34	6.46	6.58	6.70	6.83	6.86
1.5	7.09	7.22	7.35	7.49	6.63	7.77	7.91	8.05	8.20	8.35
1.6	8.5	8.78	9.06	9.34	9.62	9.90	10.2	10.5	10.8	11.1
1.7	11.5	11.8	12.2	12.5	12.9	13.3	13.6	14.0	14.4	14.8
1.8	15.2	15.7	16.2	16.7	17.2	17.7	18.3	18.9	19.5	20.1
1.9	20.7	21.6	22.5	23.4	24.3	25.2	26.4	27.6	28.9	30.2
2.0	31.5	33.2	35.0	36.8	38.6	40.4	42.6	44.8	47.0	49.2
2.1	51.4	54.4	57.4	60.5	63.6	66.7	71.2	75.7	80.2	84.7
2.2	89.2	94.3	99.4	104.6	109.8	115	120	126	132	138
2.3	144	1151	158	165	172	180	188	196	205	214

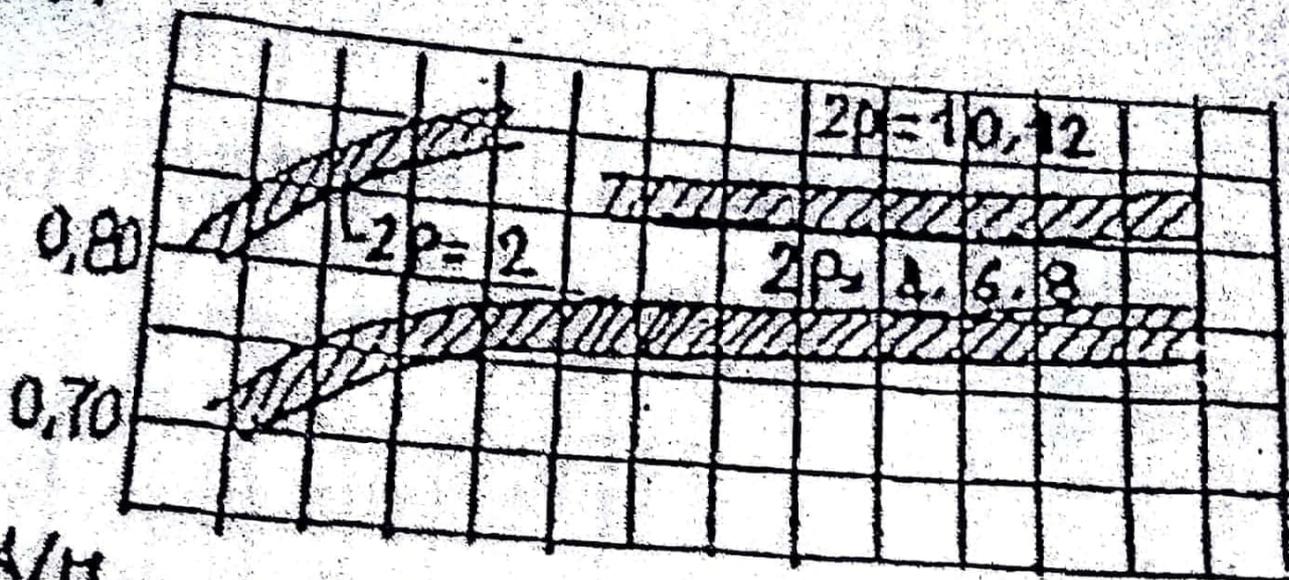
Table de magnétisation des dents des machines à courant alternatif
de l'acier 2013. (T - 1)

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm].									
0.4	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62
0.5	0.64	0.65	0.66	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.76	0.78
0.6	0.80	0.81	0.89	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97
0.7	1.0	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.15	1.18	1.21
0.8	1.24	1.28	1.29	1.32	1.35	1.38	1.40	1.43	1.46	1.49
0.9	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64	1.68	1.71	1.74	1.77	1.81
1.0	1.85	1.88	1.91	1.95	1.99	2.03	2.06	2.09	2.13	2.17
1.1	2.21	2.25	2.29	2.33	2.37	2.41	2.45	2.40	2.58	2.57
1.2	2.62	2.67	2.72	2.77	2.83	2.89	2.95	3.01	3.07	3.13
1.3	3.20	3.27	3.34	3.41	3.49	3.57	3.65	3.73	3.82	3.91
1.4	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.64	4.78	4.92	5.06
1.5	5.20	5.42	5.64	5.86	6.08	6.30	6.54	6.78	7.02	7.26
1.6	7.50	7.88	8.26	8.64	9.02	9.40	9.82	10.2	10.7	11.1
1.7	11.5	12.2	12.9	13.6	14.3	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
1.8	20.0	21.6	23.2	24.9	26.5	28.1	29.6	31.1	32.7	34.2
1.9	35.7	38.0	40.3	42.6	44.9	47.2	49.3	51.4	53.5	55.6
2.0	57.7	60.0	63.0	66.0	70.0	74.0	79.0	84.0	90.0	97.0

Table de magnétisation des dos des machines à courant alternatif
de l'acier 2013 Tableau (T- 2)

86, T

Fig III.1.i



$A_1 A/H$

10^2

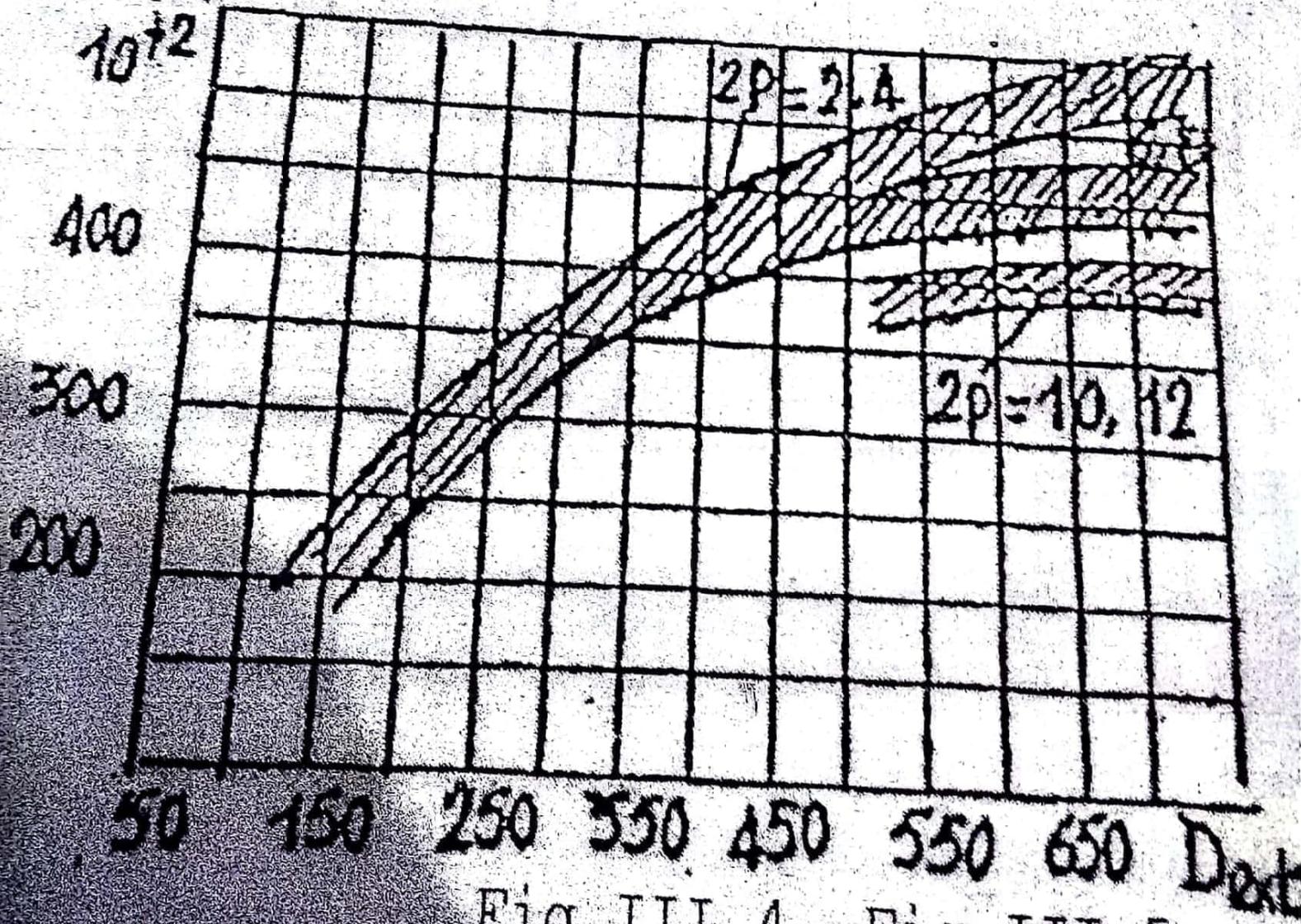


Fig III.4

Fig III.5

ECHANTILLON : 136 14

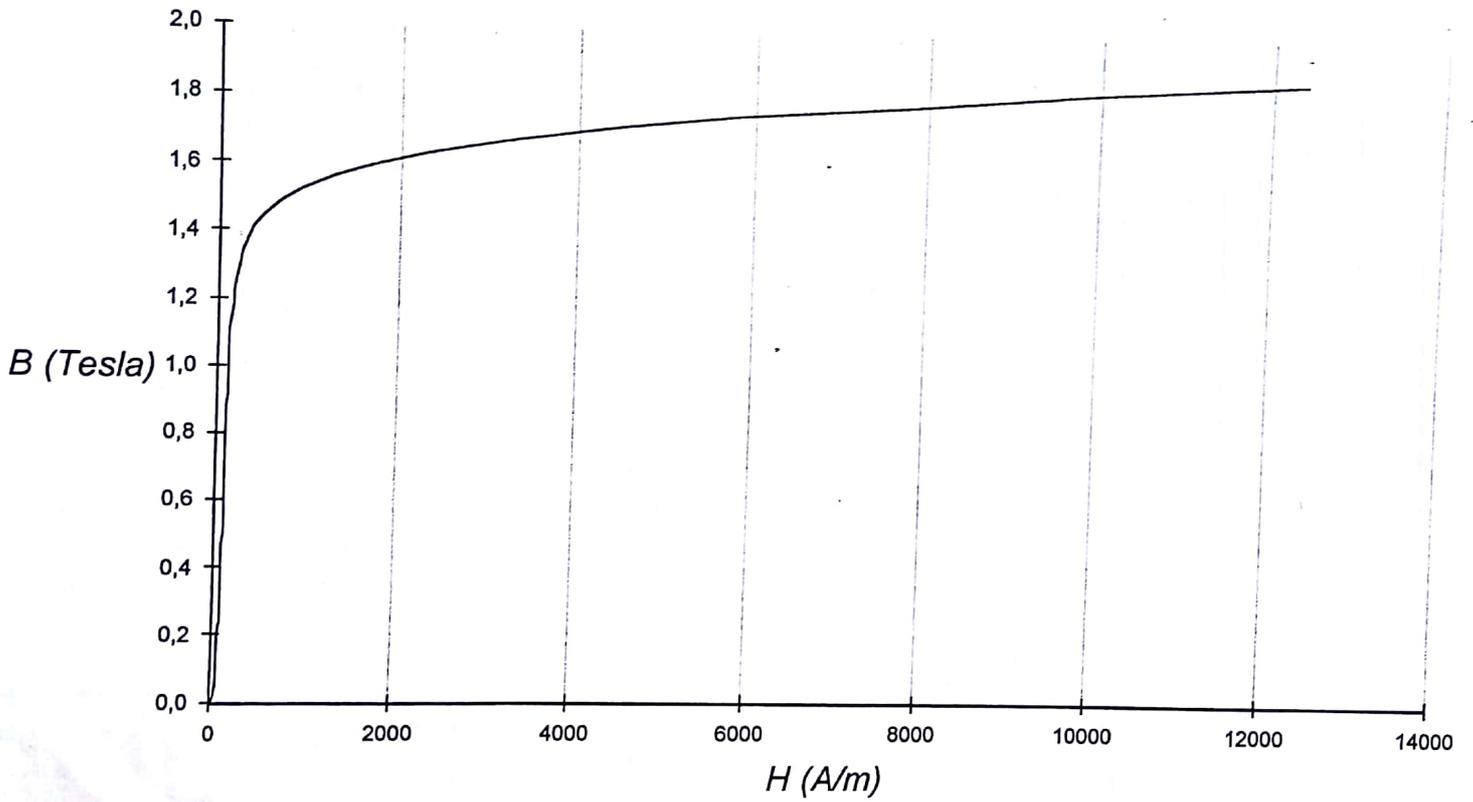
F (Hz) : 50,0

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0,9400m

$B = f(H)$





RAPPORT DE MESURE

ECHANTILLON : 136 14

jeudi 23 octobre 2014

Masse active : 0,9890 Kg

Section utile : 1,3500 cm²

Température : 22,5 °C

F : 50,0 Hz

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0,9400 m

Observations : produit ASEMETAL M800-50A

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (VA/Kg)	µa
1,876	1,238 e+4	8,560 e+0	2,662 e+2	1,206 e+2
1,836	9,900 e+3	8,290 e+0	2,042 e+2	1,476 e+2
1,795	7,880 e+3	8,010 e+0	1,544 e+2	1,813 e+2
1,756	5,785 e+3	7,240 e+0	1,148 e+2	2,416 e+2
1,717	4,432 e+3	7,000 e+0	8,321 e+1	3,083 e+2
1,678	3,229 e+3	6,740 e+0	5,923 e+1	4,135 e+2
1,639	2,359 e+3	6,386 e+0	4,195 e+1	5,529 e+2
1,600	1,734 e+3	6,103 e+0	2,985 e+1	7,343 e+2
1,562	1,254 e+3	5,808 e+0	2,131 e+1	9,912 e+2
1,524	9,150 e+2	5,507 e+0	1,547 e+1	1,325 e+3
1,487	6,592 e+2	5,195 e+0	1,157 e+1	1,795 e+3
1,449	4,922 e+2	4,893 e+0	9,086 e+0	2,343 e+3
1,411	3,833 e+2	4,603 e+0	7,462 e+0	2,929 e+3
1,373	3,116 e+2	4,334 e+0	6,380 e+0	3,506 e+3
1,335	2,583 e+2	4,082 e+0	5,607 e+0	4,113 e+3
1,297	2,229 e+2	3,848 e+0	5,034 e+0	4,630 e+3
1,258	1,946 e+2	3,633 e+0	4,571 e+0	5,144 e+3
1,220	1,753 e+2	3,432 e+0	4,203 e+0	5,538 e+3
1,183	1,593 e+2	3,241 e+0	3,887 e+0	5,910 e+3
1,145	1,452 e+2	3,059 e+0	3,601 e+0	6,275 e+3
1,107	1,380 e+2	2,877 e+0	3,354 e+0	6,383 e+3
1,070	1,316 e+2	2,704 e+0	3,121 e+0	6,470 e+3
1,032	1,270 e+2	2,536 e+0	2,914 e+0	6,466 e+3
0,994	1,232 e+2	2,369 e+0	2,793 e+0	6,420 e+3
0,957	1,234 e+2	2,223 e+0	2,640 e+0	6,171 e+3
0,919	1,188 e+2	2,080 e+0	2,462 e+0	6,156 e+3
0,881	1,174 e+2	1,947 e+0	2,316 e+0	5,972 e+3
0,843	1,176 e+2	1,824 e+0	2,190 e+0	5,704 e+3

B[m]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm].									
0.4	0.56	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61	0.61	0.82
0.5	0.63	0.63	0.64	0.65	0.66	0.61	0.67	0.68	0.68	0.69
0.6	0.70	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.74	0.75	0.76	0.77
0.7	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87
0.8	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
0.9	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08
1.0	1.0	1.11	1.13	1.14	1.15	1.17	1.18	1.20	1.21	1.23
1.1	1.25	1.26	1.27	1.29	1.29	1.32	1.33	1.34	1.36	1.38
1.2	1.41	1.46	1.52	1.58	1.64	1.70	1.76	1.82	1.88	1.94
1.3	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90
1.4	3.00	3.20	3.50	3.80	4.10	4.30	4.60	5.00	5.40	5.80
1.5	6.20	6.70	7.80	8.90	10.0	11.3	12.4	13.5	14.6	15.8
1.6	17.0	18.6	20.2	21.8	23.4	25.0	27.0	28.0	30.0	32.0
1.7	34.0	37.0	40.0	43.0	47.0	50.0	54.0	58.0	62.0	66.0
1.8	70.0	75.0	80.0	85.0	92.0	100	106	112	118	124
1.9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2.0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2.1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2.2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2.3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2.4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

Table de magnétisation de base de l'acier 2013 Tableau (T- 3)

- [1] Saouli Khelifa, Hadjadj Malika et Louali Sakina,
« Conception d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil à 8 pôles »,
Mémoire DEUA UMMTO 2009.
- [2] Taibi Mebarek, Bensmaine Messaoud,
« Dimensionnement et Simulation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil »,
Mémoire MASTER ACADEMIQUE UKM Ouargla 2015/2016.
- [3] Site internet « www.moteur_asynchrone.com »
- [4] Documentations département d'Electrotechnique UMMTO.
- [5] ELECTROTECHNIQUE-Théodore WILDI-3^{ème} édition.
2000/0074/56.
- [6] S. BETTAHAR, L. ASSELGOU, L. AIDER,
« Les différents matériaux électrotechniques utilisés dans la construction du moteur
asynchrone (E-I) et leurs contrôles »,
Mémoire de fin d'étude UMMTO 2009.
- [7] M.Kessi et K.Hamani
« Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil »,
Mémoire de fin d'étude UMMTO 2011/2012.
-

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 « electronique1.blogspot.com »

Figure I.2 « store.eurtonelectric.com ».

Figure I.3 « Étude et analyse de fonctionnement de TGBT cogénération
CEVITAL.pdf »

Figure I.4 « electronique1.blogspot.com »

Figure I.5 « Étude et analyse de fonctionnement de TGBT cogénération
CEVITAL.pdf »

Figure I.6 « sitelec.org ».

Figure I.7 « physique-appliquee.net ».

Figure I.8 « energieplus-lesite.be ».

Figure I.9 « fr.slieshare.net ».

Figure I.10 « 7-MAS_corr.pdf ».

Figure I.11 « 7-MAS_corr.pdf ».

Figure I.12 « 7-MAS_corr.pdf ».

Figure I.13 « fr.slieshare.net ».

Chapitre II :

Figure II.1 « maxicours.com ».

Figure II.2 « energieplus-lesite.be ».

Chapitre III :

Figure III.1 « nte.mines-albi.fr ».

Figure III.2 « sti.ge1.free.fr ».

Figure III.3 « leradiofil.com ».

Figure III.4 « forum.allaboutcircuits.com ».

Chapitre IV :

Figure IV.1 « au sein de l'entreprise ».

Figure IV.2 « au sein de l'entreprise ».
