

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



# Mémoire

*De fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de  
master professionnel en  
Electrotechnique Industrielle*

## Thème

**Dimensionnement en vue de l'amélioration des performances du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil EI de Type 3kW – 1410 tr/mn**

*Proposé et dirigé par:*

Mme: F. BITAM-MEGHERBI  
M<sup>elle</sup>: N. KICHOU

*Réalisé par :*

M<sup>r</sup>: RAMDANI M<sup>ed</sup> Said  
M<sup>r</sup>: HADDAR Abderrahmane

Promotion 2012/2013

# *Remerciements*

## Remerciements

Ce modeste travail a été fait par Mr RAMDNI Mohammed Said et Mr HADDAR Abdrrahmane en vue de l'obtention du diplôme Master professionnel en Electrotechnique option électrotechnique industrielle sous les instructions de Mme F. BITAM-MEGHERBI qu'on tient à remercier pour nous avoir accueillis et bien suivis tout le long de notre travail, c'est un immense honneur pour nous d'avoir travaillé à ses côtés.

Nous remercions aussi Melle N. KICHOU qui nous a encadrés au sein de l'entreprise nationale ELECTRO-INDUSTRIES dans laquelle nous avons effectué notre stage pratique, on tient à la remercier pour son soutien continu et sa grande disponibilité pour nous diriger, on se souvient de ses conseils et de ses orientations pour bien suivre toutes les étapes de fabrication des moteurs EI.

Bien qu'il soit difficile d'exprimer ici toute notre gratitude, qu'elles trouvent en cette thèse le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Sans oublier tout le personnel de L'ELECRTO-INDUSTRIES qui nous ont beaucoup aidés à bien comprendre le rôle de chaque machine et son fonctionnement. Nous remercions particulièrement les chefs d'atelier Mr AREZKI et Mr SAMIR.

Nous remercions d'avance les membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire*

*De mon père.*

*Je le dédie aussi et surtout à celle qui est et qui sera un symbole de courage et qui m'a non seulement accompagné durant toutes les étapes de ma vie, mais aussi guidé et encouragé et n'a lésiné sur aucun moyen. Celle à qui je dois tout, même ma vie, ma mère.*

*Je le dédie aussi à :*

*Mes sœurs.*

*Tous mes amis (es).*

*A toute ma famille.*

*Sans oublier :*

*Ali, Samir, Mohamed, Madjid Yahia et Aziz.*

*Particulièrement :*

*Mourad et sa famille.*

*Abderrahmane*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Mes très chers parents pour leur amour et pour le courage et la volonté qu'ils m'ont inculqués.*

*Je le dédie aussi à :*

*Mes sœurs.*

*A toute ma famille.*

*Tous mes amis (es).*

*Sans oublier :*

*Samir, Ferhat, Djemal, Ramzi.*

*Particulièrement :*

*Abderrahmane et sa famille.*

*Mourad*

# *Sommaire*

## **Introduction générale**

### **Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones.**

Introduction .....	1
I -Définition et description de la machine asynchrone .....	1
I-1 L'organisation de la machine asynchrone .....	1
I-1-1 Le stator .....	1
I-1-2 Le rotor .....	2
I-1-3 Organes mécaniques .....	3
I-1-4 L'entrefer.....	3
I-2 Principe du moteur asynchrone .....	3
I-2-1 Vitesses des moteurs asynchrones .....	5
I-2-2 Glissement d'une machine asynchrone .....	6
I-2-3 Le couple .....	7
I-2-4 Bilan des puissances .....	7
I-3 Fonctionnement d'une machine asynchrone .....	7
I-3-1 Fonctionnement en moteur .....	7
I-3-2 Fonctionnement en génératrice.....	8
I-4 Démarrage d'un moteur asynchrone .....	8
I-4-1 Démarrage sous tension réduite .....	8
I-4-2 Démarrage rotorique .....	9
I.5 Freinage des machines asynchrones .....	9
Conclusion.....	10

### **Chapitre II : Processus de fabrication des moteurs E I**

I Présentation de l'entreprise .....	11
I-1 Organigramme du complexe d'AZAZGA (M E I) .....	11
I-2 Histoire de l'entreprise .....	12
II Processus de fabrication des moteurs E I .....	13
Introduction.....	13

II-1-Bâtiment 2A	
1-Atelier de découpage .....	13
a- Découpage des tôles magnétiques .....	13
2- Atelier de moulages sous pression .....	15
3- Atelier de fabrication des rotors .....	16
3-1 Description du rotor à cage E I .....	16
3-2 Les étapes de fabrication des rotors à cage E I .....	17
3-2-a Fabrication des rotors à cage en cuivre .....	17
3-2-b Fabrication des rotors à cage en aluminium .....	19
II-2-Bâtiment 2	
1-Usinage des différentes pièces .....	20
a-Fabrication des arbres rotorique.....	20
b-Usinage de la boite a bornes .....	21
c-Usinage des flasques .....	21
d-Usinage des carcasses .....	21
2- Atelier de bobinage .....	21
2-1 Secteur de préparation des bobines .....	22
2-2 Secteur de préparation d'isolants .....	22
2-3 Secteur préparation du stator bobiné (bobinage de paquet statorique) .....	23
3- Atelier de montage .....	24
3-1 Secteur pré-montage .....	24
3-2 Secteur du montage .....	24
Conclusion .....	25

### **Chapitre III :        Dimensionnement de la machine asynchrone.**

Introduction .....	26
I Dimensionnement du moteur .....	26
I-1 Dimensionnement du stator .....	26
I-1-1 Dimensionnement de la feuille statorique .....	30
I-2 Choix de l'entrefer .....	33

I-3 Dimensionnement de rotor .....	33
I-3-1 Dimensionnement de la feuille rotorique .....	35
I-3-2 dimensionnement de l'anneau .....	37
II-Calcul du circuit magnétique .....	37
II-1 Circuit magnétique statorique .....	38
II-2 circuit magnétique rotorique .....	38
II-3 Force magnétomotrice dans l'entrefer .....	39
II-4 Force magnétomotrice totale par paire de pole.....	40
II-5 Coefficient de saturation .....	40
II-6 Courant magnétisant .....	40
II-7 Réactance de magnétisation.....	40
II-8 Coefficient de dispersion magnétique du stator .....	41
II-9 Force électromotrice à vide $E_0$ .....	41
III Calcul des paramètres électrique des enroulements .....	41
III-1 Paramètres statorique .....	41
III-2 Paramètres rotorique.....	43
III-3 Paramètres au démarrage .....	46
III-4 Calcule des pertes et du rendement .....	48
III-5 Calcul des performances du moteur.....	51
<b>Chapitre IV Elaboration d'un programme du calcul .....</b>	<b>59</b>
Conclusion générale .....	95
Bibliographie	



# *Introduction*

## *Générale*

## Introduction générale

Les moteurs asynchrones triphasés, dits aussi moteurs à induction sont les moteurs les plus utilisés pour l'entraînement des machines dans l'ensemble des applications industrielles. Ces moteurs s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : robustesse, bon rendement, excellente fiabilité, simplicité d'entretien, facilité de mise en œuvre et faible coût.

La fabrication et le dimensionnement des moteurs asynchrones consistent à évaluer quantitativement et qualitativement toutes les variables qui caractérisent leur fonctionnement, en vue de satisfaire un cahier des charges donné et les diverses contraintes relatives à l'utilisation des matériaux. Cependant après un dimensionnement du moteur, sa fabrication sera possible.

Notre travail porte sur le dimensionnement d'un moteur asynchrone à cage de 3 kW en vue d'améliorer ses performances. Pour cela, on augmente la longueur de son stator qui passe de 130 mm à 183 mm et on change le diamètre des conducteurs des bobinages du stator de ce moteur. Nous passons ainsi du diamètre 0.56 mm au diamètre 0.9 mm. Les différents paramètres de ce moteur ont été calculés en utilisant une méthode et un schéma équivalent déjà utilisés dans d'autres travaux [1]. Pour mener à bien notre étude, nous avons effectué les calculs des différents paramètres de la machine en utilisant le logiciel Mathcad 14.

Pour mieux présenter notre travail, nous l'avons divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation générale des machines asynchrones triphasées.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté l'entreprise Electro-Industries d'Azazga, où nous avons effectué un stage pratique de trois mois. Nous y avons décrit les différentes étapes de fabrication des moteurs à cage d'écureuil fabriqués au sein de l'entreprise.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la méthode de dimensionnement des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Nous y avons donné toutes les équations qui nous permettent de dimensionner un moteur à cage.

Le quatrième chapitre est dédié aux calculs de dimensionnement et aux différents résultats.

A la fin de ce mémoire, nous donnons une conclusion générale de notre travail en mettant en évidence les nouvelles performances du moteur avec le nouveau dimensionnement.

# *Chapitre I*

*Généralités sur les machines  
asynchrones.*

**Introduction**

Plus de la moitié de l'énergie électrique produite dans les pays industrialisés est transformée en énergie mécanique par des moteurs électriques. De tous ces moteurs, les moteurs asynchrones (à induction) sont les plus répandus dans l'ensemble des applications industrielles. De ce fait les performances requises de ces moteurs doivent être de plus en plus élevées. Ils doivent allier souplesse, précision et fiabilité aux impératifs d'économie d'énergie. Il n'est donc pas du tout surprenant de voir que ces moteurs font encore l'objet d'études.

**I -Définition et description de la machine asynchrone :**

La machine asynchrone, connue également sous le terme de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor et sa particularité est de fonctionner avec un induit en court-circuit. Les machines possédant un rotor « à cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas proportionnelle à la fréquence des champs tournants statoriques.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'évolution de l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils) et dans l'électroménager. La machine asynchrone était à l'origine, uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice, par exemple le cas des éoliennes. Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique, à leur coût de fabrication et leur facilité d'entrain.

**I-1 L'organisation de la machine asynchrone :**

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

**I-1-1 Le stator** (partie fixe de la machine) :

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor. Dans tous les cas le stator reste le même dans son principe. Il comporte une carcasse en acier ou en font ou bien en aluminium. Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique constitué d'un

empilement de plaques de tôles afin de limiter les courants de Foucault ; ce cylindre est entaillé d'encoches permettant d'y loger un bobinage qui est toujours relié à la source, et forme  $p$  paires de pôles.

### **I-1-2 Le rotor** (partie tournante de la machine) :

Il est placé à l'intérieur du stator et constitué d'un empilement de tôles magnétiques poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir les conducteurs. Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie dans le cas où la machine est utilisée comme moteur, il tourne à une vitesse inférieure à celle de champ tournant. Il doit être feuilleté pour réduire les pertes par les courants de Foucault. L'empilement des encoches découpées dans les tôles est légèrement incliné par rapport à l'axe de la machine d'une façon à réduire les variations de réluctance, et certaines pertes dues aux harmoniques. Il existe deux types de rotor de moteur asynchrone : le rotor bobiné et le rotor à cage.

#### **I-1-2-1 Rotor bobiné :**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, circuit d'électronique de puissance...) qui permettent le bon démarrage de moteur et aussi les réglages de la caractéristique couple/vitesse.

#### **2-2 Rotor à cage :**

Le circuit de ce rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes conductrices formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

Dans certaines constructions notamment pour des moteurs à basse tension la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il

n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Puisque les moteurs à cage sont les plus utilisés et aussi les plus fabriqués, nous concentrons notre étude sur les moteurs asynchrones à rotor à cage.

### I.1.3 Organes mécaniques :

Ils permettant la rotation du rotor et le maintien des sous-ensembles. Le stator reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge. Un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes.

### I.1.4 L'entrefer :

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

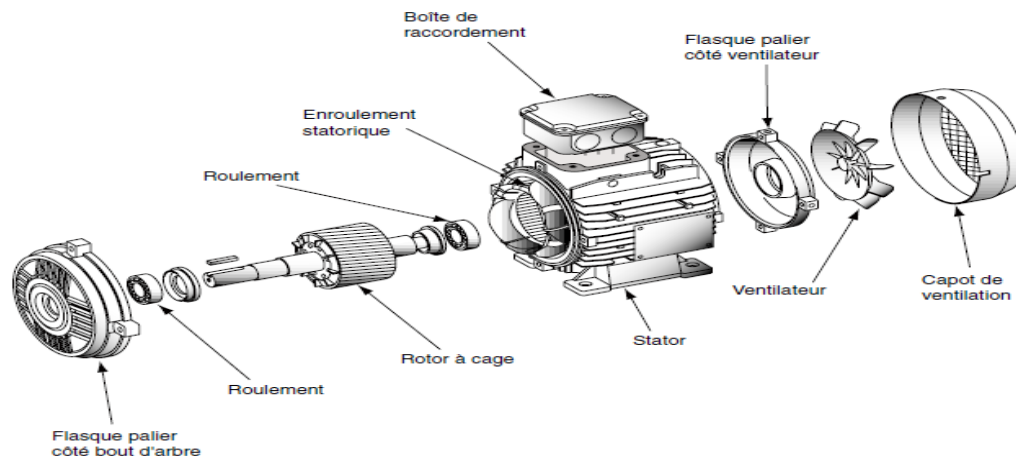
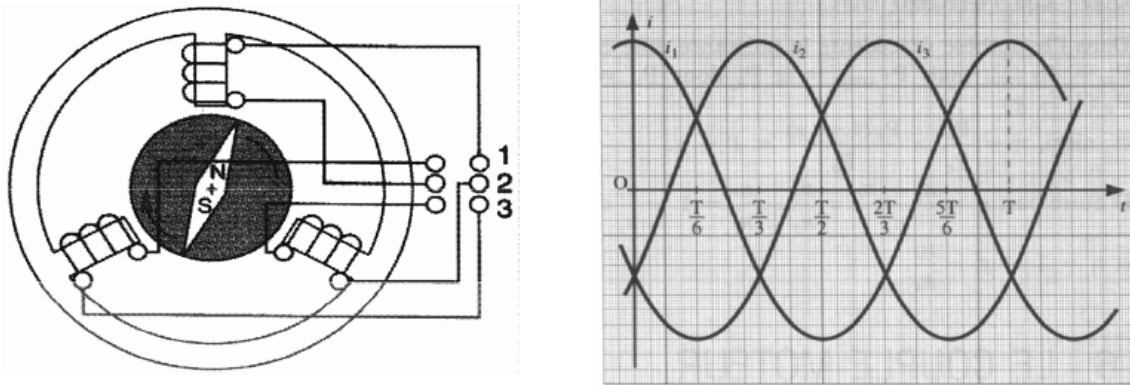


Figure (I-1) : Différents éléments de la machine asynchrone.[11]

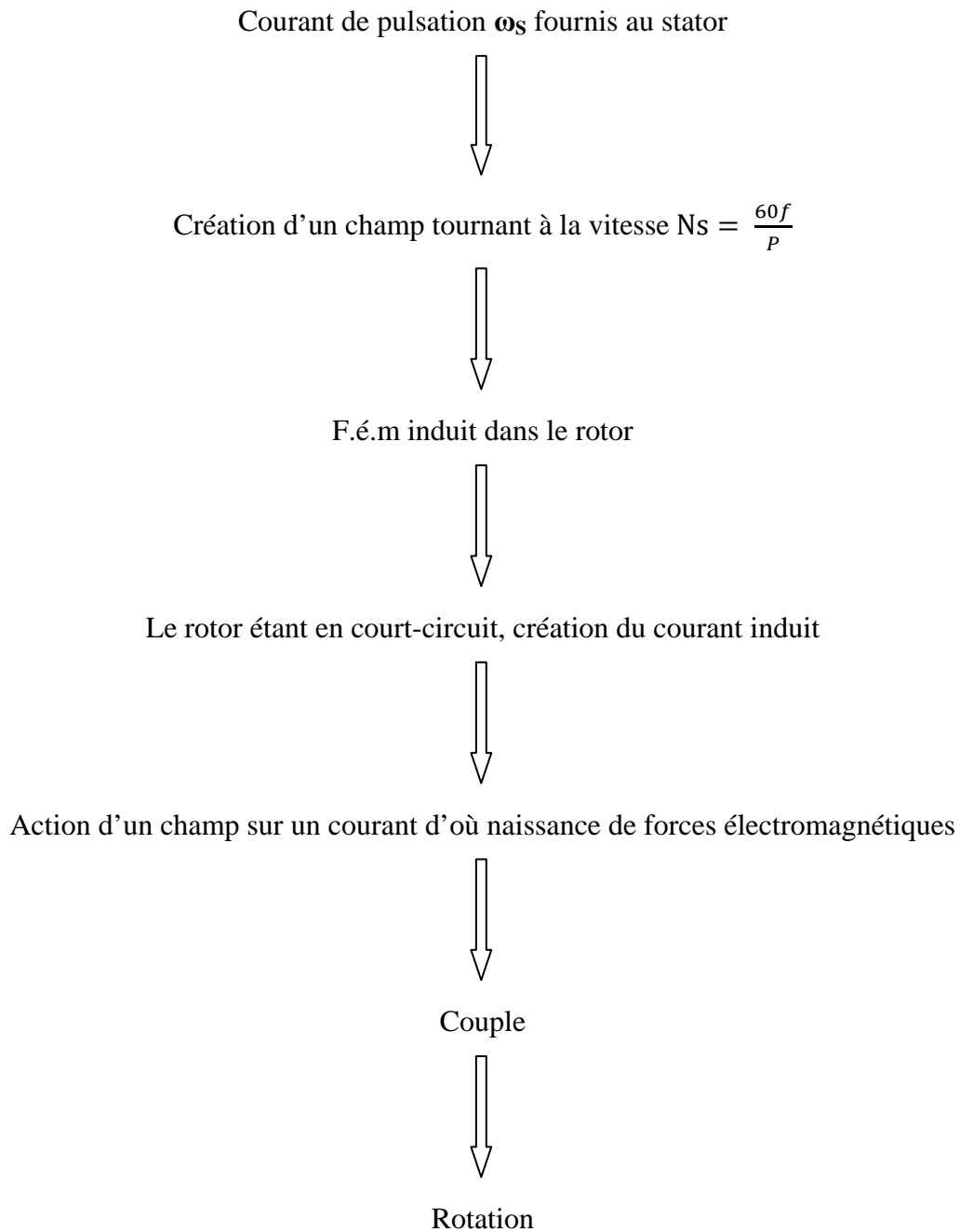
## I.2 Principe du moteur asynchrone : [11]

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé repose sur la création d'un champ tournant qui est dû à des courants sinusoïdaux de pulsation  $\omega$  qui sont injectés dans des bobines identiques placées à  $120^\circ$  c'est-à-dire  $(2\pi/3 \text{ rad})$ . Ceci permet de créer les trois champs alternatifs de pulsation  $\omega$  qui se composent pour former le champ tournant. La vitesse de rotation de ce champ magnétique s'appelle vitesse de synchronisme. Si l'on place au milieu de ces bobines un conducteur, celui-ci sera soumis à des variations de flux. Ainsi, le conducteur voit passer un champ tournant, donc variable selon la loi de Lenz. Cette variation

de champ magnétique crée dans le circuit rotorique des courants induits qui s'opposent à la cause qui leur a donné naissance. Ce qui provoque une force magnétomotrice qui entraîne le rotor en rotation. Si l'on inverse deux des trois fils de l'alimentation triphasée, le rotor tourne en sens inverse.



La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique. Les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor est appelée glissement. Lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme (fonctionnement hypersynchrone), la machine fonctionne en générateur alternatif.

**Synoptique de la création d'un couple moteur****I.2.1 Vitesse des moteurs asynchrones :**

La vitesse du champ tournant du stator n'est pas influencé par la variation de tension, mais elle est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle aux nombre de paires de pôles constituant le stator.

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

Avec

$n_s$  : vitesse de synchronisme en tr/mn

P : le nombre de paires de pôles

f : fréquence des courants statoriques en Hz.

Pour les fréquences industrielles de 50 Hz et 60 Hz, les vitesses de rotation du champ tournant ou de synchronisme en fonction du nombre de pôles sont les suivantes.

Tableau (I-1) : Vitesse de la machine asynchrone en fonction du nombre de paires pôles et de la fréquence.

Nombres de pôles (2P)	50 Hz	60 Hz
2 pôles	3000 tr/mn	3600 tr/mn
4 pôles	1500 tr/mn	1800 tr/mn
6 pôles	1000 tr/mn	1200 tr/mn
8 pôles	750 tr/mn	900 tr/mn
10 pôles	600 tr/mn	720 tr/mn
12 pôles	500 tr/mn	600 tr/mn

### I.2.2 Glissement d'une machine asynchrone :

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité doit fonctionner avec un faible glissement. Le glissement ( $g$ ) mesure l'écart relatif entre la vitesse de rotation  $n$  de la machine et la vitesse synchrone  $n_s$  du champ tournant.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$g$  : glissement

$n_s$  : vitesse de synchronisme

$n$  : vitesse de rotation du rotor

**Remarque :**

$g = 0$	$n = n_s$	le moteur tourne au synchronisme
$g = 1$	$n = 0$	le moteur est à l'arrêt
$0 < g < 1$		le moteur fonctionne en charge
$g < 0$		le moteur fonctionne en génératrice

**I.2.3 Le couple :**

Il est important de connaître la valeur du couple délivré par l'arbre de la machine au démarrage c'est-à-dire lorsque la vitesse est nulle. Il est aussi important de connaître le couple maximum délivré par la machine, appelé également couple de décrochage parce que la machine cale si le couple de charge est plus grand que le couple maximum de cette machine.

**I.2.4 Bilan des puissances :**

Le bilan des puissances d'une machine asynchrone est résumé sur la figure 3.

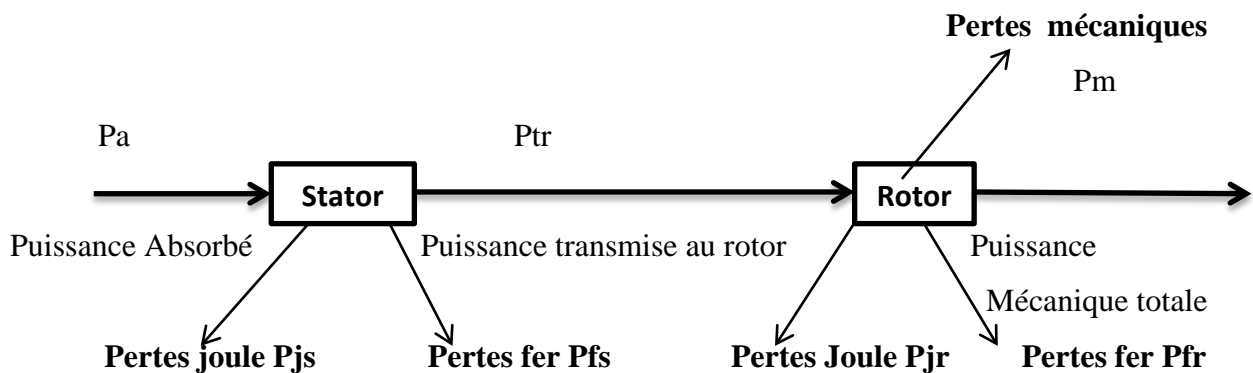


Figure (I-3) : Bilan de puissance d'une machine asynchrone.

**I.3 Fonctionnement d'une machine asynchrone :****I.3.1 Fonctionnement en moteur :**

On branche le stator de la machine asynchrone sur un réseau triphasé. Le champ magnétique statorique tourne à une vitesse  $n_s$  et induit dans les enroulements rotoriques une force électromotrice qui crée un flux qui s'ajoute au flux statorique. L'interaction entre les champs statorique et rotorique crée un couple moteur en vue de vaincre le couple résistant. Ce qui fait que le rotor tourne avec une vitesse angulaire  $\omega$ .

**I.3.2 Fonctionnement en génératrice :**

Si nous augmentons la rotation d'une façon que  $\omega > \omega_s$  le glissement devient négatif. En alimentant le rotor par une source triphasée. Par conséquent le couple développé par la machine devient un couple moteur et on aura le fonctionnement en génératrice. Ce qui nous permet d'avoir une transformation d'énergie mécanique en énergie électrique qu'elle délivre au réseau.

**I.4 Démarrage d'un moteur asynchrone : [4]**

Le démarrage d'un moteur asynchrone pose deux problèmes majeurs

- Le courant de démarrage qui est très important et qui peut atteindre jusqu'à 10 fois le courant nominal de la machine.
- Le couple moteur qui est proportionnel au courant donc si le courant augmente le couple augmente aussi et si le courant devient faible le couple aussi.

En absence d'un variateur de fréquence (de vitesse) ou d'un démarreur, il existe d'autres méthodes pour limiter le courant de démarrage :

**I.4.1 Démarrage sous tension réduite :**

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée de démarrage du moteur ce qui représente un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage. Le couple moteur est également réduit, ce qui augmente la durée dans laquelle le moteur atteint son régime permanent.

**➤ Démarrage étoile-triangle :**

Lors d'un démarrage étoile-triangle, le moteur est d'abord connecté avec un couplage étoile, quand le démarrage est effectué on passe au couplage triangle. Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par racine de trois ( $\sqrt{3}$ ) les tensions appliquées. Ainsi le courant maximal absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage triangle.

**➤ Démarrage par autotransformateur :**

Dans ce mode de démarrage, le stator de la machine asynchrone est relié à un auto-transformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée et le courant ne dépasse pas la valeur maximale.

➤ **Démarrage résistif :**

Lors d'un démarrage résistif, on insère les résistances en série avec les enroulements statoriques ce qui a pour effet de limiter la tension à leur bornes. Une fois le démarrage effectué, on les court-circuite. Cette opération peut être effectuée progressivement par un opérateur à l'aide d'un rhéostat de démarrage.

**I.4.2 Démarrage rotorique :**

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacteurs (bagues et balais) permettant les connexions électriques des enroulements rotoriques. Ces machines sont à prix de revient très important que leurs homologues dits à « cage d'écureuil ».

**I.5 Freinage des moteurs asynchrones : [4]**

On distingue plusieurs types de freinage :

➤ Arrêt libre :

C'est la mise hors tension du stator de la machine asynchrone.

➤ Arrêt contrôlé :

On réduit progressivement la tension statorique pour la faire passer à tension nulle.

➤ Freinage hypersynchrone :

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse du moteur, on peut arrêter un moteur. Le couple de freinage est faible : la courbe du couple en fonction de la vitesse (voir les trois domaines de fonctionnement de la machine asynchrone) pour différentes valeurs du glissement montre que le couple résistant n'est pas très important pour un glissement compris entre 0 et -1. Cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone.

➤ Arrêt par injection de courant continu :

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine, mais les

contraintes en courant sont également très sévères. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage.

➤ Arrêt à contre-courant :

Le principe consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hyper synchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale).

La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement : On peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité.

Enfin, avec cette méthode le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est égale à 0 tr/min, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge) sinon la rotation s'inverse.

➤ Freinage mécanique par électro-frein :

Ce système est constitué d'un frein à disque solidaire de l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires initialement serrées hors tension sont commandées par un électroaimant. Après alimentation de l'électroaimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre ; la coupure de l'alimentation provoque le freinage. Ce dispositif aussi appelé « frein à manque de courant » est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les machines électriques en particulier sur les machines asynchrones dont on a défini les différentes parties soit électrique ou mécanique. Nous y avons également donné le bilan des puissances et les différents régimes de démarrage et de freinage des machines asynchrones.

# *Chapitre II*

*Fabrication des moteurs E I.*

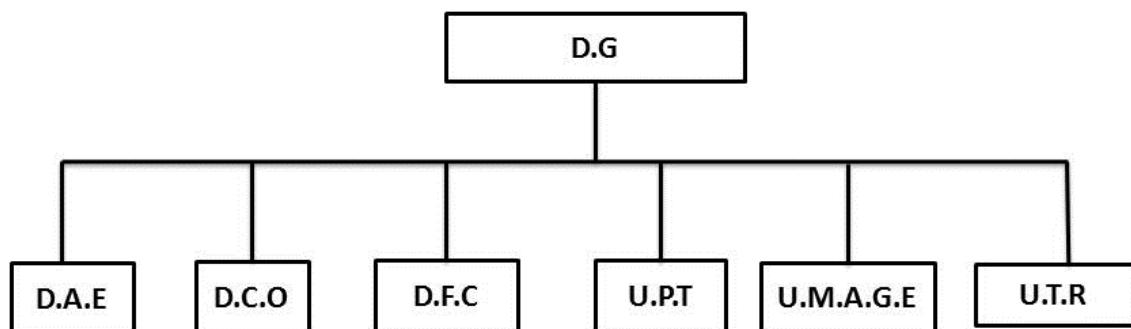
**I-Présentation de l'entreprise : [2]**

L'entreprise (Electro-Industries) est d'une superficie de 45 ha et 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.

Electro-Industries est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des moteurs électriques et des transformateurs de distribution. 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 DIN (degrés de protection des moteurs électriques), VDE (Règlement relatif aux machines électriques) et sont conformes aux recommandations européennes CE et aux normes internes sévères préconisées par le donneur de licence SIEMENS. Le niveau de leur qualité a été approuvé par la clientèle locale (SONALGAZ, ENMTP, ENIEM, KAHRIF) et étrangère (Russie, Pays Africains tels le Sénégal et le Mali...etc).

La qualification professionnelle, la maîtrise technologique et les matières de fabrication obéissent aux paramètres rigoureux de fiabilité technique et de compétitivité de leurs produits et services.

**I-1-Organigramme du complexe d'AZAZGA (M E I) : [2]**

*Légende :*

**D.G** : Direction générale.

**D.A.E** : Direction de l'Administration et de l'Emploi.

**D.C.O** : Direction Commerciale.

**D.F.C** : Direction des Finances et Comptabilité.

**U.P.T** : Unité Présentation Technique.

**U.M.A.G.E** : Unité Moteurs, Alternateurs et Groupes Electrogènes.

**U.T.R** : Unité Transformateur.

**I-2-Histoire de l'entreprise :[10]**

A l'origine, l'entreprise est issue de la réorganisation du secteur industriel opéré en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la reconstruction de l'ancienne ENEL (Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques) en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, société par action (EPE/SPA), parmi lesquelles figure Electro-industries.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemands, en l'occurrence SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction. L'infrastructure est réalisée par les entreprises algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMAL.

La production annuelles prévue initialement porte sur :

1500 transformateurs de 50 à 1600 KVA.

50000 moteurs asynchrones triphasés de 0.18 à 400 kW.

2000 alternateurs 17.5 à 2000kVA.

**➤ Entée en production :**

Secteur transformateur : 1985.

Secteur moteurs/ alternateurs : 1986.

Ces produits sont fabriqués sous la licence SIEMENS jusqu'en 1992.

**➤ Evolution à 1998 :**

- Extension des capacités de production des transformateurs de 1500 à 5000 unités/an.
- Développement de la gamme de moteurs monophasés.
- Développement de l'activité de groupes électrogènes.
- Développement de moteurs destinés à la climatisation.
- Extension verticale de la gamme de transformateurs (2000 kVA).
- Extension horizontale de la gamme du moteur en type et variance.

**II-Processus de fabrication des moteurs E I :****Introduction**

Ce qui concerne la fabrication des moteurs, tout se fait dans l'unité de fabrication des moteurs asynchrones(UMP). Dans cette unité on s'occupe essentiellement de la fabrication des moteurs asynchrones triphasés et monophasés à différentes hauteurs d'axes, mais sa production est basée surtout sur les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Ainsi, notre travail est orienté vers le suivi du processus de fabrication des moteurs asynchrones triphasés et surtout vers la fabrication des rotors à cage puisque le reste des pièces est élaboré selon le même principe.

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

Après cette phase de contrôle vient le lancement de la production des moteurs dans deux bâtiments.

**II-1-Bâtiment 2A :**

Dans ce bâtiment sont réalisés tous les travaux de transformation des tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces constituant les moteurs asynchrones. Ce bâtiment est divisé en trois ateliers :

- Atelier de découpage ;
- Atelier de moulages sous pression ;
- Atelier de fabrication des rotors.

**1-Atelier de découpage :****a-Découpage des tôles magnétiques :**

L'atelier reçoit des rouleaux de tôles magnétiques qui sont importées par l'Electro industries. Ces tôles sont isolées soit au vernis utilisé pour les moteurs à hauteurs d'axe entre 183 mm à 404 mm, soit non isolées. L'isolation de ces dernières se fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteur d'axe entre 70 mm à 183 mm.

Les tôles sont toujours isolées d'une façon ou d'une autre afin de limiter l'effet des courants de Foucault. Les tôles utilisées pour les moteurs ont des épaisseurs qui varient entre 0.35 mm à 0.50 mm . On utilise les tôles minces dans les moteurs pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique.

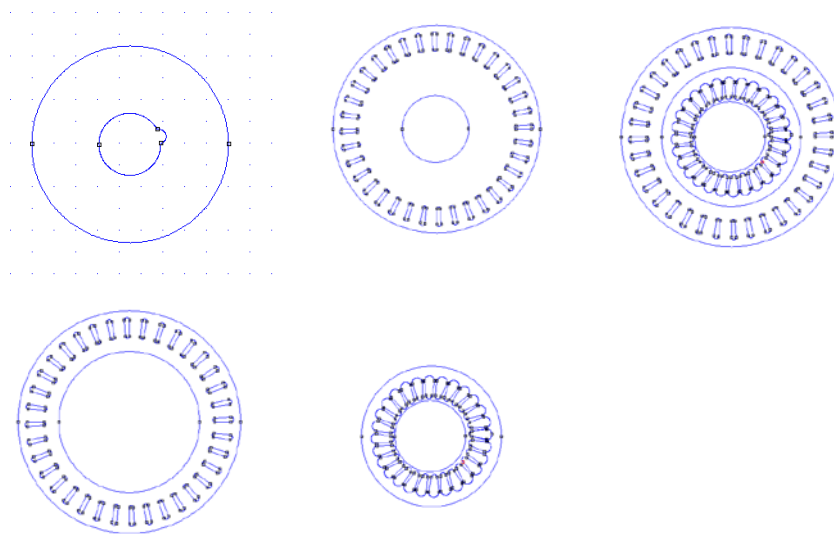
**N B :** Un échantillon de la tôle magnétique est envoyé au laboratoire de l'Electro-Industrie Pour vérifier les caractéristiques de cette tôle.

Le procédé de découpage le plus répandu dans cet atelier et celui de découpage automatique successif avec des machines dites presses rapides pour outils successifs.

Avant de lancer la production dans la presse rapide, en premier lieu, un rouleau de tôle, est placée sur le dévidoir de la machine. Cette tôle est tirée automatiquement pour passer sur un redresseur qui élimine toutes les bosses et pliages.

- La tôle subit ensuite un graissage à l'huile afin de faciliter le découpage et préserver la tôle.  
 - La tôle avance jusqu'à arriver entre le poinçon et la matrice (l'outil) de la machine, puis commence le découpage sur plusieurs étapes dans l'ordre qui suit :

- Découpage des couronnes
- Encochage de la tôle rotoriques
- Encochage de la tôle statorique et découpage de diamètre de rotor



Tôle statorique

Tôle rotorique

Après avoir obtenu les premières pièces, on les envoie directement au contrôle pour confirmer le bon découpage des tôles statorique et rotorique et le bon positionnement de l'outil, ces tôles subissent les contrôles suivants :

- vérification du nombre d'encoches du rotor ainsi que celles du stator.
- vérification de type d'encoches.
- vérification de diamètre de fond d'encoche.
- vérification du diamètre intérieur de la tôle statorique.

- Vérification du diamètre extérieur de la tôle rotorique et statorique.
- Vérification de la circularité des tôles.
- Vérification de la co-axialité.

Ces contrôles se font à l'aide d'un pied à coulisse et d'un palmer (micromètre).

Une fois tous ces contrôles effectués et conformes aux données de la fiche de contrôle, le feu vert est donné pour lancer la production.

Dans ce procédé, on découpe et on encoche dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques. Une fois les tôles découpées et encochées, elles sont évacuées vers l'extérieur de la presse rapide à l'aide des convoyeurs empilant séparément les tôles statoriques seules et les tôles rotoriques seules. Ce procédé est utilisé pour fabriquer les tôles magnétiques des petits et moyens moteurs.

**N B :** Une fois que la production est lancée, toutes les deux heures, un échantillon de tôles subit un contrôle.

En ce qui concerne les grands moteurs ayant une hauteur d'axe allant de 253 mm à 404mm, les tôles sont découpées sur deux presses. La première c'est la presse de pré-découpage qui découpe les couronnes dans la tôle magnétique et elle découpe aussi les renieurs d'agrafes des paquets statorique, les trous de fixation des paquets rotorique et aussi les trous d'axe. La deuxième presse semi-automatique est équipée d'une matrice qu'on lui place suivant le type de l'encoche et d'un poinçon aussi bien choisi pour découper les encoches dans la couronne. La production n'est lancée qu'après avoir effectué tous les contrôles comme ceux effectués pour les tôles des petits et moyens moteurs.

Une fois les tôles sont prêtes à l'utilisation elles sont envoyées vers le magasin.

Dans ce bâtiment sont réalisées aussi toutes les pièces qui rentrent dans la fabrication des moteurs en version aluminium par exemple, les carcasses, les flasques, les boites à bornes, ...etc.

## **2-Atelier de moulages sous pression :**

Dans cet atelier s'effectue la fusion d'aluminium à une température supérieure à **760°C**. Le moule est aussi chauffé à plus de **180°C** pour éviter le choc thermique et le refroidissement brusque de l'aluminium. Ce dernier, fondu à haute température, est injecté dans des moules conçus spécialement pour chaque pièce comme la carcasse ou les flasques.

Dans cet atelier s'effectue aussi le coulage des rotors en aluminium pour les petits et moyen moteurs.

### 3-Atelier de fabrication des rotors :

Nous avons bien suivi la procédure de fabrication des rotors E I, puisque le rotor est la partie la plus essentiel du moteur et parce que plusieurs modèles des rotors sont fabriqués par l'Electro-Industries.

#### 3-1-Description du rotor à cage E I : [3]

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits et les moyens moteurs. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

Les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium ou de cuivre forment la cage. Souvent, ces barres sont uniformément inclinées par rapport à l'axe du rotor pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible.

Le rotor à cage est très résistant et solide mais il présente quelques défauts qui apparaissent peuvent être dus au vieillissement des constituants du moteur, ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication. Ces différents défauts provoquent la défaillance de circuit rotorique ; parmi ce défaut on trouve :

- Les cassures de barres.
- Les cassures des d'anneaux.
- Cassure d'une portion d'anneau.
- Cassure de deux portions d'anneau en quadrature.
- Cassure de deux portions d'anneau en regard sur la même barre

Pour éviter ces différents types de défauts, il faut éviter tout problème minime à l'étape de fabrication et d'effectuer une maintenance périodique durant laquelle les éléments de la chaines sont remplacer après une durée d'utilisation finie.

**3-2-Les étapes de fabrication des rotors à cage E I :**

A l'Electro-Industrie, deux catégories de rotors à cage d'écureuil sont fabriquées. La cage est soit en aluminium pour les moteurs de faible et moyenne puissance, soit en cuivre pour les moteurs de forte puissance.

**a-Fabrication des rotors à cage en cuivre :****➤ Superposition des tôles**

Les tôles rotoriques sont récupérées au magasin puis sont positionnées et empilées manuellement pour former des paquets de tôles d'une longueur bien précise suivant le type du moteur à fabriquer.

**➤ Paquetage et rivetage des paquets de tôles**

Une fois les paquets de tôles rotoriques bien positionnés on les place sur une presse et on insère des rivets dans les trous de fixation des paquets. A l'aide de la presse on exerce une force suffisante pour déformer un peu les rivets de chaque extrémité et on obtient des paquets bien fixés.

**➤ Brochage de la rainure de clavette**

On place le paquet sur une machine linéaire équipée d'une scie à dents et on coupe la rainure pour placer une clavette qui fixe bien le paquet à l'arbre et empêche le glissement de l'ensemble lorsque il tourne à grande vitesse.

**➤ Emmanchement de l'arbre**

Après avoir placé la clavette dans son logement dans l'arbre on place l'arbre dans le paquet à l'aide d'une presse.

**➤ Emmanchement des barres intérieures**

Puisque les moteurs à rotors à cage en cuivre sont principalement des puissants moteurs, pour éviter l'appel des grands courants au démarrage, on utilise souvent des rotors à double cage. Ainsi, on commence par insérer les barres en cuivre plates qui constituent la première cage qu'on appelle la cage de démarrage.

➤ **Soudage des barres intérieures avec les anneaux de court-circuit**

On soude directement les barres en cuivre avec les anneaux de court-circuit en utilisant des grains d'alliage sur un four à moyenne fréquence. Cette opération doit être réalisée avec beaucoup de précision pour bien souder les anneaux avec les barres pour former une cage très solide qui résiste aux forces centrifuges.

➤ **Tournage de la cage interne**

Pour éliminer toutes les bavures ainsi que pour obtenir le bon diamètre recommandé, on est obligé de tourner les anneaux intérieurs.

➤ **Réalisation de la cage externe**

Après avoir fini avec la fabrication de la cage interne, on procède à la réalisation de la cage externe. On commence par insérer les barres rondes externes qui sont généralement fabriquées en bronze à cause de sa plus grande solidité par rapport au cuivre et on soude les anneaux de court-circuitage avec ces barres. Cette cage externe sert aussi à maintenir l'ensemble du paquet.

➤ **Redressement des tôles d'extrémités**

Cette opération consiste à redresser et à éliminer les bavures des tôles d'extrémité du rotor qui peuvent être endommagées lors de l'insertion des barres et de l'arbre.

➤ **Tournage du paquet rotorique**

Après avoir obtenu un rotor complet avec son circuit magnétique et électrique on le passe par une machine de tournage qui élimine toute les bavures de circuit magnétique pour obtenir un entrefer bien uniforme.

➤ **Equilibrage et peinture**

Cette opération d'équilibrage a pour but d'assurer une rotation uniforme et de compenser le déséquilibre pouvant provenir des cas suivants :

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

Ce déséquilibre provoque une rapide usure des roulements à billes. Le rétablissement de l'équilibrage s'effectue par arrachement de la matière pour les cages en cuivre. Cette opération se termine par une couche de peinture (antirouille) sur la longueur de rotor puis le rotor est envoyé au magasin.

### **b-Fabrication des rotors à cage en aluminium :**

#### ➤ **Empilage et pose des tôles**

Comme les rotors à cage en cuivre, les tôles rotoriques sont récupérées au magasin puis on les repositionne et on les empile manuellement pour former des paquets de tôles d'une longueur bien précise suivant le type de moteur à fabriquer.

#### ➤ **Pressage des tôles, contrôle de la hauteur et emmanchement du mandrin**

On presse bien le paquet rotorique et on contrôle sa hauteur puis on emmanche un mandrin qui sert comme un arbre temporairement pour bien manipuler le paquet rotorique.

#### ➤ **Moulage sous pression**

Une fois le paquet rotorique préparé, il sera acheminé vers une machine qui fait le moulage sous pression par injection d'aluminium dans les encoches qui forment les barres du circuit électrique. A l'aide d'un moule spéciale, pour chaque moteur, on fabrique au même temps les anneaux de court-circuitage et les plots d'équilibrage et souvent les ailettes de refroidissement sont formées au même temps. L'ensemble forme la cage en aluminium.

#### ➤ **Coupe des carotte de coulée et extraction de la mandrine**

Une fois le coulage sous pression est fini, le rotor est dirigé vers l'extérieur de la machine automatiquement puis on le positionne sur une presse équipée d'un outil pour couper la carotte (attaches de la coulée) et équipée aussi d'une barre pour extraire le mandrin.

#### ➤ **brochage de la rainure de clavette**

Après l'extraction du mandrin, le paquet est emmené vers une autre machine qui fait la rainure de clavette tout comme le rotor en cuivre. On place le paquet sur une machine linéaire équipée d'une scie à dents et on réalise cette rainure pour placer une clavette qui fixe bien le paquet à l'arbre et empêche le glissement du paquet par rapport à l'arbre lorsque l'ensemble tourne à grande vitesse.

➤ **Emmanchement de l'arbre**

Après avoir placé la clavette dans son logement dans l'arbre on place l'arbre dans le paquet à l'aide d'une presse.

➤ **Redressement et tournage du diamètre extérieur**

Pour éliminer toute les bavures du circuit magnétique et les restes de coulage et ceci dans le but d'obtenir un entrefer bien uniforme, on fait redresser et tourner le diamètre extérieur du rotor.

➤ **Equilibrage et peinture**

Il a pour but d'assurer une rotation uniforme en compensant les balourds pouvant provenir des cas suivants :

- Manque d'homogénéité de la matière
- Défaut d'usinage
- Malformation des barres d'aluminium.

Ces balourds provoquent une rapide usure des roulements à billes, ce qui réduit la durée de vie du moteur.

Le rétablissement de l'équilibrage s'effectue par ajout de rondelles plates sur les plots des anneaux de court-circuitage ; au point opposé au balourd.

Cette opération se termine par une couche de peinture (antirouille) sur la longueur du paquet, puis le rotor est envoyé au magasin

## **II-2-Bâtiment 2 :**

Dans ce bâtiment s'effectue la fabrication des arbres rotoriques et tous les travaux de tournage et de fraisage des différentes pièces. On y trouve aussi le secteur de bobinage et celui de montage et la plateforme d'essais.

### **1-Usinage des différentes pièces :**

#### **a-Fabrication des arbres rotoriques :**

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

**a-1-Centrage et dressage de l'arbre :**

Il se fait sur une machine à tourner qui fait la mise en longueur puis le perçage des trous de centrage.

**a-2-Tournage de l'arbre :**

Cette opération consiste à réaliser les cotes fonctionnelles d'une façon à faciliter l'emmanchement de l'arbre dans le paquet rotorique. Une fois que les arbres sont finis, ils sont acheminés vers de montage des rotors.

**a-3-Fraisage de l'arbre :**

Sur une machine mécanique qu'appelle fraiseuse s'effectue le fraisage des rainures de clavettes, une pour bien fixer le paquet rotorique avec l'arbre et éviter le glissement de l'un par rapport à l'autre. L'autre rainure est réalisée aux deux côtés entraînement et ventilation.

**b-Usinage de la boîte à bornes :**

Pour les boîtes à bornes on fait le perçage et le taraudage des trous de fixation recevant le couvercle à l'aide de perceuses.

**c-Usinage des flasques :**

Il existe deux sortes de flasques (AS côté entraînement et BS côté ventilation) dont on tourne le diamètre intérieur pour le logement des roulements et aussi on fait le tournage de la concentration des flasques. On fait aussi le tournage du diamètre de centrage de la carcasse pour faciliter la pénétration du paquet statorique à l'intérieur de cette carcasse.

**d-Usinage des carcasses :**

On fait l'alésage de la carcasse en fente à l'aide des tours verticaux pour recevoir le paquet statorique. On fait aussi le perçage et le tournage des trous de fixation des flasques AS et BS et la boîte à bornes, à l'aide des perceuses.

**2-Atelier de bobinage :**

Cet atelier est divisé en trois secteurs :

- Secteur de préparation des bobines.
- Secteur de préparation de l'isolant.
- Secteur de bobinage des paquets statoriques.

**2-1-Secteur de préparation des bobines :****a-Les différents essais de contrôle du fil en cuivre :**

- Essais électriques : ces essais s'effectuent au laboratoire dans le but de contrôler :
    - La résistance électrique
    - La bonne résistivité  $\rho = \frac{RS}{L}$
- R : résistance [ $\Omega$ ]  
S : section [ $mm^2$ ]  
L: longueur [mm]
- Essais mécaniques : le cuivre doit présenter de bonnes caractéristiques mécaniques tout en contrôlant :
    - La flexion.
    - L'effet ressort.
    - L'essai de traction.

**b-Préparation des bobines :**

Après le contrôle du cuivre, la fabrication des bobines se fait à l'aide des gabarits qu'on monte sur des machines tournantes (bobineuses) qui sont réglables selon le nombre de spires par faisceaux. Une fois ces bobines sont réalisées, elles sont retirées de ces machines et on les attache puis on les envoie dans un autre secteur pour être insérées dans les paquets statoriques.

**2-2-Secteur de préparation d'isolants :**

Dans la construction des moteurs les conducteurs doivent être isolés pour des mesures de sécurité afin d'éviter les courts-circuits et pour apporter le maximum de sécurité pour les personnes. Pour cela on a besoin des matériaux isolants de très bonne qualité d'isolation et supportant très bien les effets thermiques engendrés par les échauffements de la machine. Donc en prévoie les différents isolants pour la machine comme :

- Caniveaux d'encoches.
- Gaine isolante.
- Séparateur de phases.
- Câbles de raccordement.

**2-3-Secteur préparation du stator bobiné (bobinage des paquets statoriques) :**

C'est dans ce secteur où se déroule le processus de fabrication du stator bobiné allant de l'insertion des caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

**a-Insertion des caniveaux d'encoches:**

Cette opération se fait manuellement, il s'agit de découper le papier isolant et le faire pénétrer dans les encoches du stator.

**b-Insertion des bobines dans le stator:**

L'insertion se fait soit :

- Automatiquement : pour les moteurs de hauteur d'axe allant jusqu'à 113mm.
- Manuellement : pour les autres types de moteurs (HA>113mm).

Une fois les bobines réalisées, on place les séparateurs de phases pour éviter les court-circuits entre phases, puis on procède à la fabrication de la tête des bobines manuellement avec un mandrin et un marteau en bois (maillet). La forme est maintenue avec un fil de freinage pour l'homogénéité et le dimensionnement des têtes de bobines.

**c-Connexion :****➤ Connexion entre les bobines :**

Les bobines de chaque phase sont liées entre elle de façon précise en conformité avec le schéma de bobinage afin d'obtenir trois grandes bobines, chacune d'elle a une entrée et une sortie.

Les points de connexion sont brasés et isolés avec des gaines isolantes déjà placées.

**➤ Connexion des bobines et câble de raccordement :**

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

L'entrée et la sortie de chaque phase, sont distinguées des autres avec des poinçons sur lesquels on marque le signe de la phase

*Exemple*            Entrée 1 ----- (U1),    Sortie 1 -----(U2).

Les entrées des phases sont situées à droite d'un observateur situé en face des connexions, les sortie de l'autre côté.

**d-Frettage et pressage des têtes de bobines :**

Après le raccordement des câbles, le stator subit un frettage à la main à l'aide d'un fil isolant.

**➤ Contrôle**

Le contrôle visuel concerne les séparateurs de phases et les têtes de bobines par rapport au diamètre extérieur et intérieur du paquet statorique.

Le contrôle électrique consiste en la mesure de la résistance ohmique de l'isolement, entre les phases et entre la phase et la masse haute tension (2000V).

**➤ Imprégnation**

Cette opération consiste à mettre de la résine au bobinage du stator pour le rendre plus compact et solidaire, la méthode utilisée est :

-Imprégnation dans un bain de résine par immersion.

**3-Atelier de montage :****3-1-Secteur pré-montage :**

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

- Huilage de l'intérieur de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique.
- Emmanchement du paquet avec une presse.
- Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse.
- Fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe exacte.
- Peinture du diamètre extérieur du stator avec une peinture antirouille.

**3-2-Secteur du montage :** Dans ce secteur on effectue les opérations suivantes :

- Emmanchement des roulements graissés dans les flasque AS et BS avec une presse verticale puis placement de la clavette du côté AS.
- vissage des couvercles sur les flasques.
- Intégration du rotor complet dans le stator et fixation du flasque du côté BS avec des vis.
- Emplacement de clavette du côté BS et emmanchement du ventilateur.
- Insertion de la bague d'arrêt (serre clips) pour le ventilateur.
- Préparation de la boîte à bornes et fixation des câbles de raccordement sur la plaque à bornes
- Rivetage de la plaque signalétique sur la carcasse.

Une fois le montage terminé, le moteur est envoyé à la plate-forme d'essais.

**Conclusion :**

Pendant trois mois de stage pratique à L'électro-Industrie d'Azazga, on a suivi les étapes de fabrication des moteurs asynchrones triphasés et surtout bien suivi la fabrication des rotors puisque on trouve plusieurs types de rotors. Ces rotors sont soit en cuivre soit en aluminium ; ils sont soit à simple cage ou à double cage. En ce qui concerne les stators, le principe de tous les stators est le même.

# *Chapitre III*

*Dimensionnement de la machine  
asynchrone.*

**Introduction :**

Dans ce chapitre, nous donnons les formules de calcul des dimensions géométriques, magnétiques et électriques du moteur à cage ainsi que l'épaisseur de l'entrefer d'une machine asynchrone triphasée E I.

Lorsqu'on veut construire des moteurs on ne doit pas seulement tenir compte de leurs propriétés électromagnétiques mais faire en sorte que leur construction et leur exploitation soient rentables et économiques c'est pour ça qu'un dimensionnement est nécessaire.

**I Dimensionnement du moteur : [1]**

Avoir un moteur avec un minimum d'ondulations de couple, économique et le moins encombrant possible, tels sont les objectifs qu'un constructeur se fixe. Mais le plus souvent, le constructeur est contraint d'effectuer un choix qui dépend du cahier des charges qui lui est imposé. En effet, la construction d'un moteur est en fonction de l'application envisagée.

Il en ressort que pour la construction des moteurs un dimensionnement est obligatoire parce que le cahier des charges à lui seul ne peut suffire au constructeur pour fabriquer des moteurs qui répondent aux besoins demandés.

En général, le dimensionnement des moteurs à cage dépend tant du point de vue magnétique que du point de vue électrique, le dimensionnement dépend aussi d'une série de facteurs liés d'une part, aux propriétés thermiques des matériaux et d'autre part aux exigences de l'exploitation qui concerne notamment la capacité de surcharge, le rendement et les conditions de démarrage.

**I-1 Dimensionnement du stator :[1]****a) Puissance électromagnétique:**

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer, elle est donnée par la formule suivante :

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\eta_n \cdot \cos(\varphi_n)} \quad [\text{kVA}] \quad (\text{III .1})$$

Avec

$P_n$  - la puissance nominale de la machine [kW].

$\cos(\varphi_n)$ - Facteur de puissance nominal de la machine.

$\eta_n$  - Le rendement nominal de la machine.

$K_e$ -Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans les phases statoriques. Il est donné en fonction du nombre de paires de pôles par l'expression suivante :

$$K_e = \frac{E_1}{U_{n1}} \quad (\text{III .2})$$

$$\text{Avec } E_1 = 4 \cdot K_f \cdot K_{en1} \cdot N \cdot \Phi \quad (\text{III .3})$$

#### b) Longueur virtuelle de l'induit :

Elle est donnée par l'expression suivante

$$L_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot p_e}{\alpha_i \cdot K_f \cdot A_1 \cdot K_{en1} \cdot B_\delta \cdot N \cdot D_1^2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .4})$$

Où  $\alpha_i$ - coefficient de recouvrement polaire.

$D_1$  – Diamètre intérieur du stator, [mm].

$K_f$ - Facteur de la courbe d'induction.

$B_\delta$ - Induction dans l'entrefer, [Tesla].

$N$  – Vitesse synchronisme en [tr/mn].

$A_1$ - Charge linéaire.

$K_{en1}$ - Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donné par la formule suivante :

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (\text{III .5})$$

$K_{d1}$  : Coefficient de distribution donné par :

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (\text{III .6})$$

$m_1$ - nombre de phases statoriques.

$K_{r1}$  : Coefficient de raccourcissement polaire donné par :

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \quad (\text{III .7})$$

Avec  $\beta$  : rapport de raccourcissement.

- **Coefficient de longueur:**

C'est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle statorique

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \quad (\text{III .8})$$

- **Pas polaire :**

Le pas dentaire est défini comme étant la distance séparant deux axes d'encoches voisines, il est donné par la relation suivante :

$$\tau_{P1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot P} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .9})$$

Avec  $D_1$ - Diamètre intérieur du stator en [mm]

$P$  - Nombre de paires de pôles.

- **pas polaire en nombre d'encoches :**

$$\tau_P = \frac{Z_1}{2 \cdot P} \quad (\text{III .10})$$

Avec  $Z_1$  : Nombre d'encoches statoriques :

- **Pas dentaire :**

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad (\text{III .11})$$

**c) Courant nominal dans une phase statorique :**

Le courant nominal dans une phase statorique est donné par l'expression suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \eta_n \cdot \cos(\varphi_n)} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .12})$$

Avec  $P_n$ - Puissance nominale [W]

$U_{n1}$ - Tension nominale [V]

$m_1$ - Nombre de phases statoriques.

$\eta_n$ - Rendement nominal.

$\cos(\varphi_n)$ - Facteur de puissance nominale.

#### d) Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche :

Le nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche est donné par la formule suivante :

$$U_{enc1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{1n}} \quad (\text{III .13})$$

Avec  $a_1$  : Nombre de voies parallèles

#### e) Nombres de spires d'une voie parallèle:

$$W_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{a_1} \quad (\text{III .14})$$

Avec  $q_1$  : Nombre d'encoches par pôle et par phase

- **Angle électrique :**

C'est l'angle entre deux encoches adjacentes.

$$\gamma = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z_1} \quad (\text{III .15})$$

- **Nombre d'encoches par pôle et par phase :**

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (\text{III .16})$$

- **Le pas de la section d'enroulement :**

C'est la distance entre deux faisceaux de la même section qui se suivent

$$y = \frac{Z_1}{2P} - \varepsilon \quad (\text{III .17})$$

Avec  $\varepsilon$ : Raccourcissement du pas diamétral  $\varepsilon=2$

**f) Section effective d'un conducteur :**

La section effective du conducteur de la phase statorique est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [mm^2] \quad (\text{III .18})$$

Avec  $J_1$  - Densité du courant dans l'enroulement statorique. Elle est donnée en fonction du diamètre extérieur,  $[A/mm^2]$

**I-1-1 Dimensionnement de la feuille statorique : [1]**

Elle est dimensionnée de la façon suivante.

**a) Largeur de la dent :**

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_s}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \quad [mm] \quad (\text{III .19})$$

Avec  $t_1$  - Pas dentaire statorique [mm]

$K_{fer}$  - Coefficient de remplissage du paquet de tôles statoriques et rotoriques.

$K_{fer} = 0.95$  pour l'isolation avec oxydation.

$K_{fer} = 0.97$  pour l'isolation en vernis.

$B_{z1max}$  - Induction maximale dans la dent statorique en[T].

**b) Hauteur de dos du stator :**

La hauteur de dos du stator est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_1 \cdot \tau_{p1} \cdot B_s}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .20})$$

Avec  $\alpha_1$  - Coefficient de recouvrement polaire.

$B_s$  - Induction magnétique dans l'entrefer.

$B_{c1}$  - Induction magnétique dans le dos du stator.

**c) Hauteur de la dent :**

La hauteur de la dent est donnée par la formule suivante :

$$h_{z1} = 0.5 \cdot (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .21})$$

Où  $D_{ext}$  : Diamètre extérieur de stator.

**d) Largeur minimale de l'encoche :**

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 0,2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .22})$$

**e) Largeur maximale de l'encoche :**

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .23})$$

**f) Hauteur de l'encoche :**

$$h_{enc12} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} \quad (\text{III .24})$$

$h_{f1}$  : Hauteur de la fente d'encoche statorique elle varie entre 1,2 et 1,8 [mm]

$h_{k1}$  : Hauteur de la clavette.

**g) Section occupée par les conducteurs :**

La section occupée par les conducteurs est donnée par la relation suivante :

$$S_{enc1} = 0.5 \cdot (d_{enc11} + d_{enc12}) \cdot h_{enc1} - S_{iso} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .25})$$

Avec  $S_{iso}$  - la section occupée par l'isolation de l'encoche

$$S_{iso} = 0,5 \left( \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} + 2 \cdot h_1 + b_{enc11} \right) \cdot e_1 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .26})$$

$e_1$  : Épaisseur de l'isolant

**h) Coefficient de remplissage :**

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupant l'encoche à la section utile de l'encoche, il est donné par la formule suivante :

$$K_{rem} = \frac{U_{en1} \cdot N_{el} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (\text{III .27})$$

Avec  $U_{en1}$  - Nombre de conducteurs dans l'encoche.

$d_{iso}$  - Diamètre du conducteur avec isolation en [mm]

$S_{enc1}$  - Section de l'encoche en [ $\text{mm}^2$ ]

$N_{el}$  - Nombre de conducteurs élémentaires.

**i) Vérification des charges électromagnétiques :**

Après avoir définitivement choisi les valeurs du nombre de conducteurs effectif dans une encoche  $U_{en1}$  et de la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire  $A_1$ , de l'induction  $B_s$  et de la densité de courant  $J_1$ .

Les différences relatives entre les valeurs vérifiées et les valeurs préliminaires ne doivent pas dépasser les 10%.

- **Charge linéaire :**

La charge linéaire est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie d'induit.

$$A_1 = \frac{U_{en1} \cdot I_{n1} \cdot Z_1}{\pi \cdot a_1 \cdot D_1 \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (\text{III .28})$$

- **Induction magnétique dans l'entrefer :**

Induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation électrique, elle est donnée par l'expression suivante :

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad (\text{III .29})$$

- **Flux sous un pôle :**

$$\Phi = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{f_1 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot K_{enr1}} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{III .30})$$

### I-2 Choix de l'entrefer :

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible. En effet, un entrefer assez grand est également avantageux pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. Comme il doit aussi être petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et un courant magnétisant minimal L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Elle est donnée en fonction de la hauteur d'axe et du nombre de paires de pôles.

### I-3 Dimensionnement de rotor :

#### a) Choix du nombre d'encoches rotoriques :

Le choix du nombre d'encoches du rotor est dans l'ensemble un problème relativement complexe qui n'est donc résolu que par l'expérimentation. Le nombre le plus adéquat des encoches du stator et du rotor est donné au tableau III.1 dont en remarque que le nombre d'encoches du rotor est toujours différent du nombre d'encoche du stator.

Tableau (III.1) Nombre d'encoches statoriques et rotoriques

P	$Z_1$	$Z_2$
2	24	18,20,22,28,30,33,34
	36	25,27,28,29,30,43
	48	30,37,39,40,41
4	24	16,18,20,30,33,34,35,36
	36	28,30,32,34,45,48
	48	36,40,44,57,59
	72	42,48,54,56,60,61,62,68,76
6	36	20,22,28,44,47,49
	54	34,36,38,40,44,46
	72	44,46,50,60,61,62,82,83
8	48	26,30,34,35,36,38,58
	72	42,46,48,50,52,56,60
12	72	69,75,80
	90	86,87,93,94

**b) Diamètre extérieur du rotor :**

Le diamètre extérieur du rotor est donné par l'expression suivante :

$$D_2 = D_1 - 2Y \quad [\text{mm}] \quad (\text{III} .31)$$

Ou :  $\delta$  L'épaisseur de l'entrefer

**c) Pas dentaire rotorique**

Le pas dentaire rotorique est défini comme étant la distance séparant les axes de deux encoches rotoriques voisines. Il est donné par la formule suivante :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III} .32)$$

Avec  $Z_2$  : Nombre d'encoche rotoriques

$D_2$  : Diamètre extérieur du rotor en [mm]

**d) Le courant dans la barre :**

En général, le courant dans la barre de l'enroulement du rotor est donné par

$$I_2 = \frac{1.11 \cdot I_{n1} \cdot 6 \cdot W_1 \cdot \cos(\theta_n) \cdot k_{en1}}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .33})$$

Où  $I_{n1}$  : Courant nominal statorique.

$W_1$  : Nombre de spires statoriques.

$\cos(\theta_n)$  : Facteur de puissance nominal.

$k_{en1}$  : Facteur de bobinage d'enroulement statorique.

**I-3-1 Dimensionnement de la feuille rotorique : [1]**

La feuille rotorique est dimensionnée comme suit

**a) La hauteur de la culasse rotorique**

La hauteur de la culasse rotorique est donnée par la formule suivante

$$h_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p2} B \gamma}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .34})$$

Où  $B_{c2}$  : Induction dans la culasse rotorique.

**• Pas polaire rotorique**

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}]$$

**b) Hauteur de dent rotorique :**

La hauteur de la dent est donnée par la formule suivante :

$$h_{z2} = 0.5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .35})$$

Avec  $h_{c2}$  : Hauteur de la coulasse rotorique en [mm]

$D_{int2}$  : Diamètre intérieur du rotor en [mm].

**c) diamètre supérieur de l'encoche :**

Il est donné par l'expression suivante :

$$d_{21} = \frac{\pi.(D_2 - 2.h_{f2}) - Z_2.b_{z2}}{(Z_2 - \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .36})$$

Avec :  $h_{f2}$  hauteur de la fente de l'encoche rotorique.

$b_{z2}$ : Largeur de la dent.

**d) diamètre inférieur de l'encoche:**

Il est donné par l'expression suivante :

$$d_{22} = \frac{\pi.(D_2 - 2.h_{f2}) - Z_2.b_{z2}}{(Z_2 + \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .37})$$

**e) Hauteur de l'encoche:**

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5.(d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .38})$$

D'où :

$h_2$  : La hauteur entre les axes de l'encoche.

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0,5.(d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .39})$$

**f) Section des barres rotoriques**

Elle est donnée en fonction des dimensions de l'encoche :

$$S_b = 0,125.(d_{21}^2 + d_{22}^2).\pi + 0,5.(d_{21} + d_{22}).h_2 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III .40})$$

**g) Densité de courant :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (\text{III .41})$$

**I-3-2 dimensionnement de l'anneau : [1]**

- **Section de l'anneau :**

La section de l'anneau est donnée par la formule suivante :

$$S_{an} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III .42})$$

- **Hauteur de l'anneau :**

La hauteur de l'anneau s'exprime comme suit :

$$h_{an} = (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .43})$$

- **Largeur de l'anneau:**

La largeur de l'anneau s'exprime comme suit:

$$b_{an} = S_{an} / h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .44})$$

- **Diamètre moyen de l'anneau :**

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .45})$$

**II-Calcul du circuit magnétique : [1]**

L'objet d'étude du circuit magnétique de la machine asynchrone à cage est de canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant. Ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (f.m.m) qui nous permettront de calculer le courant magnétisant et de déduire par la suite la réactance magnétique. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique.

$$F = \oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \sum_i^n H_i \cdot L_i \quad (\text{III .46})$$

Avec  $H_i$ - Intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon choisi.

$L_i$ - Ligne moyenne du tronçon choisi.

Le circuit magnétique de la machine est constitué de cinq tronçons :

- ❖ L'entrefer.
- ❖ La culasse statorique.
- ❖ La culasse rotorique.
- ❖ Les dents statoriques.
- ❖ Les dents rotorique.

### II-1 Circuit magnétique statorique :

#### a) Longueur moyenne des lignes de champ dans la culasse statorique :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2.p} (D_{ext} - h_{c1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .47})$$

#### b) Force magnétomotrice de la culasse statorique:

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III .48})$$

Avec  $H_{c1}$  : Intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction  $B_{c1}$ .

#### c) Force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .49})$$

Où :  $h_{z1}$  Hauteur de la dent statorique en [mm].

$H_{z1}$  : Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction  $B_{z1}$ .

### II-2 circuit magnétique rotorique :

#### a) Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot P} + h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .50})$$

Avec :  $h_{z2}$  Hauteur de la dent rotorique en [mm].

$h_{c2}$  Hauteur de la culasse rotorique en [mm].

**b) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor :**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .51})$$

Où :  $H_{c2}$  Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction  $B_{c2}$

**c) Force magnétique dans les dents du rotor :**

Elle est donnée par la relation suivante

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0.4 \cdot d_{21}) \quad (\text{III .52})$$

Où :  $H_{z2}$  Intensité de champ magnétique dans la dent rotorique qui correspond à l'induction  $B_{z2}$ .

### II-3 Force magnétomotrice dans l'entrefer

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci.

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .53})$$

Où :  $K_{\delta}$  Coefficient de CARTER qui tient compte de la non-uniformité de l'entrefer, due aux ouvertures des encoches statorique (indice 1) et rotorique (indice 2). Il est donné par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (\text{III .54})$$

$$\text{Avec: } K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot t_2 / b_{f2})} \quad (\text{III .55})$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot t_2 / b_{f2})} \quad (\text{III .56})$$

$b_{f1}, b_{f2}$  : Sont respectivement les largeurs des fentes des dents statoriques et rotoriques en [mm].

#### II-4 Force magnétomotrice totale par paire de pole:

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .57})$$

Le facteur 2 provient du fait que l'entrefer, les dents statoriques et rotoriques sont parcourus deux fois par les lignes de champ magnétique.

#### II-5 Coefficient de saturation:

##### a) Coefficient de saturation des dents :

Il est donné par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} \cdot F_{z1} \cdot F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (\text{III .58})$$

##### b) Coefficient de saturation de la machines :

Il est donné par :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_{\delta}} \quad (\text{III .59})$$

#### II-6 Courant magnétisant :

Il représente la composante réactive du courant à vide, il est donné par la formule suivante :

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .60})$$

#### II-7 Réactance de magnétisation:

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega] \quad (\text{III .61})$$

$K_e$ : Facteur de majoration, il varie entre 0.9 et 0.98.

**II-8 Coefficient de dispersion magnétique du stator:**

Il est donnée par :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{III .62})$$

$X_1$  : Réactance inductive de dispersion de l'enroulement statorique.

**II-9 Force électromotrice à vide  $E_0$  :**

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{(1+\sigma_{\mu})} \quad (\text{III .63})$$

**III Calcul des paramètres électrique des enroulements :[1]**

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine, on procédera au calcul de tous les paramètres suivants :

**III-1 Paramètres statorique :**

Le calcul des paramètres statoriques s'effectue comme suit :

**a) Résistance active d'une phase du stator :**

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot q_{eff}} \quad (\text{III .64})$$

Où :

$q_{eff}$  : Section standard d'un conducteur.

$\rho_{cu}(T)$  : Résistivité du cuivre à la température (t).

Elle est donnée pour :

$$T=20 \text{ C} : \quad \rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad [N.m]$$

$$T=115 \text{ C} : \quad \rho_{cu} = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [N.m]$$

$L_{w1}$  : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculée comme suit :

$$L_{w1} = 2 \cdot (L_i \cdot L_{f1}) \quad (\text{III .65})$$

Avec :  $L_i$  Longueur virtuelle de l'induit.

$L_{f1}$  : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire telle que :

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .66})$$

$b_{1moy}$  : Largeur moyenne d'une section.

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}}{z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .67})$$

$Y_{1moy}$  : Pas moyen d'un groupe de sections.

### b) Réactances de fuites et perméances de fuite du stator

La réactance de fuite globale du stator comprend :

- **Réactance de fuite d'encoche**

Elle est due aux flux de fuite qui se referme autour des conducteurs :

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad (\text{III .68})$$

- **Réactance de fuite différentielle**

C'est le résultat des flux suivants :

- Flux de fuite de dent à dent à travers l'entrefer.
- Flux différentiel de phase.
- Flux différentiel de l'encoche.

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (\text{III .69})$$

- **Réactance de fuite frontale**

C'est la réactance présentée par les parties frontales des enroulements situés dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles.

Elle est donnée par :

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (\text{III .70})$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{q_1 \cdot P \cdot 10^3} \quad [\Omega] \quad (\text{III .71})$$

Où :

$\lambda_1$  : Perméance de dispersion de l'enroulement statorique, elle est calculée comme

Suit :

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (\text{III .72})$$

$\lambda_{enc1}$  : Perméance d'encoche elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1 \cdot k_{B1}}{3 \cdot d_{enc12}} + \left( \frac{h_{11}}{d_{enc12}} + 3 \cdot \frac{h_{k1}}{d_{enc12} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot k_{B2} \quad (\text{III .73})$$

$k_{B1} = k_{B2} = 1$  pour enroulement concentrique.

$\lambda_{1d}$  : Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot q_1^2 \cdot k_{en1}^2}{k_\delta \cdot \delta} \cdot k_{rr1} \cdot k_{dd1} \cdot k_{r1} \quad (\text{III .74})$$

$$k_{r1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (\text{III .75})$$

Avec:  $k_{rr1}$  coefficient qui dépend de  $q_1$ .

$k_{dd1}$ : Coefficient de fuite différentiel donné en fonction de  $\frac{z_2}{p}$  et  $q_1$ ,

$\lambda_{1f}$  : Perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1f} = 0,34 \frac{q_1 \cdot (l_{f1} - 0,64\beta \cdot \tau_{p1})}{l_i} \quad [\Omega] \quad (\text{III .76})$$

## III-2 Paramètres rotoriques :

### III-2-1 Résistance rotorique :

#### a) Résistance active de la barre :

$$R_b = \rho_{al}(T) \cdot \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad (\text{III .77})$$

Pour :

$$T=20 \text{ C} : \quad \rho_{al}= 28. 10^{-9} \quad [\Omega.m]$$

$$T=115 \text{ °C} : \quad \rho_{al}= 48,8. 10^{-9} \quad [\Omega.m]$$

Dans ce calcul, on assimile la longueur de la barre à celle de l'induit  $L_b = L_i$

**b) résistance de l'anneau:**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T).2\pi.D_{an}.10^{+3}}{Z_2.S_{an}} \quad (\text{III .78})$$

Avec  $S_{an}$  : Section de l'anneau en [mm<sup>2</sup>].

$D_{an}$  : Diamètre moyen de l'anneau en [mm].

**c) Résistance de l'anneau ramenée à la barre:**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-b} = \frac{R_{an}}{(K_{red})^2} \quad [\Omega] \quad (\text{III .79})$$

**d) Résistance de l'anneau ramenée au stator :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-s} = M. R_{anram-b} \quad [\Omega] \quad (\text{III .80})$$

$$M = \frac{4.m_1}{Z_2} \cdot \left( \frac{W_1 K_{en1}}{K_{ob}} \right) \quad (\text{III .81})$$

Où :

$K_{ob}$  : Coefficient d'obliquité des encoches rotoriques, donné comme suit:

$$K_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob}/2)}{\alpha_{ob}/2} \quad (\text{III .82})$$

$\alpha_{ob}$  : Angle d'inclinaison des encoches.

$$\alpha_{ob} = \frac{2.\pi.P.\beta_{ob}}{Z_2} \quad [\text{rad}] \quad (\text{III .83})$$

$M$ : Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (\text{III .84})$$

$\beta_{ob}$  : Rapport des pas dentaires statorique et rotorique.

**e) Résistance active d'une phase rotorique :**

Elle représente la somme des résistances de la barre et celle de l'anneau ramenée à la barre.

Pour notre type d'encoches, elle est donnée comme suit:

$$R_2 = R_b + R_{anram-b} \quad [\Omega] \quad (\text{III .85})$$

**f) Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator :**

Pour notre type d'encoche elle donnée comme suit:

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega] \quad (\text{III .86})$$

**III-2-2 Réactance de dispersion et perméance du rotor :**

Dans cette partie, on calcule :

- La réactance de fuite d'encoche, due au flux qui se renferme autour des conducteurs.
- La réactance frontale due à la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles.
- La réactance due au flux différentiel dont la valeur est très élevée dans un entrefer faible.
- La réactance de fuite due à l'induction dans les encoches.
- La réactance de dispersion globale est donnée par la formule suivante :

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (\text{III .87})$$

$\lambda_2$ : Perméance de dispersion du rotor, elle est donnée par:

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (\text{III .88})$$

$\lambda_{2enc}, \lambda_{2d}, \lambda_{2f}, \lambda_{ob}$ : Sont respectivement les pémeances : d'encoches différentielle, frontale et oblique.

On procède au calcul des différentes perméances.

• **Perméance d'encoche :**

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (\text{III .89})$$

Avec :

$$C_\lambda = \psi \left[ \left( \frac{h_2 + 0,4 \cdot d_{22}}{3 \cdot d_{21}} \right) \cdot \left( \frac{1 - \pi \cdot d_{21}}{8 \cdot S_b} \right)^2 + 0,66 - \left( \frac{b f^2}{2 \cdot d_{21}} \right) \right] \quad (\text{III .90})$$

$\psi = 1$ : Pour le régime nominal.

- **Perméance différentielle :**

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot (Z_2/6 \cdot P)^2}{\delta \cdot K_\delta} \cdot K_{dd2} \quad (\text{III .91})$$

$K_{dd2}$ : Coefficient de fuite différentielle donnée en fonction de  $q_2$

Avec

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \cdot (Z_2/6 \cdot P)^2} \quad (\text{III .92})$$

- **Perméance frontale:**

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3 D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot (K_{dd2})^2} \text{Log} \left( \frac{4,7 \cdot D_{anmoy}}{2 \cdot (h_{an} + L_{an})} \right) \quad (\text{III .93})$$

- **Perméance d'inclinaison d'encoches rotoriques**

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2 \beta_{ob}}{0,9 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \quad (\text{III .94})$$

Où :  $K_\mu$  Coefficient de saturation de la machine.

### III-2-2 Réactance du rotor ramenée au stator:

Pour notre type d'encoches :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (\text{III .95})$$

### III-3 Paramètres au démarrage :

Lors de l'alimentation du moteur, à rotor immobile les barres de la cage sont soumises à un champ tournant de fréquence d'alimentation ( $f=50$  Hz); la profondeur de pénétration du courant est alors faible (effet refoulement des courants) ; seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits d'où une forte résistance de la cage au démarrage.

Avec l'augmentation de la vitesse, le glissement diminue et par conséquent, la fréquence du champ ( $f_2 = g \cdot f_1$ ), donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

**a) Profondeur de pénétration**

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .96})$$

Où :

$h_b$  : Hauteur de la barre.

$\varphi_1$  : Coefficient qui dépend de la valeur de  $\xi$

$$\xi_1 = 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g} \quad (\text{III .97})$$

**b) Largeur à la limite de pénétration:**

Elle est donnée par:

$$b_{pp} = d_{21} - [(d_{21} + d_{22})/h_2 \cdot ((h_{pp} - d_{12})/2)] \quad [\text{mm}] \quad (\text{III .98})$$

**c) section de la barre pénétrée par le courant de démarrage:**

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = (\pi \cdot d_{21}^2 / 8) + [0,5(d_{21} + b_{pp})(h_{pp} - 0,5 \cdot d_{21})] \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III .99})$$

**d) Résistance de la barre au démarrage :**

$$R_{bdem} = R_b + K_{dep} \quad [\Omega] \quad (\text{III .100})$$

$K_{dep}$  : Coefficient de déplacement du courant, c'est le rapport entre la section de la barre totale et la section de la barre au démarrage.

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (\text{III .101})$$

**e) Résistance de la cage au démarrage:**

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2dem} = R_{anram-b} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (\text{III .102})$$

**f) Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator :**

Elle est donnée comme suit

$$R_{2dem-ram} = M \cdot R_{anram-b} + R_{dbem} \quad [\Omega] \quad (\text{III .103})$$

**g) Réactance de fuite au démarrage:**

Elle est donnée comme suit

$$X_{2dem} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (\text{III .104})$$

$\lambda_{2dem}$ : Réactance de dispersion du rotor au démarrage

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (\text{III .105})$$

$\lambda_{2dem}$ : Réactance de dispersion du rotor au démarrage

Seule la perméance d'encoche qui est affectée par l'effet de refoulement du courant.

**h) Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator :**

La réactance de fuite au démarrage ramenée au stator est donnée par la formule suivante

Pour notre type d'encoche :

$$X_{2demram-s} = M \cdot X_{2dem} \quad [\Omega] \quad (\text{III .106})$$

### III-4 Calcul des pertes et du rendement :

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne inévitablement de pertes d'énergie dans les différentes parties du moteur telles que le circuit magnétique, les enroulements statoriques et rotoriques, ainsi que les différentes parties mécaniques.

Cette partie est consacrée à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone et cela pour permettre d'estimer le rendement en tachant de l'avoir aussi proche que possible de celui qui figure dans le cahier des charges.

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

- ❖ Pertes principales dans le fer.

- ❖ Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium.
- ❖ Pertes mécaniques.
- ❖ Pertes supplémentaires.

### III-4-1 Pertes principales dans le fer:

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétisant et le flux fondamental, et les pertes par courant de Foucault dues à la circulation des courants induits par le flux fondamental dans les tôles magnétiques. Les dents et la culasse statoriques sont les parties les plus touchées par ces pertes. Les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence du flux.

#### a) Pertes dans les dents:

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad [\text{w}] \quad (\text{III .107})$$

$$P_{1/50} = 2,5 \quad [\text{w} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad \text{Pour 1T et 50Hz (acier allié 2013)}$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad [\text{kg}] \quad (\text{III .108})$$

$G_{c1}$  : Poids de la culasse statorique

#### b) Pertes dans la culasse statorique :

Les pertes dans la culasse statorique sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse :

$$P_{c1} = 1,7 \cdot P_{1/52} \cdot B_{c1}^2 \cdot G_{c1} \quad [\text{w}] \quad (\text{III .109})$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi (D_{ext} - h_{c1}) \quad (\text{III .110})$$

$G_{c1}$  : Poids de la culasse statorique.

Les pertes dans le fer sont égales à la somme des pertes dans les dents et celles du dos du stator.

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [\text{w}] \quad (\text{III .111})$$

### III-4-2 Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium:

Ce sont les pertes par effet Joule dans les enroulements statorique et rotorique. Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements.

**a) Pertes Joule statoriques**

Les pertes Joule statoriques sont les pertes électriques dans le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [\text{w}] \quad (\text{III .112})$$

$R_1$  : Résistance d'une phase de l'enroulement statorique.

$I_{n1}$  : Courant dans une phase statorique.

**b) Pertes Joule rotoriques**

Ce sont les pertes dans le bronze et le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III .113})$$

Avec :

$m_2$  : Nombre de phases rotoriques ( $m_2 = Z_2$ ).

$I_2$  : Courant dans la barre.

$R_2$  : Résistance d'une phase de l'enroulement rotorique.

**III-4-3 Pertes mécaniques:**

Elles dépendent de la vitesse du moteur, elles se composent de pertes par frottements aux paliers et de pertes par ventilation et frottements avec l'air. Elles sont exprimées par :

$$P_{mec} = k_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [\text{w}] \quad (\text{III .114})$$

Avec :

$k_t$  : Facteur de majoration

$$k_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3}) \quad \text{Pour } 2p=2$$

$$k_t = 1 \quad \text{Pour } 2p>2$$

**III-4-4 Pertes supplémentaires:**

Ces pertes ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, on les estime à **0.5%** de la puissance absorbée par le moteur. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{sup} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot ((P_n \cdot 10^3) / (\eta_n)) \quad [\text{w}] \quad (\text{III .115})$$

**III-4-5 Pertes totales:**

Les pertes totales s'expriment comme la somme de toutes les pertes définies précédemment :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [\text{W}] \quad (\text{III .116})$$

**III-4-6 Rendement de la machine :**

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (\text{III .117})$$

**III-4-7 Calcul de la résistance de magnétisation:**

La puissance absorbée à vide correspond aux pertes fer et mécaniques, alors le courant actif à vide qui correspond à ces pertes sera exprimé comme suit :

$$I_{0a} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .118})$$

D'où :

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (\text{III .119})$$

Avec :

$I_\mu$ : Courant magnétisant.

$X_m$ : Réactance magnétisante.

**III-5 Calcul des performances du moteur:**

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur les schémas équivalents des machines asynchrones. II

existe plusieurs schémas équivalents des machines asynchrones qui sont analogues à celui d'un transformateur.

- ❖ Schéma réel de substitution du circuit primaire et du circuit secondaire.
- ❖ Schéma physique équivalent ramené au rotor immobile.
- ❖ Schéma équivalent d'une machine asynchrone considérée comme un transformateur (Schéma équivalent en T).
- ❖ Schéma équivalent d'une machine asynchrone avec circuit magnétisant rapporté aux bornes du réseau (Schéma équivalent en L).

Dans notre étude on utilise le schéma équivalent en L car il est le plus commode. Ceci pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur.

### III-5-1 Schéma équivalent en L du moteur:

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :

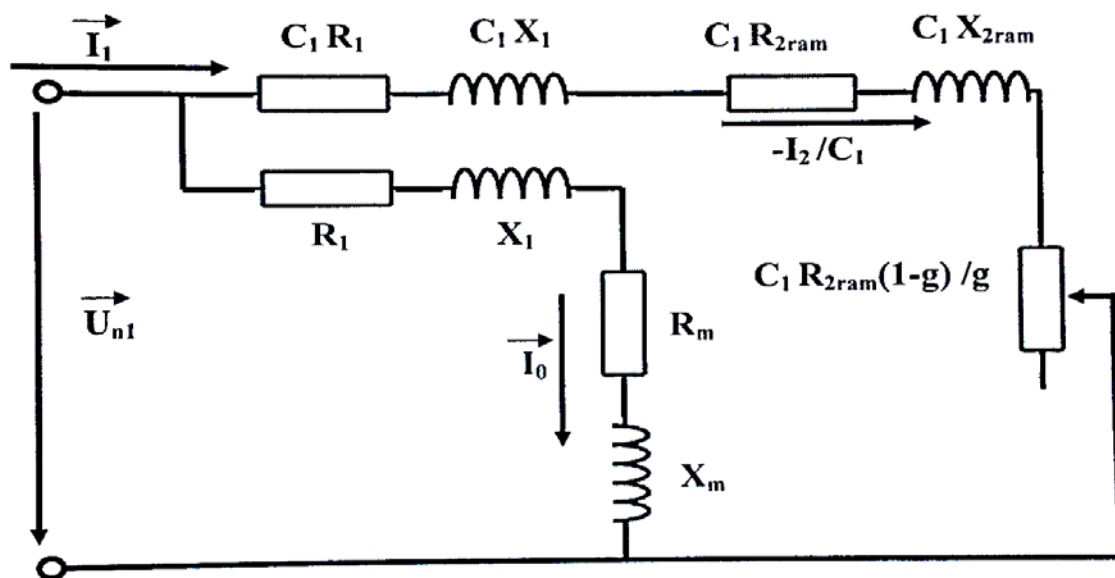


Figure (III-1) Schéma conventionnel monophasé ramené au stator [1].

Avec :

- ✓  $R_1$  : Résistance statorique en  $[\Omega]$
- ✓  $X_1$  : Réactance de fuite du stator en  $[\Omega]$
- ✓  $X_{2ram}$  : Réactance de fuite du rotor ramené au stator en  $[\Omega]$
- ✓  $R_{2ram}$  : Résistance rotorique ramené au stator en  $[\Omega]$
- ✓  $X_m$  : Réactance magnétisante en  $[\Omega]$
- ✓  $R_m$  : Résistance magnétisante en  $[\Omega]$

✓  $C_1$  : Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

Elle donnée par

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{III .120})$$

### III-5-2 Caractéristiques de fonctionnement du moteur :

#### a) Le glissement :

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad (\text{III .121})$$

Avec :

$$B = 2A + R' \quad (\text{III .122})$$

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_2'} - R_1 \quad (\text{III .123})$$

$$R' = R_{2ram} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{2ram}} \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) \right)^2 + \left( \frac{X_1}{X_{2ram}} \left( 1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) + \frac{X_{2ram}}{X_{2ram}} \right)^2 \right] [\Omega] \quad (\text{III .124})$$

#### b) Puissance rapportée du circuit primaire au circuit secondaire :

La puissance rapportée du circuit primaire au circuit secondaire est égale à :

$$P_2' = P_2 + P_{sup} + P_{mec} \quad [\text{W}] \quad (\text{III .125})$$

#### c) Inductance équivalente :

Elle est exprimée par :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2} \quad [\Omega] \quad (\text{III .126})$$

Avec :

$$R_{2eq} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2ram} / g \quad [\Omega] \quad (\text{III .127})$$

$$X_{2eq} = C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2ram} \quad [\Omega] \quad (\text{III .128})$$

#### d) Calcul du courant secondaire:

Le courant dans le circuit secondaire est donné par l'expression suivante :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .129})$$

$$I_2' = C_1 \cdot I_2'' \quad [\text{A}] \quad (\text{III .130})$$

$I_2''$  : Le courant dans le circuit secondaire transformé en L.

$I_2'$  : Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

#### e) Facteur de Puissance rotorique:

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos \phi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (\text{III .131})$$

D'où :

- Courant actif

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos \phi_2 \quad [\text{A}] \quad (\text{III .132})$$

- Courant réactif

$$I_{2r}'' = I_2'' \cdot \sin \phi_2 \quad [\text{A}] \quad (\text{III .133})$$

- Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes Joule statoriques à vide

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .134})$$

- Courant magnétisant

$$I_{0r} = \frac{P \sum F_i}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 K_{en1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .135})$$

- Courant total à vide

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .136})$$

- Courant absorbé

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .137})$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'' \quad [\text{A}] \quad (\text{III .138})$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{2r}'' \quad [\text{A}] \quad (\text{III .139})$$

Le facteur de puissance de la machine est donné par :

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (\text{III .140})$$

**f) Puissance absorbée par le moteur:**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{a1} \quad [\text{W}] \quad (\text{III .141})$$

**g) Vitesse de rotation du moteur:**

Elle est donnée par la relation

$$n = N(1 - g) \quad [\text{tr/mn}] \quad (\text{III .142})$$

Avec :

$N_s$  : Vitesse de synchronisme.

$g$  : Glissement.

$$\frac{n}{N_s} = 1 - g \quad (\text{III .143})$$

**h) Couple utile sur l'arbre du moteur:**

Il est donné par :

$$C_u = 9,55 \cdot \frac{P_2 10^3}{P_n} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{III .144})$$

**III-5-3 Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :**

Les caractéristiques d'un moteur asynchrone sont données comme suit :

**a) Résistance et réactance équivalentes au démarrage :**

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2dem-ram} \quad [\Omega] \quad (\text{III .145})$$

$R_{2dem-ram}$  : Résistance de démarrage rotorique ramenée.

**b) Résistance et réactance équivalentes au démarrage :**

Elle est donnée par la relation suivante:

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x + X_{var} \quad [\Omega] \quad (\text{III .146})$$

Avec :

$K_x$  : Coefficient qui est donné suivant la forme de l'encoche.

Pour les encoches semi ouvertes  $K_x = 0.0825$

$X_{const}$  : Réactance de dispersion du moteur qui ne dépend pas de la saturation.

$X_{var}$  : Réactance variable de dispersion du moteur qui dépend de la saturation.

Les réactances  $X_{const}$  et  $X_{var}$  sont respectivement données par les relations suivantes:

$$X_{cont} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 X_{2dem-ram} \cdot \frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2var}} \quad [\Omega] \quad (III .147)$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} \frac{C_1^2 X_{2dem-ram}}{\lambda_2} \quad (III .148)$$

Avec :

$\lambda_{2var}$  : Composante variable de perméance d'encoche rotorique. Elle est donnée par :

$$\lambda_{2var} = \lambda_{2encvar} + \lambda_{2d} \quad (III .149)$$

Où :

$\lambda_{2encvar}$  : Composante variable de perméance d'encoche rotorique.

Pour le type d'encoche ovale semi ouverte, on a:

$$\lambda_{2encvar} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (III .150)$$

Avec:

$\lambda_1$  : Perméance statorique.

$\lambda_{2dem}$  : Perméance statorique au démarrage.

$\lambda_{enc1d}$  : Perméance d'encoche statorique qui dépend de la saturation.

Elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1d} = \left( \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{\beta 2} \quad (III .151)$$

Où :

$h_{f1}$  Hauteur de la fente d'encoche statorique.

**c) Capacité de surcharge:**

La capacité de surcharge du moteur est le rapport entre le couple maximal et le couple nominal. Elle est donnée comme suit:

$$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom} + g_{cr}}{g_{cr}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad (\text{III .152})$$

Avec:

$R_{cr}$ : Résistance critique.

$g_{nom}$ : Glissement nominal.

$g_{cr}$ : Glissement critique qui est donné par

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_{2ram}}{(X_1 + C_1 \cdot X_{2ram})} \quad (\text{III .153})$$

Avec:

$R_{2ram}$ : Résistance rotorique ramenée au stator.

$X_{2ram}$ : Réactance rotorique ramenée au stator.

**d) Le courant de démarrage:**

Au démarrage le moteur asynchrone est assimilable à un transformateur dont le secondaire alimente une résistance faible. Dans ces conditions le courant de démarrage est considérable ; il peut atteindre 6 à 7 fois le courant nominal. Sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_{1dem} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III .154})$$

**e) Le couple de démarrage :**

Il est donné par l'expression suivant :

$$C_d = \frac{P \cdot U_{n1}^2 \cdot R_{2dem}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} = P \cdot I_{1dem}^2 \frac{R_{2dem}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{III .155})$$

**Remarque:**

Le rapport entre le couple de démarrage et le couple nominal Pour une hauteur d'axe  $h= 50 \div 132$  [mm], est estimé à :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 1.5 \div 2.2 \quad (\text{III .156})$$

# *Chapitre IV*

*Elaboration d'un programme  
de calcul.*

Pour mener notre application, qui rappelons le, vise à améliorer les performances d'un moteur asynchrone de 3kW, en changeant la longueur du stator et le diamètre des conducteurs statoriques. En effet, la longueur de l'induit passe de 130 mm à 183 mm et le diamètre du fil utilisé dans les bobinages du stator passe de 0.56 mm à 0.9 mm. Ainsi nous agissons sur la densité du courant de telle sorte à aboutir à celle qui correspond à une section normalisée des conducteurs de  $0.6362 \text{ mm}^2$  correspondant au diamètre de 0.9 mm.

Pour définir les coefficients nous avons utilisé les tableaux et figures qui sont donnés à la fin de ce chapitre.

### LES DONNEES

La puissance nominale	$P_n := 3$	kW
Le rendement nominal	$\eta_n := 0.79$	
Le facteur de puissance	$\cos\varphi := 0.83$	
Nombre de pair de pôle	$p := 2$	
La fréquence	$f := 50$	Hz
La hauteur d'axe	$h := 100$	mm
La vitesse de synchronisme	$N_s := 1500$	$\frac{\text{tr}}{\text{min}}$
La vitesse de rotation	$n := 1410$	$\frac{\text{tr}}{\text{min}}$
Nombre de phase statorique	$m_1 := 3$	
Diamètre extérieur du stator	$D_{\text{ext}} := 145$	mm
Diamètre intérieur du stator	$D_1 := 88.5$	mm
Tension nominale	$U_{n1} := 380$	v
Facteur de la forme d'induction	$K_f := 1.11$	(Figure A-5)
Coefficient de recouvrement polaire	$\alpha_i := 0.64$	(Figure A-5)

### La puissance électromagnétique

Facteur de majoration	$K_e := 0.98 - (5 \cdot p \cdot 10^{-3})$	$K_e = 0.97$
-----------------------	---	--------------

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n \cdot \cos\varphi}$$

$$P_e = 4.438 \times 10^3 \text{ W}$$

### Le nombre d'encoches

$$\text{Nombre d'encoches statoriques} \quad Z1 := 36$$

$$\text{Nombre d'encoches rotoriques} \quad Z2 := 28$$

Nombre d'encoches par pole et par phase

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1} \quad q1 = 3$$

### Le pas dentaire statorique

$$t1 := \frac{(\pi \cdot D1)}{Z1} \quad t1 = 7.723 \quad \text{mm}$$

### Angle électrique

$$\gamma_e := \frac{(p \cdot 360)}{Z1} \quad \gamma_e = 20$$

### Coefficient de distribution

$$Kd1 := \frac{\sin\left(\frac{3.14}{2m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{3.14}{2 \cdot m1 \cdot q1}\right)} \quad Kd1 = 0.96$$

### Le pas d'enroulement en nombre d'encoches

$$\tau_p := \frac{Z1}{2 \cdot p} \quad \tau_p = 9 \quad \text{encoches}$$

**Le pas d'enroulement en mm**

$$\tau p1 := \frac{(\pi \cdot D1)}{2 \cdot p}$$

$$\tau p1 = 69.508 \quad \text{mm}$$

**Le pas d'enroulement:**

$$\varepsilon := 0$$

$$y1 := -\varepsilon + \frac{Z1}{2p}$$

$$y1 = 9 \quad \text{encoches}$$

**Rapport de raccourcissement:**

$$\beta := \frac{y1}{\tau p}$$

$$\beta = 1$$

**Coefficient de raccourcissement:**

$$Kr1 := \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

$$Kr1 = 1$$

$$Ken1 := Kr1 \cdot Kd1$$

$$Ken1 = 0.96$$

**La charge linéaire**

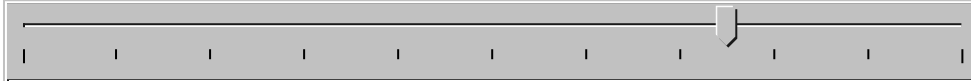
$$A1 :=$$



$$A1 = 2.45 \times 10^4 \quad \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (\text{Figure A-6})$$

**Induction dans l'entrefer**

B :=



B = 75

$$\beta_g := B \cdot 10^{-2}$$

$$\beta_g = 0.75$$

T

(Figure A-6)

**La longueur virtuelle de l'induit**

$$L_i := \frac{(6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_e \cdot 10^{-3})}{\alpha_i \cdot K_f \cdot A_l \cdot K_{en1} \cdot \beta_g \cdot N \cdot D_1^2}$$

$$L_i = 183.913 \quad \text{mm}$$

**Le coefficient de longueur**

$$\lambda := \frac{L_i}{D_1}$$

$$\lambda = 2.078$$

**Nombre de voix parallèles**

$$a_l := 1$$

**Courant nominale dans une phase**

$$I_{n1} := \frac{(P_n \cdot 10^3)}{m_l \cdot U_{n1} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_n}$$

$$I_{n1} = 4.013 \quad \text{A}$$

**Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche**

$$U_{enc1} := \frac{(a1 \cdot t1 \cdot A1 \cdot 10^{-3})}{In1} \quad U_{enc1} = 47.146$$

$$\text{round}(U_{enc1}) = 47$$

**Nombre de spires d'une voie parallèle**

$$W1 := \frac{(p \cdot q1 \cdot \text{round}(U_{enc1}))}{a1} \quad W1 = 282$$

**Enroulement statorique****Densité de courant statorique**

$$j1 := j11 \cdot 10^{-2} \quad j1 = 6.4 \quad \frac{A}{mm^2} \quad (\text{Figure A-7})$$

**La section effective**

$$Seffca := \frac{In1}{a1 \cdot j1} \quad Seffca = 0.627 \quad mm^2$$

**La section normalisée qui correspond à la section calculée**

$$Seff1 := 0.6362 \quad mm^2 \quad (\text{Tableau T-1})$$

### La section élémentaire

Nombre de conducteur élémentaires	$N_{el} := 2$		
Section normalisée	$S_{nor1} := 0.6362$	$\text{mm}^2$	(Tableau T-1)
Diamètre avec isolation	$d_{iso} := 0.973$	$\text{mm}$	(Tableau T-1)
Section élémentaire	$S_{elt1} := \frac{S_{eff1}}{N_{el}}$	$S_{elt1} = 0.318$	$\text{mm}^2$
Diamètre nu	$d_{nu} := 0.9$	$\text{mm}$	

### Feuille statorique

#### La largeur du dos statorique

Coefficient de remplissage du paquet statorique et rotorique	$K_{fer} := 0.97$	(isolation en vernie)
Induction maximale dans la dent statorique	$B_{z1max} := 1.9$	T (Tableau T-4)
	$b_{z1} := \frac{(t1 \cdot \beta_g)}{K_{fer} \cdot B_{z1max}}$	$b_{z1} = 3.143$ $\text{mm}$

#### La hauteur du dos statorique

Induction magnétique dans le dos du stator	$B_{c1} := 1.65$	(Tableau T-4)
	$h_{c1} := \frac{(0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau p1 \cdot \beta_g)}{K_{fer} \cdot B_{c1}}$	$h_{c1} = 10.423$ $\text{mm}$

#### La hauteur de la dent

	$h_{z1} := 0.5(D_{ext} - D1) - h_{c1}$	$h_{z1} = 17.827$ $\text{mm}$
--	--	-------------------------------

**La largeur minimale de l'encoche**

$$\text{benc11} := -bz1 + \frac{[\pi \cdot (D1 + 0.2 \cdot hz1)]}{Z1} \quad \text{benc11} = 4.891 \quad \text{mm}$$

**La largeur maximale de l'encoche**

$$hf1 := 0.8$$

$$\text{benc12} := -bz1 + \frac{[\pi (D1 + 2 \cdot hz1)]}{Z1} \quad \text{benc12} = 7.692 \quad \text{mm}$$

**La hauteur de la clavette**

$$hk1 := 0.6 \quad \text{cm}$$

**La hauteur de l'encoche**

$$\text{henc1} := hz1 - \left( hk1 + hf1 + \frac{\text{benc12}}{2} \right) \quad \text{henc1} = 12.581 \quad \text{mm}$$

**La section occupée par l'isolation**

Epaisseur de l'isolant

$$e1 := 0.4 \quad \text{mm}$$

$$\text{Siso} := e1 \cdot \left( \text{benc11} + 2 \cdot \text{henc1} + \pi \cdot \frac{\text{benc12}}{2} \right) \quad \text{Siso} = 16.854$$

**La section occupée par les conducteurs**

$$\text{Sen1} := -\text{Siso} + \left[ 0.5(\text{benc11} + \text{benc12}) \cdot \text{henc1} + \pi \cdot \frac{\text{benc12}^2}{8} \right] \quad \text{Sen1} = 85.533 \quad \text{mm}^2$$

**Coefficient de remplissage de l'encoche**

$$\text{Kre1} := \frac{\left( N_{e1} \cdot U_{enc1} \cdot d_{iso}^2 \right)}{\text{Sen1}} \quad \text{Kre1} = 1.044$$

**Flux sous un pôle**

$$\phi := \frac{(K_e \cdot U_{n1})}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot f \cdot K_{en1}}$$

$$\phi = 6.134 \times 10^{-3} \quad \text{Wb}$$

**Le rotor****Nous avons le nombre d'encoches rotoriques**

$$Z_2 = 28$$

**Diamètre extérieur du rotor****Avec un entrefer de**

$$\delta_0 := 0.4 \quad \text{mm}$$

$$D_2 := D_1 - 2 \cdot \delta_0$$

$$D_2 = 87.7 \quad \text{mm}$$

**Le pas dentaire**

$$t_2 := \frac{(\pi \cdot D_2)}{Z_2}$$

$$t_2 = 9.84 \quad \text{mm}$$

**Le courant dans la barre**

$$I_2 := 1.11 \cdot I_{n1} \cdot \frac{(6 \cdot W_1 \cdot \cos \varphi \cdot K_{en1})}{Z_2}$$

$$I_2 = 214.463 \quad \text{A}$$

**La hauteur de la culasse rotorique**

Induction dans la culasse rotorique

$$B_{c2} := 1.25 \quad \text{T} \quad (\text{Tableau T-5})$$

$$\tau_{p2} := \frac{(\pi \cdot D_2)}{2 \cdot p}$$

$$\tau_{p2} = 68.879 \quad \text{mm}$$

$$h_{c2} := 0.5 \cdot \frac{(\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot \beta_g)}{K_{fer} \cdot B_{c2}}$$

$$h_{c2} = 13.634 \quad \text{mm}$$

**La hauteur de la dent**

$$D_{int2} := 37$$

$$h_{z2} := 0.5 \cdot (D2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad h_{z2} = 11.716 \quad \text{mm}$$

**Encoche rotorique****La largeur de l'encoche**

Induction admissible dans la dent rotorique  $B_{z2max} := 1.75$  T (Tableau T-5)

$$b_{z2} := \frac{(t2 \cdot \beta_g)}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad b_{z2} = 4.348 \quad \text{mm}$$

**Diamètre maximal de l'encoche**

Hauteur de la fente d'encoche  $h_{f2} := 0.7$  mm

$$d_{21} := \frac{[\pi \cdot (D2 - 2 \cdot h_{f2})] - Z2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z2} \quad d_{21} = 4.797 \quad \text{mm}$$

**Diamètre minimal de l'encoche**

$$d_{22} := \frac{[\pi \cdot (D2 - 2 \cdot h_{z2})] - Z2 \cdot b_{z2}}{Z2 - \pi} \quad d_{22} = 3.225 \quad \text{mm}$$

## La cage rotorique

### Section de la barre

$$h2 := hz2 - hf2 - 0.5(d21 + d22) \quad h2 = 7.005 \quad \text{mm}$$

$$henc2 := h2 + 0.5(d21 + d22) \quad henc2 = 11.016 \quad \text{mm}$$

$$Sb := 0.125(d21^2 + d22^2) \cdot \pi + 0.5(d21 + d22) \cdot h2 \quad Sb = 41.219 \quad \text{mm}^2$$

### Densité du courant

$$Jb := \frac{I2}{Sb} \quad Jb = 5.203 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

### Les anneaux de court-circuit

#### La hauteur de l'anneau

$$han := 1.2 \cdot hz2 \quad han = 14.059 \quad \text{mm}$$

#### La section de l'anneau

$$San := \frac{Z2 \cdot Sb \cdot 0.35}{2 \cdot p} \quad San = 100.988 \quad \text{mm}^2$$

#### La largeur de l'anneau

$$ban := \frac{San}{han} \quad ban = 7.183 \quad \text{mm}$$

#### Diamètre moyen intérieur de l'anneau

$$Dan := D2 - han \quad Dan = 73.641 \quad \text{mm}$$

## CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

### A Calcul du circuit magnétique statorique

#### Induction dans la dent du stator

$$B_{z1} := \frac{(\beta g \cdot t1)}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad B_{z1} = 1.9 \quad T$$

#### Fmm dans la dent du stator

$$B_{z1} = 1.9$$

Intensité de champ magnétique dans la dent qui correspond à l'induction  $B_{z1}$

$$H_{z1} := 2070 \quad \frac{A}{m} \quad (\text{Tableau T-7})$$

$$F_{z1} := H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 36.902 \quad A$$

#### La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique

$$L_{c1} := (D_{ext} - h_{c1}) \cdot \left( \frac{\pi}{2 \cdot p} \right) \quad L_{c1} = 105.697 \quad mm$$

#### Fmm dans la culasse

$$B_{c1} = 1.65$$

Intensité du champ magnétique dans la culasse qui correspond à l'induction  $B_{c1}$

$$H_{c1} := 946 \quad \frac{A}{m} \quad (\text{Tableau T-6})$$

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 99.989 \quad A$$

**B L'entrefer****Fmm dans l'entrefer**

$$bf1 := 2.8 \quad \text{mm}$$

$$bf2 := 2 \cdot d_{\text{ISO}} \quad bf2 = 1.946 \quad \text{mm}$$

$$K\delta 1 := 1 + \frac{bf1}{(t1 - bf1) + \frac{(5 \cdot \delta 0 \cdot t2)}{bf2}}$$

$$K\delta 1 = 1.186$$

$$K\delta 2 := 1 + \frac{bf2}{t2 - bf2 + \frac{(5 \cdot \delta 0 \cdot t2)}{bf2}}$$

$$K\delta 2 = 1.108$$

$K\delta$  Coefficient de CARTER qui tient compte de la non-uniformité de l'entrefer

$$K\delta := K\delta 1 \cdot K\delta 2 \quad K\delta = 1.314$$

$$F\delta := 0.8 \cdot \beta_g \cdot K\delta \cdot \delta 0 \cdot 10^3$$

$$F\delta = 315.459 \quad \text{A}$$

**C Circuit magnétique rotorique****Induction dans la dent**

$$Bz2 := \frac{(\beta_g \cdot t2)}{K_{\text{fer}} \cdot bz2}$$

$$Bz2 = 1.75 \quad \text{T}$$

$$Hz2 := 1330 \quad \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (\text{Tableau T-7})$$

**Fmm dans la dent**

$$Fz2 := Hz2 \cdot (hz2 - 0.4 \cdot d22) \cdot 10^{-3}$$

$$Fz2 = 13.867 \quad \text{A}$$

**La longueur moyenne des lignes dans la culasse rotorique**

$$L_{c2} := (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \left( \frac{\pi}{2p} \right) + h_{c2} \quad L_{c2} = 53.402 \quad \text{mm}$$

**Fmm dans la culasse rotorique**

$$B_{c2} = 1.25 \quad H_{c2} := 289 \quad \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (\text{Tableau T-6})$$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 15.433 \quad \text{A}$$

**Fmm totale par paire de pole**

$$F_o := 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad F_o = 847.878 \quad \text{A}$$

**Coefficient de saturation des dents**

$$k_{\mu z} := \frac{(F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2})}{F_{\delta}} \quad k_{\mu z} = 1.161$$

**Coefficient de saturation de la machine**

$$K_{\mu} := \frac{F_o}{2 \cdot F_{\delta}} \quad K_{\mu} = 1.344$$

**Le courant magnétisant**

$$I_{\mu} := \frac{(p \cdot F_o)}{0.9 \cdot m_l \cdot W_l \cdot K_{en1}} \quad I_{\mu} = 2.32 \quad \text{A}$$

**La réactance de magnétisation**

$$X_m := \frac{(K_e \cdot U_{n1})}{I_{\mu}} \quad X_m = 158.855 \quad \Omega$$

## Coefficient de dispersion magnétique du stator

Réactance inductive de dispersion de l'enroulement statorique

$$X1 := 8.7 \quad \Omega$$

$$\sigma\mu := \frac{X1}{Xm} \quad \sigma\mu = 0.055$$

## Force électromagnétique à vide

$$E0 := \frac{Un1}{1 + \sigma\mu} \quad E0 = 360.269 \quad V$$

## PARAMETRES DU STATOR

### Résistance active

$$AT = 20^\circ C \quad \rho_{cu} := 0.0172 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\Omega}{m}$$

$$\text{Pas moyen d'un groupe de section} \quad y1_{moy} := 9$$

Largeur moyenne d'une section

$$b1_{moy} := \frac{[\pi \cdot (D1 + hz1) \cdot y1_{moy}]}{Z1} \quad b1_{moy} = 83.509 \quad mm$$

Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire

$$Lf1 := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b1_{moy} + 15 \quad Lf1 = 135.253 \quad mm$$

Longueur moyenne d'une spire

$$Lw1 := 2 \cdot (Li + Lf1) \quad Lw1 = 638.333 \quad mm$$

$$R_1 := \rho_{cu} \cdot \frac{(W_1 \cdot Lw_1 \cdot 10^3)}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad R_1 = 4.867 \quad \Omega$$

$$A \quad T = 115^\circ C \quad \rho_{CU} := 0.0244 \cdot 10^{-6} \quad \Omega$$

$$R_1 := \rho_{CU} \cdot \frac{(W_1 \cdot Lw_1 \cdot 10^3)}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad R_1 = 6.904 \quad \Omega$$

### La réactance de fuite frontale

$$K_{B1} := 1 \quad K_{B2} := 1$$

$$Q_1 := \frac{Z_2}{p} \quad Q_1 = 14$$

$$Q := 3 \quad (\text{Tableau T-2})$$

$$K_{dd1} := 0.93 \quad (\text{Tableau T-3})$$

$$K_{rr1} := 0.0141 \quad (\text{Tableau T-4})$$

$$\lambda_{1f} := 0.34 \cdot \frac{[q_1 \cdot (Lf_1 - 0.64\beta \cdot \tau p_1)]}{Li} \quad \lambda_{1f} = 0.503$$

$$X_{1f} := \frac{(1.58 \cdot f \cdot Li \cdot W_1^2 \cdot \lambda_{1f})}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \quad X_{1f} = 0.969 \quad \Omega$$

### Réactance de fuite différentielle

$$K_{r1} := 1 - \left[ \frac{(0.033 \cdot bf_1^2)}{80 \cdot t_1} \right] \quad K_{r1} = 0.916$$

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot Ken_1)^2}{K\delta \cdot 80} \cdot (K_{dd1} \cdot K_{rr1} \cdot K_{r1}) \quad \lambda_{1d} = 1.317$$

$$X_{1d} := 1.58 \cdot f \cdot Li \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_{1d}}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_{1d} = 2.536 \quad \Omega$$

**Réactance de fuite d'encoche**

$$h1 := \text{henc1} \quad h11 := 1 \quad h1 = 12.581$$

$$\lambda_{\text{enc1}} := \frac{(h1 \cdot K_{B1})}{3 \cdot \text{benc12}} + \left[ \frac{hf1}{bf1} + \frac{(3 \cdot hk1)}{\text{benc12} + 2 \cdot bf1} + \frac{h11}{\text{benc12}} \right] \cdot K_{B2} \quad \lambda_{\text{enc1}} = 1.096$$

$$X_{\text{enc1}} := 1.58 \cdot f \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{\text{enc1}}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{\text{enc1}} = 2.111 \quad \Omega$$

**Réactance totale**

$$\lambda1 := (\lambda_{\text{enc1}} + \lambda1f + \lambda1d) \quad \lambda1 = 2.917$$

$$X_1 := 1.58 \cdot f \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda1}{p \cdot q1 \cdot 10^3} \quad X_1 = 5.617 \times 10^5 \quad \Omega$$

**PARAMETRES DU ROTOR****Résistance active de la barre**

$$A \quad T: \quad 20^\circ\text{C} \quad \rho_{AL} := 0.028 \cdot 10^{-6} \quad \Omega \quad K_{\text{dep}} := 0.915 \quad L2 := Li$$

$$R_b := \rho_{AL} \cdot \frac{Li \cdot 10^3}{S_b} \quad R_b = 1.249 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Résistance de l'anneau**

$$R_{\text{an}} := \frac{(\rho_{AL} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{Dan} \cdot 10^3)}{Z2 \cdot S_{\text{an}}} \quad R_{\text{an}} = 4.582 \times 10^{-6}$$

**Résistance de l'anneau ramenée à la barre**

$$K_{red} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{Z2} \quad K_{red} = 0.449$$

$$R_{anramb} := \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \quad R_{anramb} = 2.275 \times 10^{-5} \quad \Omega$$

**Résistance de l'anneau ramenée au stator**

Rapport des pas dentaires statorique et rotorique

$$\beta_{ob} := \frac{t1}{t2} \quad \beta_{ob} = 0.785$$

Angle d'inclinaison des encoches

$$\alpha_{ob} := \frac{(2 \cdot \pi \cdot p \cdot \beta_{ob})}{Z2} \quad \alpha_{ob} = 0.352$$

Coefficient d'obliquité des encoches

$$K_{ob} := \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad K_{ob} = 0.995$$

Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator

$$M := \left(\frac{4m1}{Z2}\right) \cdot \left(\frac{W1 \cdot Ken1}{K_{ob}}\right)^2 \quad M = 3.173 \times 10^4$$

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anramb} \quad R_{anrams} = 0.722$$

**Résistance active d'une phase rotorique**

$$R2 := R_b + R_{anramb} \quad R2 = 1.477 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator**

$$R2ram := M \cdot R2 \quad R2ram = 4.685 \quad \Omega$$

## Réactance de dispersions et perméance du rotor

$$\lambda_{ob} := \frac{t2 \cdot \beta_{ob}}{9.5 \cdot \delta \cdot K_{\mu} \cdot K_{\delta}}$$

$$\lambda_{ob} = 1.151$$

$$I_{an} := \frac{I_2}{K_{red}}$$

$$I_{an} = 477.859$$

$$J_{an} := \frac{I_{an}}{S_{an}}$$

$$J_{an} = 4.732 \quad \frac{A}{mm^2}$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p}\right)^2}$$

$$K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2f} := \frac{2.3 \cdot D_{an}}{Z2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[ \frac{4.7 \cdot D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + b_{an})} \right]$$

$$\lambda_{2f} = 0.149$$

$$\Psi := 1 \quad \text{en régime normale } \psi = 1$$

$$C_{\lambda} := \Psi \cdot \left[ 0.66 - \left( \frac{bf2}{2 \cdot d21} \right) + \left( \frac{1 - \pi \cdot d21}{8 \cdot S_b} \right)^2 \cdot \left( \frac{h2 + 0.4d22}{3 \cdot d21} \right) \right]$$

$$C_{\lambda} = 0.458$$

$$\lambda_{2enc} := C_{\lambda} + \frac{hf2}{bf2}$$

$$\lambda_{2enc} = 0.818$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p}\right)^2}$$

$$K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 \cdot t2 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p}\right)^2 \cdot K_{dd2}}{\delta \cdot K_{\delta}}$$

$$\lambda_{2d} = 1.541$$

$$\lambda_2 := \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}$$

$$\lambda_2 = 3.658$$

$$X_2 := 7.9 \cdot f \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9}$$

$$X_2 = 2.658 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

### Réactance du rotor ramenée au stator

$$X_{2ram} := M \cdot X_2$$

$$X_{2ram} = 8.432 \quad \Omega$$

### Paramètres au démarrage

#### Profondeur de pénétration

$$\frac{\Phi}{\lambda \lambda \lambda} := 0.44$$

$$gd := 1$$

$$hb := henc2$$

$$h_{pp} := \frac{hb}{1 + \Phi}$$

$$h_{pp} = 7.65$$

$$\zeta_1 := 0.064 \cdot hb \cdot \sqrt{gd}$$

$$\zeta_1 = 0.705$$

#### La largeur à la limite de pénétration

$$b_{pp} := d_{21} - \left[ \left( \frac{d_{21} - d_{22}}{h_2} \right) \cdot \frac{(h_{pp} - d_{21})}{2} \right]$$

$$b_{pp} = 4.477 \quad \text{mm}$$

#### Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$$S_{bdem} := \left( \frac{\pi \cdot d_{21}^2}{8} \right) + [0.5(d_{21} + b_{pp}) \cdot (h_{pp} - 0.5d_{21})]$$

$$S_{bdem} = 33.388 \quad \text{mm}^2$$

#### Résistance de la barre au démarrage

$$K_{dep} := \frac{S_b}{S_{bdem}}$$

$$K_{dep} = 1.235$$

$$R_{bdem} := R_p \cdot K_{dep}$$

$$R_{bdem} = 1.143 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Résistance de la cage au démarrage**

$$R_{2dem} := R_{anramb} + R_{bdem}$$

$$R_{2dem} = 1.371 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator**

$$R_{2demram} := M \cdot (R_{anramb} + R_{bdem})$$

$$R_{2demram} = 4.348 \quad \Omega$$

**Réactance de fuite au démarrage**

$$\Psi_1 := 1$$

$$C_{\lambda 1} := C_{\lambda} \cdot \Psi_1$$

$$C_{\lambda 1} = 0.458$$

$$\lambda_{2encdem} := C_{\lambda 1} + \frac{hf_2}{bf_2}$$

$$\lambda_{2encdem} = 0.818$$

$$\lambda_{2dem} := \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}$$

$$\lambda_{2dem} = 3.658$$

$$X_{2dem} := 7.9 \cdot f \cdot L_2 \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9}$$

$$X_{2dem} = 2.658 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator**

$$X_{2demrams} := M \cdot X_{2dem}$$

$$X_{2demrams} = 8.432 \quad \Omega$$

## CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

### Pertes principales dans le fer

#### Pertes dans les dents

$$P1 := 2.5 \quad W \cdot Kg^{-1} \quad \text{Pour l'acier 2013}$$

$$Gz1 := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot Kfer \cdot [hz1 \cdot \pi \cdot (D1 + hz1) - Uenc1 \cdot Z1] \quad Gz1 = 5.924 \quad Kg$$

$$Pz1 := 1.7 \cdot P1 \cdot Gz1 \cdot Bz1max^2 \quad Pz1 = 90.896 \quad W$$

#### Pertes dans la culasse statorique

$$Gc1 := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot Kfer \cdot hc1 \cdot \pi \cdot (Dext - hc1) \quad Gc1 = 6.132 \quad Kg$$

$$Pfc1 := 1.7 \cdot P1 \cdot Gc1 \cdot Bc1^2 \quad Pfc1 = 70.949 \quad W$$

$$Pfer := Pfc1 + Pz1 \quad Pfer = 161.845 \quad W$$

### Pertes dans le cuivre et l'aluminium

#### Perte Joule statorique

$$Pj1 := m1 \cdot R1 \cdot In1^2 \quad Pj1 = 235.166 \quad W$$

#### Perte Joule rotorique

$$m2 := 28$$

$$Pj2 := m2 \cdot R2 \cdot I2^2 \quad Pj2 = 190.185 \quad W$$

#### Perte mécanique

$$\text{Pour } 2P > 2 \quad Kt := 1$$

$$Pmec := Kt \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (Dext \cdot 10^{-2})^4 \quad Pmec = 9.946 \quad W$$

**Pertes supplémentaires**

$$P_{\text{sup}} := 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n}$$

$$P_{\text{sup}} = 18.987 \quad \text{W}$$

**Pertes totales**

$$P_t := P_{\text{fer}} + P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}}$$

$$P_t = 616.129 \quad \text{W}$$

**Rendement de la machine**

$$\eta := \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_t}$$

$$\eta = 0.83$$

**Calcul de la résistance de magnétisation**

$$U_{n1} = 380 \quad \text{V}$$

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_{\mu}^2$$

$$P_{a10} = 78.607 \quad \text{W}$$

$$I_{0a} := \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}}$$

$$I_{0a} = 0.22 \quad \text{A}$$

$$R_m := \frac{X_m \cdot I_{\mu}}{I_{0a}}$$

$$R_m = 1.678 \times 10^3 \quad \Omega$$

## Calcul des performances du moteur

### Caractéristiques de fonctionnement du moteur

#### La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire

$$P_n := 3000 \quad \text{W}$$

$$P_2 := P_n + P_{\text{sup}} + P_{\text{mec}} \quad P_2 = 3.029 \times 10^3 \quad \text{W}$$

#### Le glissement

$$a := -R_1 + \frac{(\sqrt{3} \cdot U_{n1}^2)}{2 \cdot P_2} \quad a = 36.42$$

$$R_T := R_{2\text{ram}} \cdot \left[ \left[ \frac{R_1}{R_{2\text{ram}}} \cdot \left( 1 + \frac{X_{2\text{ram}}}{X_m} \right) \right]^2 + \left[ \frac{X_1}{R_{2\text{ram}}} \cdot \left( 1 + \frac{X_{2\text{ram}}}{X_m} \right) + \frac{X_{2\text{ram}}}{R_{2\text{ram}}} \right]^2 \right] \quad R_T = 71.673 \quad \Omega$$

$$B_b := 2a + R_T \quad B_b = 144.513$$

$$C_1 := 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad C_1 = 1.055$$

$$g := \frac{a - \sqrt{a^2 - C_1^2 \cdot R_{2\text{ram}} \cdot B_b}}{B_b} \quad g = 0.086$$

#### L'induction équivalente

$$R_{2\text{eq}} := C_1 \cdot R_1 + \frac{C_1^2 \cdot R_{2\text{ram}}}{g_0} \quad R_{2\text{eq}} = 65.494 \quad \Omega$$

$$X_{2\text{eq}} := C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2\text{ram}} \quad X_{2\text{eq}} = 18.557 \quad \Omega$$

$$Z_{2\text{eq}} := \sqrt{R_{2\text{eq}}^2 + X_{2\text{eq}}^2} \quad Z_{2\text{eq}} = 68.072 \quad \Omega$$

**Calcul du courant secondaire**

$$I_2 := \frac{Un1}{Z2eq} \quad I_2 = 5.582 \quad A$$

$$I_{2c} := C1 \cdot I_2 \quad I_{2c} = 5.888 \quad A$$

**Le facteur de puissance rotorique**

$$\cos \varphi_2 := \frac{R2eq}{Z2eq} \quad \cos \varphi_2 = 0.962$$

$$I_{2a} := \cos \varphi_2 \cdot I_2 \quad I_{2a} = 5.371 \quad A$$

$$I_{2r} := 0.2730 \cdot I_2 \quad I_{2r} = 1.524 \quad A$$

**Le courant qui correspond aux pertes fer et aux pertes joule statorique à vide**

$$I_{0a} := \frac{(Pa10 + Pfer)}{m1 \cdot Un1} \quad I_{0a} = 0.211 \quad A$$

**Le courant magnétisant**

$$I_{0r} := \frac{p \cdot Fo}{0.9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot Ken1} \quad I_{0r} = 2.32 \quad A$$

**Le courant total à vide**

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad I_0 = 2.33 \quad A$$

**Le courant absorbé**

$$I_{1r} := I_{0r} + I_{2r} \quad I_{1r} = 3.844 \quad A$$

$$I_{1a} := I_{0a} + I_{2a} \quad I_{1a} = 5.582 \quad A$$

$$I_1 := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad I_1 = 6.778 \quad A$$

**Le facteur de puissance de la machine**

$$\cos\varphi_2 := \frac{I_{1a}}{I_1}$$

$$\cos\varphi_2 = 0.824$$

**Puissance absorbée par le moteur**

$$P_a := m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a}$$

$$P_a = 6.363 \times 10^3 \quad \text{W}$$

**Vitesse de rotation du moteur**

$$n_2 := N \cdot (1 - g)$$

$$n_2 = 1.37 \times 10^3 \frac{\text{tr}}{\text{min}}$$

**Le couple utile sur l'arbre du moteur**

$$C_u := 9.55 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{n_2}$$

$$C_u = 20.905 \quad \text{N}\cdot\text{m}$$

**Réactance équivalente au démarrage**

$$R_{eqdem} := C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2demram}$$

$$R_{eqdem} = 9.971 \quad \Omega$$

## Réactance équivalente au démarrage

Le coefficient qui est donné suivant la forme de l'encoche  $K_x=0.0825$

$$K_x := 0.0825$$

Perméance d'encoche statorique

$$\lambda_{enc1d} := \left( \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{B2} \quad \lambda_{enc1d} = 0.457$$

$$\lambda_{1dem} := \lambda_{enc1d} + \lambda_{1d} \quad \lambda_{1dem} = 1.774$$

Composante variable de l'encoche rotorique

$$\lambda_{enc2var} := \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad \lambda_{enc2var} = 0.36$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \quad \lambda_{2var} = 1.901$$

$$X_{var} := \frac{C1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} + C1 \cdot X1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} \quad X_{var} = 10.456 \quad \Omega$$

$$X_{const} := C1^2 \cdot X_{2demrams} \cdot \frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2var}} + C1 \cdot X1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} \quad X_{const} = 1.819 \quad \Omega$$

$$X_{eqdem} := X_{const} + K_x \cdot X_{var} \quad X_{eqdem} = 2.682 \quad \Omega$$

## Capacité de surcharge

Le glissement critique

$$g_{nom} := 0.06 \quad g_{cr} := C1 \cdot \frac{R_{2ram}}{X1 + C1 \cdot X_{2ram}} \quad g_{cr} = 0.281$$

$$R_{cr} := 2 \cdot R1 \cdot \frac{g_{cr}}{R_{2ram} \cdot C1} \quad R_{cr} = 0.553 \quad \Omega$$

$$K := \frac{R_{cr} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + \frac{g_{nom}}{g_{cr}}}{2 + R_{cr}} \quad K = 2.134 \quad N \cdot m$$

$$C_{max} := C_u \cdot K = 44.609 \quad Nm$$

**Le courant au démarrage**

$$I_{\text{Idem}} := \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{\text{eqdem}}^2 + X_{\text{eqdem}}^2}}$$

$$I_{\text{Idem}} = 36.803 \quad \text{A}$$

$$\frac{I_{\text{Idem}}}{I_1} = 5.43$$

**Le couple de démarrage**

$$C_d := \frac{(p \cdot U_{n1}^2 \cdot R_{2\text{demram}})}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (R_{\text{eqdem}}^2 + X_{\text{eqdem}}^2)}$$

$$C_d = 37.702 \quad \text{N}\cdot\text{m}$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 1.803$$

Tableau T1 : Sections normalisées [2]

<i>Section nominale (Snom) en mm</i>	<i>Diamètre nu (dnu) en mm</i>	<i>Diamètre avec isolation (diso) en mm</i>
0.00785	0.1	0.125
0.00882	0.106	0.131
0.00985	0.112	0.139
0.01094	0.118	0.145
0.01227	0.125	0.153
0.01368	0.132	0.161
0.01539	0.14	0.170
0.01767	0.15	0.181
0.02011	0.16	0.192
0.02270	0.17	0.203
0.02545	0.18	0.215
0.02835	0.19	0.225
0.03142	0.2	0.236
0.03530	0.217	0.250
0.03941	0.224	0.262
0.04374	0.236	0.276
0.04909	0.25	0.290
0.05515	0.265	0.307
0.06158	0.28	0.322
0.07069	0.30	0.344
0.07793	0.315	0.360
0.08814	0.335	0.381
0.09898	0.355	0.403
0.1104	0.375	0.424
0.1257	0.4	0.450
0.1419	0.425	0.478
0.1590	0.45	0.503
0.1772	0.475	0.531
0.1964	0.5	0.556
0.2124	0.52	0.576
0.2206	0.53	0.587
0.2463	0.56	0.619
0.2642	0.58	0.640
0.2827	0.6	0.661
0.3117	0.63	0.692
0.3318	0.65	0.713
0.3526	0.67	0.735
0.3959	0.71	0.776
0.4418	0.75	0.817
0.4778	0.78	0.848
0.5027	0.8	0.869
0.5281	0.82	0.890
0.5674	0.85	0.921
0.6082	0.88	0.952
0.6362	0.9	0.973
0.7088	0.95	1.0.24
0.7854	1.00	1.076
0.8825	1.06	1.137
0.9852	1.12	1.199
1.095	1.18	1.260

**Tableau T-2** : Q en fonction de la hauteur d'axe de nombres de pôles [8].

hauteur d'axe [mm]	2P=2	2P=4	2P=6
63	4	2	2
71	4	2	2
80-100	4	3	2
112-132	4	3	3
160	6	4	3
180-225	6	4	4
250	8	5	4
280-355	8	5	4

**Tableau T-3:** Kdd1 en fonction de Z2/P [8].

Q1	10	15	20	25	30	35	40
2	0.99	0.94	-	-	-	-	-
3	0.98	0.93	0.88	0.85	-	-	-
4	-	0.90	0.84	0.80	0.77	-	-
5	-	-	-	0.75	0.72	0.70	-
6	-	-	-	0.70	0.60	0.62	-
8	-	-	-	-	-	0.53	0.51

**Tableau T-4** : Krr1 en fonction de Q1 [8].

Q1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
Krr1	-	0.0285	-	0.0141	0.0065	0.0052	-	-

Tableau T-4 : Inductions dans la culasse et dent statorique en fonction de la hauteur d'axe et de nombre de pôles [11]

Hauteur d'axe h [mm]	Le nombre de poles	$B_{z1}$ [T]	$B_{c1}$ [T]
50-132	2, 4	[1,75 ÷ 1,95]	[1,5 ÷ 1,65]
	6	[1,75 ÷ 1,95]	[1,50 ÷ 1,65]
	8	[1,75 ÷ 1,95]	[1,45 ÷ 1,60]
160-225	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 T-5: Inductions maximales dans la culasse et dents rotorique en fonction de la hauteur d'axe et de nombre de pôles [11]

Hauteur d'axe [mm]	Nombre de poles	$B_{z2}$ [T]	$B_{c2}$ [T]
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 ÷ 1,90]	[1,05 ÷ 1,15]
	8	[1,65 ÷ 1,90]	[0,75 ÷ 0,85]

Tableau T-6 : Intensité du champ magnétique dans la culasse qui correspond à Bc1 et Bc2[11]

<b>B(T)</b>	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	0,59	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	1,00	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	2,73	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	5,85	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	10,20	10,70	11,10
1,7	11,50	12,20	12,90	13,60	14,30	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00
1,8	20,00	21,60	23,20	24,90	26,50	28,10	29,60	31,10	32,70	34,20
1,9	35,70	38,00	40,30	42,60	44,90	47,20	49,30	51,40	53,50	55,60

Tableau T-7 : Intensité de champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui correspond à Bz1 et Bz2 [11]

<b>B(T)</b>	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	2,27	1,30	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50
0,5	1,54	2,57	1,60	1,54	1,67	1,71	1,74	1,77	1,80	1,84
0,6	1,88	0,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,24
0,7	2,23	0,26	2,29	2,33	2,36	2,40	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	2,56	0,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	0,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	0,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,70	0,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	0,30	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	0,95	5,04	5,14	5,24	5,33	5,62	5,74	5,84	5,95
1,4	5,86	0,98	6,10	6,32	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	6,96
1,5	7,09	0,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	5,80	0,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,20	10,50	10,80	11,10
1,7	11,50	1,80	12,20	12,50	12,90	13,30	13,60	14,00	14,40	14,80
1,8	15,20	5,70	16,20	16,70	17,20	17,70	18,80	18,90	19,50	20,10
1,9	20,70	1,60	22,50	23,40	24,30	25,20	26,40	27,60	28,90	30,20
2,0	31,50	3,20	35,00	36,80	38,80	40,40	42,60	44,80	47,00	49,20

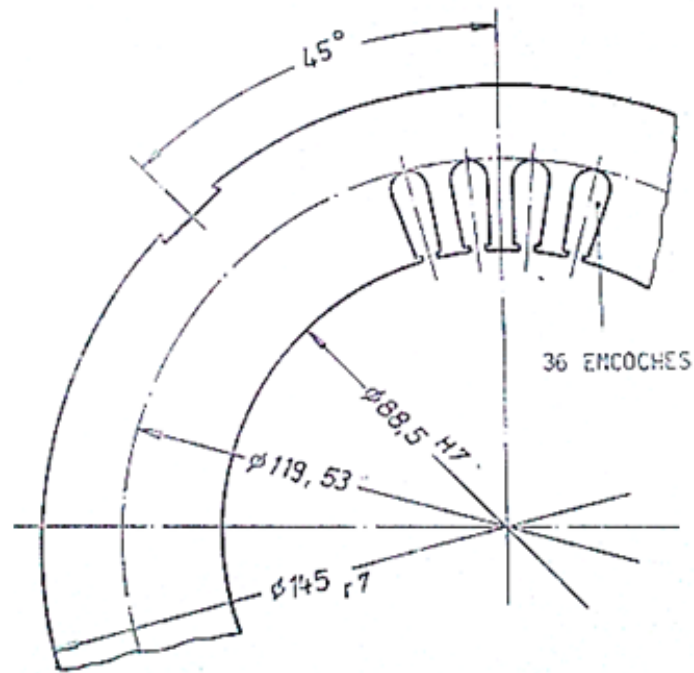


Figure A-1 : Tôle magnétique statorique [10].

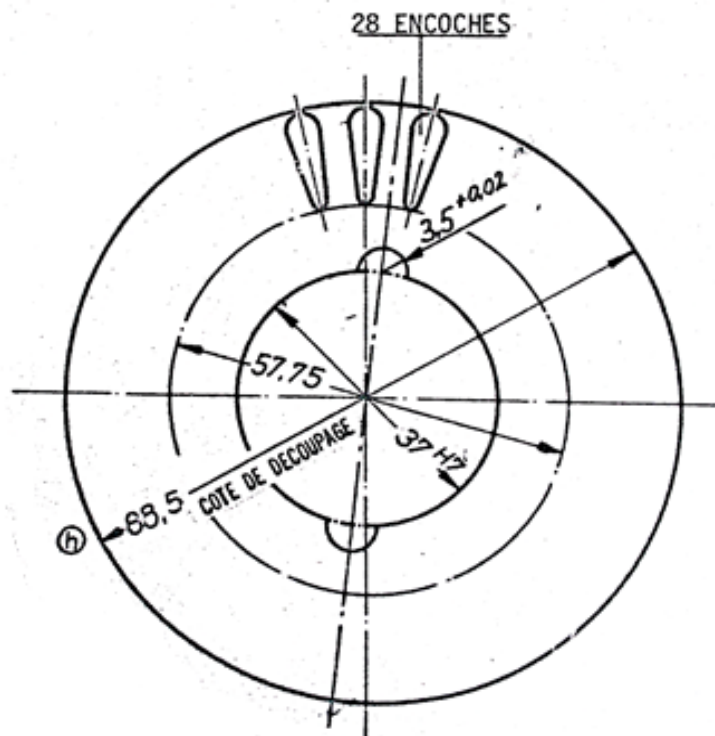


Figure A-2 : Tôle magnétique rotorique [10].

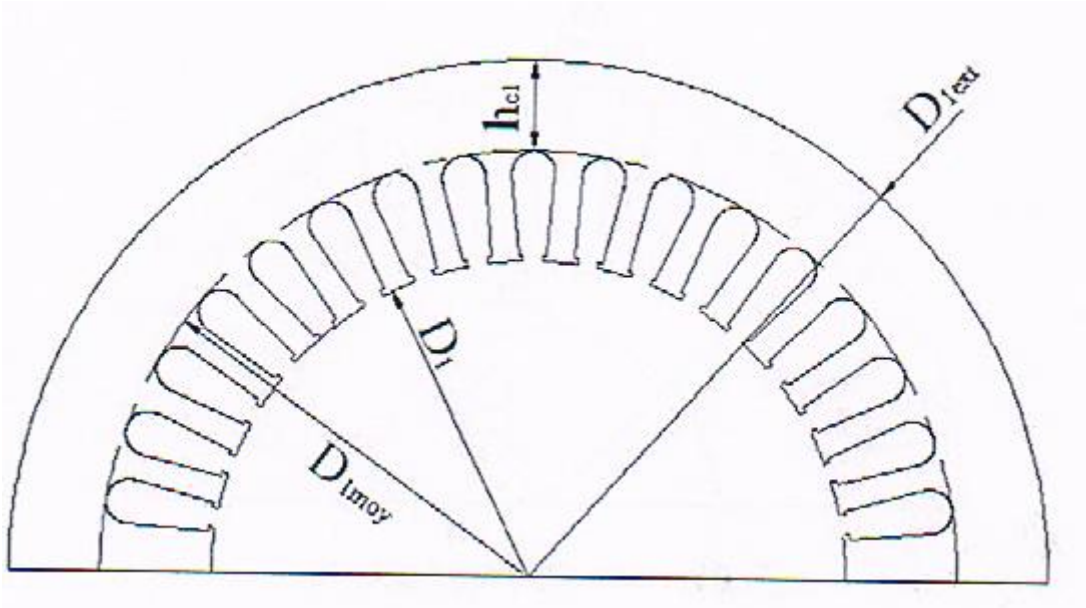


Figure A-3-1 Feuille statorique [1]

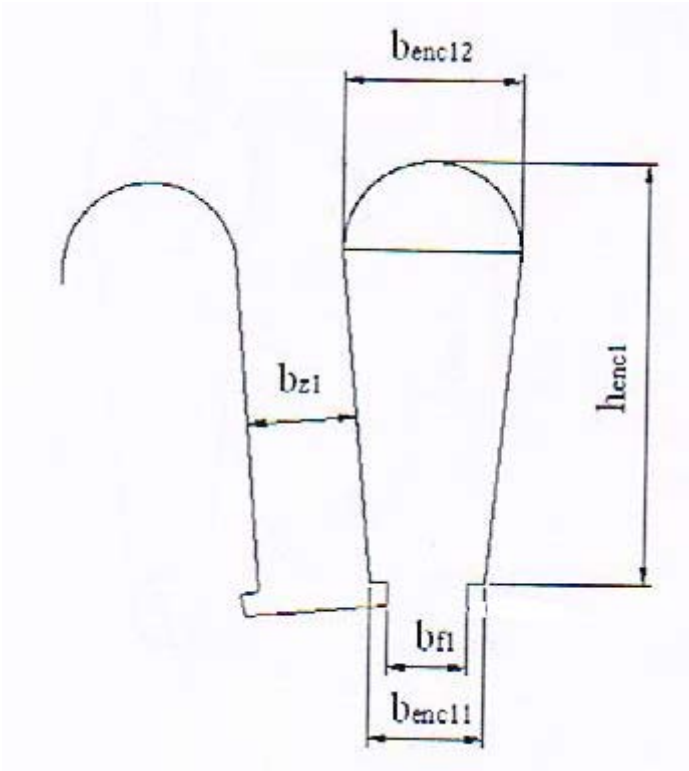


Figure A-3-2 Encoche statorique [1]

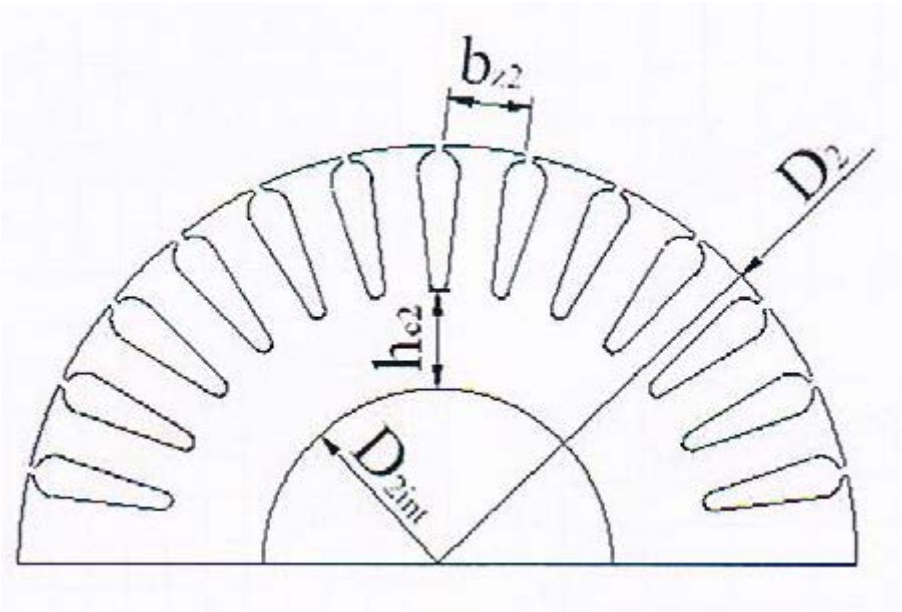


Figure A-4-1 Feuille rotorique [1]

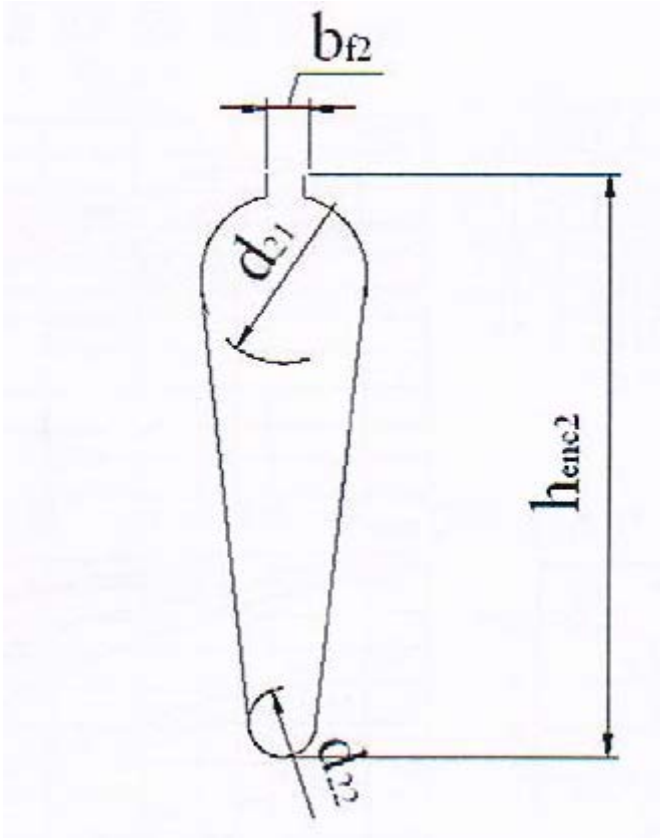


Figure A-4-2 Encoche rotorique [1]

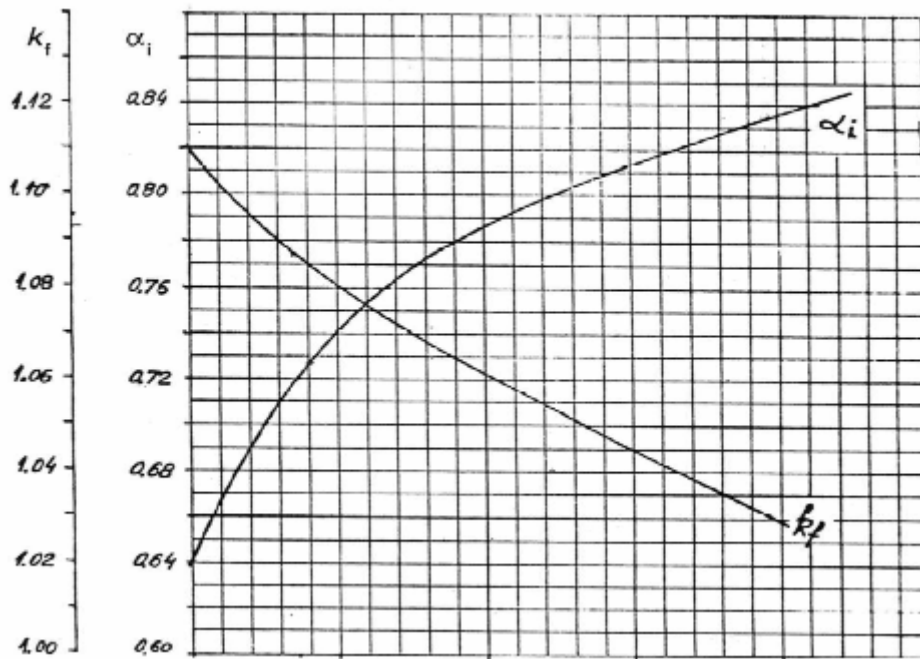


Figure A-5:

$\alpha_i$  et  $K_f$  le coefficient de recouvrement polaire et Facteur de la forme d'induction [11]

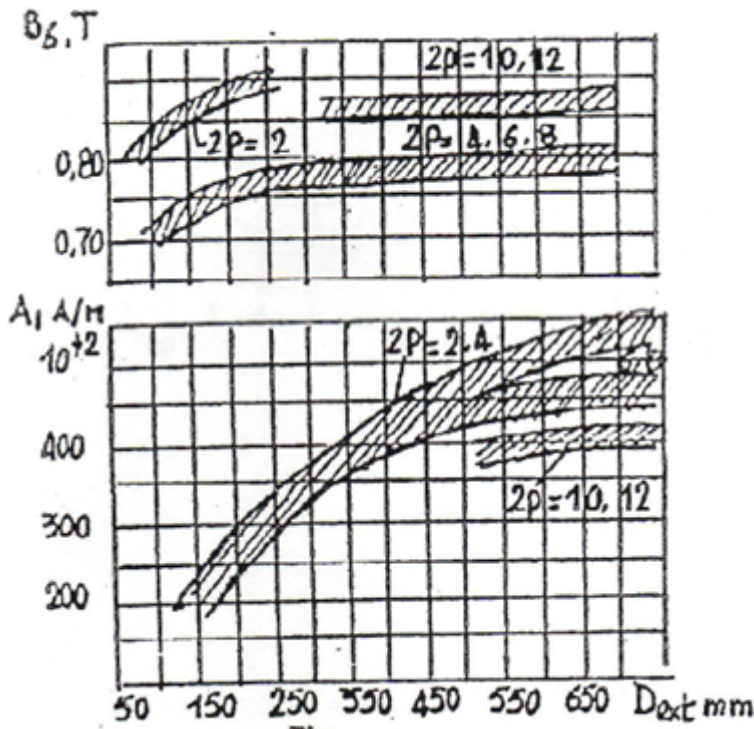


Figure A-6 : La charge linéaire  $A_1$  et l'induction dans l'entrefer  $\beta_g$  en fonction de diamètre extérieur du stator [2]

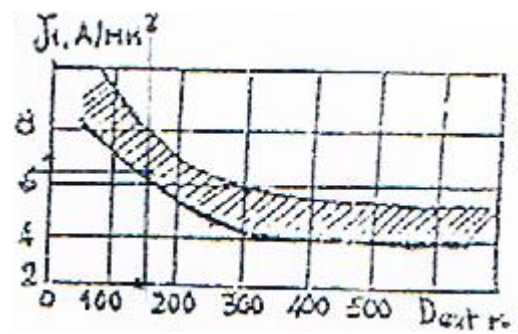


Figure A-7 : Densité de courant en fonction de diamètre extérieur [2]

# *Conclusion*

## *Générale*

Le travail réalisé dans ce mémoire a porté sur le dimensionnement des moteurs asynchrones à cage en vue de l'amélioration de leurs performances. Pour cela, nous avons augmenté la longueur du stator ainsi que le diamètre des conducteurs de ses enroulements. Les calculs des différents paramètres du moteur s'est fait avec le logiciel de calcul Mathcad 14.

Avant de passer à la partie dimensionnement, nous avons d'abord décrit la machine asynchrone à cage : sa constitution, son fonctionnement et le processus de sa fabrication. Nous avons ensuite exposé la méthode de dimensionnement que nous avons utilisée. Dans l'application, nous avons déterminé toutes les dimensions du circuit magnétique (statorique et rotorique). Ceci nous a permis de définir les caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques de moteur.

Le résultat de dimensionnement nous montre que le rendement de la machine passe de 79% à 83%, ce qui correspond à un couple utile qui passe de 20 N.m à 21 N.m.

Notre étude nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les moteurs asynchrones et de connaître l'enjeu de la conception des machines électriques plus particulièrement le moteur à cage d'écureuil.

Enfin, nous espérons que nous avons apporté un appui considérable pour les étudiants des promotions futures afin d'optimiser les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil et nous souhaitons que d'autres études seront faites sur ce sujet, en prenant en considération d'autres paramètres.

# *Bibliographie*

## **Bibliographie :**

- [1]. (Mr: AMEUR TARIQ, Mr: ANKOUR AMOKRANE, Mr: ARTBAS MASSINISSA). Conception d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence. Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique UMMTO, année 2008
- [2].(Melle: ABBAS SADIA, Melle: HACID FATMA-ZOHRA, Mr: HDJAB HAKIM). Conception optimale techno-économique d'un moteur asynchrone triphasé à double cage. Mémoire ingénieur d'état en électrotechnique UMMTO, année 2008/2009
- [3].(REAL-PAUL BOUCHARD GUY OLIVIER) Conception de moteurs asynchrone triphasés. Edition Ecole polytechnique du CANADA. 1997.
- [4]. (Melle: ABDESLAM DJAMILA). Analyse et construction d'un moteur asynchrone à rotor à cage. Mémoire ingénieur d'état en électrotechnique Ecole national polytechnique, année 2005/2006
- [5].WILDI Theodore et SYBILLE Gilbert. Electrotechnique ,quatrième édition De Boeck Université. CANADA.
- [6].(Melle: ABDELLI RADIA). Perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec des défauts au stator et au rotor. Mémoire magister école national polytechnique, année 2007
- [7]. (Mr: IRENE Belaid, Mr: AGOUN Massinissa). Contribution au diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Mémoire ingénieur d'état en électrotechnique UMMTO, année 2007
- [8]. (Mr: CHAIB Mokrane, Mr: RAHAB Tarik). Conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à haut rendement (I E 2). Mémoire Master II en électrotechnique UMMTO, année 2011
- [9].(BOUZIDA Ahcene). Diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Magister école national polytechnique, année 2008
- [10]. Notes internes fournies par la firme Electro-Industries.
- [11].(Melle : AIT OUFELLA Lilia). Contribution au dimensionnement des moteurs asynchrones par implémentation d'un code de calculinteractif sous MATLAB Gui. 2010 Mémoire ingénieur d'état en électrotechnique UMMTO, année 2010