



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**Abdenour Tourqui**

Le : dimanche 7 juillet 2019

## **Optimisation des circuits électromagnétique des machines asynchrones associées à différents rotors**

---

### **Jury :**

Pr.	Titaouine Abd Ennacer	Pr	Université de biskra	Rapporteur
Dr.	Rezig Mohamed	MCB	Université de biskra	Président
Dr.	Sahraoui Mohamed	MCA	Université de biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2018



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

---

Présenté et soutenu par :  
**Abdenour Tourqui**

Le : dimanche 7 juillet 2019

## **Optimisation des circuits électromagnétique des machines asynchrones associes à différents rotors**

---

Présenté par :  
Abdenour Tourqui

Avis favorable de l'encadreur :  
Pr. Titaouine Abd Ennacer *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Rezig Mohamed

*Signature*

Cachet et signature

## Resumé

Le travail effectué dans ce mémoire est basé sur la méthode analytique de dimensionnement de la machine asynchrone associée à trois types de rotors "à cage d'écureuil, encoches profondes et bobiné" à encoches rotoriques ouvertes à l'aide de la procédure de calcul de LIWSCHITZ. Cette procédure permet de dimensionner les différentes parties de la machine, comme le stator, le rotor, la partie électrique, et magnétique. Elle est basée sur des formules empiriques et des abaques. L'examen des résultats de la procédure de dimensionnement à savoir courant nominal, couple nominal, couple de démarrage, ...etc et leurs comparaisons avec celles du catalogue permet de conclure que l'approche de la méthode LIWSCHITZ donne des valeurs proches à ceux données par le constructeur malgré qu'elle est conditionnée par des courbes et des équations empiriques.

## **Abstract**

The work carried out in this thesis is based on the analytical method of design of the asynchronous machine associated with three types of rotors "squirrel cage, deep notches and wound" open rotor notches using the procedure of calculation of LIWSCHITZ. This procedure makes it possible to dimension the different parts of the machine, such as the stator, the rotor, the electrical part, and magnetic. It is based on empirical formulas and charts. Examining the results of the design procedure, namely nominal current, nominal torque, starting torque, etc., and their comparisons with those in the catalog, it can be concluded that the approach of the LIWSCHITZ method gives values close to those given by the constructor despite which it is conditioned by curves and empirical equations.

## **المخلص**

يستند العمل الذي تم تنفيذه في هذه الرسالة إلى الطريقة التحليلية لتصميم الجهاز غير المتزامن المرتبط بثلاثة أنواع من الدورات "قفص السنجاب والشقوق العميقة والشقوق الدوارة المفتوحة" باستخدام طريقة حساب لويشيتز. يتيح هذا الإجراء تحديد أبعاد الأجزاء المختلفة من الماكينة، مثل الجزء الثابت، الدوار، الجزء الكهربائي، والمغناطيسي. وهو يعتمد على الصيغ والمخططات التجريبية. عند دراسة نتائج إجراء التصميم، أي التيار الاسمي، وعزم الدوران الاسمي، وعزم الدوران، وما إلى ذلك، ومقارنتها مع تلك الموجودة في الكتالوج، يمكن استنتاج أن نهج طريقة لويشيتز يعطي قيمًا قريبة من القيم المعطاة بواسطة المنشئ على الرغم من أنه مشروط بالمنحنيات والمعادلات التجريبية.

# ***Remerciements***

*Je remercie avant tout le bon dieu de m'avoir donnée la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Je remercie mon directeur de recherche **Mr. Titaouine Abd Ennacer** qui m'a beaucoup aidé dans mon travail.*

*Mes remerciements aux membres du jury qui me font l'honneur de lire et de discuter ce travail :*

***Mr. REZIG Mohamed**, d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.*

***Mr. SAHRAOUI Mohamed**, pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du jury.*

***Mr. SAADI RAMZI**, pour avoir accepté d'être le encadreur de mon soutenance.*

*Je n'oublierai pas d'exprimer un profond respect à tous mes professeurs qui m'ont inculqué les fondements scientifiques tout au long des cursus de mon étude.*

*Je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu moralement et qui m'ont donnée le courage d'accomplir mon travail.*

# ***Dédicace***

*Je Dédie ce travail à ma source de bonheur et de joie, ceux qui se sont toujours sacrifiés pour me voire réussir : mes chères parents.*

*Et je le dédie aussi à toutes ces personnes qui me sont très chères Ma sœur-Mes frères et toute la famille: Tourqui*

*Je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu moralement et qui m'ont donnée le courage d'accomplir mon travail.*

*Je remercie également tous mes amis*

***Abdenour- tourqui.***

## Liste des Symboles

$A$	Densité (charge) linéique (A /m)
$a$	Nombre de branches couplées en parallèle de l'enroulement de phase
$a_{An}$	Longueur de l'anneau de la cage d'écureuil (m)
$b_l$	Largeur maximale de l'encoche trapézoïdale statorique (m)
$b_2$	Largeur minimale de l'encoche trapézoïdale statorique (m)
$b_{lr}$	Largeur maximale de l'encoche rotorique (m)
$b_{2r}$	Largeur minimale de l'encoche rotorique (m)
$b_{is}$	Épaisseur unilatérale de l'isolant dans une encoche statorique (m)
$b_{An}$	Largeur de l'anneau de la cage d'écureuil (m)
$b_B$	Largeur de la barre l'encoche rotorique
$b_{e12}$	Hauteur de clavette de l'encoche trapézoïdale du stator (m)
$b_f$	Ouverture de l'isthme des dents de l'encoche du rotor (m)
$b_{z1}$	largeur du dent statorique (m)
	largeur du dent rotorique (m)
$b_{z2}$	
$b_{z1moy}$	Largeur moyenne de la dent statorique (m)
$b_{z2}$	Largeur de la dent rotorique (m)
$b_{z1}$	Largeur de la dent statorique (m)
$B_a$	Valeur de l'induction dans la culasse (T)
$B_j$	Valeur de l'induction dans le dos (T)
$B_{zmax}$	Valeur maximale de l'induction dans les dents du stator (T)
$B_{zmin}$	Valeur minimale de l'induction dans les dents du stator (T)
$B_\delta$	Induction dans l'entrefer (T)

## Liste des symboles

---

$C_n$	Couple nominal (N .m)
$\cos \varphi$	Facteur de puissance
$\cos \varphi_0$	Facteur de puissance à vide
$D$	Diamètre intérieur du stator (diamètre d'alésage) (m)
$D_2$	Diamètre extérieur du rotor (m)
$D_a$	Diamètre extérieur du stator (m)
$D_{anmoy}$	Diamètre moyen des anneaux (m)
$D_{ar}$	Diamètre intérieur du rotor (m)
$dis$	Valeur moyenne du diamètre du conducteur effectif avec isolation (m)
$D_j$	Diamètre noyau du rotor (m)
$f$	Fréquence du courant (Hz)
$F_a$	Force magnétomotrice de la culasse (At)
$F_j$	Force magnétomotrice du noyau (At)
$F_{z1}$	Force magnétomotrice pour les dents du stator (At)
$F_{z2}$	Force magnétisante pour les dents du rotor (At)
$F_{\delta}$	Force magnétisante dans l'entrefer (At)
$F_{\epsilon}$	Force magnétisante totale du circuit magnétique (At)
$g$	Glissement
$h$	Hauteur de l'axe de rotation (m)
$h'_1$	Hauteur réelle de l'encoche trapézoïdale du stator (m)
$h_a$	Hauteur du culasse (m)
$H_a$	Champs magnétiques dans la culasse (A /m)
$h_{en}$	Hauteur de l'encoche statorique (m)
$h_f$	Epaisseur de l'isthme des dents de l'encoche du rotor (m)
$H_j$	Champs magnétiques dans le dos (A /m)

## Liste des symboles

---

$h'_j$	Hauteur de la culasse (m)
$h_r$	Hauteur de la barre rotorique (m)
$H_{z1}$	Champ magnétique dans la dent statorique (A /m)
$h_{z1}$	Hauteur de la dent statorique (m)
$h_{z2}$	Hauteur de la dent rotorique (m)
$H_{z2}$	Champ magnétique dans la dent rotorique (A /m)
$I_1$	Courant du stator (A)
$I_{1nom}$	Courant nominal du stator (A)
$I_2$	Courant dans les barres de la cage du rotor (A)
$I_{an}$	Courant dans les anneaux de la cage d'écureuil (A)
$I_o$	Courant à vide (A)
IP	Degré de protection
$I_\mu$	Courant d'aimntation ( (A)
$I_\mu^*$	Valeur relative du courant d'aimntation
$J_1$	Densité du courant dans l'enroulement statorique (A/m <sup>2</sup> )
$J_2$	Densité du courant dans une barre (A/m <sup>2</sup> )
$J_{an}$	Densité du courant dans l'anneau de la cage d'écureuil (A/m <sup>2</sup> )
$k_{ar}$	Rapport entre $D_{ar}$ et $D_a$
$K_{B1}$	Facteur d'enroulement
$k_{b1}$	Facteur d'enroulement statorique
$K_{b2}$	Facteur d'enroulement rotorique
$K_d$	Facteur de distribution de l'enroulement
$kd_a, kd_z$	Coefficients tenant compte de l'influence de la répartition du flux dans le circuit magnétique
$K_e$	Rapport de la F.E.M de l'enroulement et la tension nominale (E1/ V1)

## Liste des symboles

---

$k_f$	Coefficient de remplissage du circuit magnétique du stator en acier
$k_{fr}$	Coefficient de la partie frontale de la bobine
$k_i$	Rapport de transformation du courant
$K_{scm}$	Coefficient de saturation du circuit magnétique
$k_x$	Coefficient de diminution de l'inductance rotorique
$k_\delta$	Facteur de Carter
$l_l$	Longueur du circuit magnétique du stator (m)
$L_1$	longueur totale des conducteurs (m)
$l_2$	Longueur du circuit magnétique du rotor (m)
$L_a$	Longueur du culasse (m)
$l_{ac2}$	Longueur du circuit magnétique du rotor (m)
$l_{fr1}$	Longueur de la partie frontale (m)
$L_j$	Longueur du noyau (m)
$l_{moy1}$	Longueur d'une spire (m)
$l_{s1}$	Longueur de la sortie des parties frontales de la bobine (m)
$l_\delta$	Longueur virtuelle de l'induit (m)
$m_1$	Nombre de phase statorique
$m_2$	Nombre de phase rotorique
$n_{\acute{e}l}$	Nombre de conducteurs effectifs en parallèle
$N$	Vitesse de rotation synchrone (tr / min)
$p$	Nombre de paire de pôles
$P'$	Puissance apparente théorique (VA)
$P_{1,050}$	Pertes spécifiques selon le type d'acier (W/kg )
$P_2$	Puissance sur l'arbre (W)
$P_{el\ 0}$	Pertes électriques dans le stator (fonctionnement à vide) (W)

## Liste des symboles

---

$P_{fsup}$	Somme des pertes supplémentaires dans l'acier (W)
$P_{méc}$	Pertes mécaniques (W)
$P_{pul1}$	Pertes de pulsation dans les dents du stator (W)
$P_{pul2}$	Pertes de pulsation dans les dents du rotor (W)
$P_{sn}$	Pertes supplémentaires (W)
$P_{sup1}$	Pertes superficielles (w)
$p_{sup2}$	Pertes superficielles (w)
$q_1$	Nombre d'encoches par pôle et par phase statorique
$q_2$	Nombre d'encoches par pôle et par phase rotorique
$r_1$	Résistance active de phase de l'enroulement statorique ( $\Omega$ )
$r_{12}$	Résistance de magnétisation ( $\Omega$ )
$r_1^*$	Valeur relative de $r_1$
$r_2$	Résistance active de phase de l'enroulement rotorique ( $\Omega$ )
$r_2'$	Valeur de $r_2$ ramenée au stator ( $\Omega$ )
$r_b$	Résistance des barres
$r_{éan}$	Résistance des anneaux
$S_{an}$	Section d'anneau ( $m^2$ )
$S_b$	Section de barre ( $m^2$ )
$S_{ef}$	Section du conducteur effective ( $m^2$ )
$S_{él}$	Surface de la section transversale du conducteur effectif sans isolation ( $m^2$ )
$S'_{en}$	Surface d'une coupe transversale d'une encoche trapézoïdale ( $m^2$ )
$S_{is}$	Section de l'isolant dans une encoche statorique ( $m^2$ )
$t_1$	Pas dentaire du stator (m)
$t_{1max}$	Pas dentaire maximal du stator (m)
$t_{1min}$	Pas dentaire minimal du stator (m)

## Liste des symboles

---

$t_2$	Pas dentaire du rotor (m)
V	Tension nominale (Volt)
$V_{1nom}$	Tension nominale (Volt)
$V_{cc}$	Tension court-circuit (volt)
$U_{en}$	Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche
$W_1$	Nombre de spire statorique
$W_2$	Nombre de spire rotorique
$x_1$	Réactance de la phase de l'enroulement statorique ( $\Omega$ )
$x_{12}$	Réactance de magnétisation ( $\Omega$ )
$x_{12}^*$	Valeur relative de $x_{12}$
$x_2$	Réactance de la phase de l'enroulement rotorique ( $\Omega$ )
$x'_2$	Valeur de $x_2$ ramenée au stator ( $\Omega$ )
$Z_1$	Nombre d'encoche statorique
$Z_{1max}$	Nombre maximal d'encoche du stator
$Z_{1min}$	Nombre minimal d'encoche du stator
$Z_2$	Nombre d'encoche rotorique
$\alpha_i$	Coefficient de recouvrement polaire
$\beta_1$	Coefficient déterminé selon le type d'acier
$\delta$	Longueur de l'entrefer (m)
$\lambda$	Rapport du raccourcissement
$\lambda_{d1}$	Coefficient de la conductibilité magnétique de dispersion différentielle pour les enroulements statorique
$\lambda_{d2}$	Coefficient de la conductibilité magnétique de dispersion différentielle pour les enroulements rotorique
$\lambda_{en1}$	Coefficient de la conductibilité magnétique de dispersion de l'encoche de l'enroulement statorique

## Liste des symboles

---

$\lambda_{en2}$	Coefficient de la conductibilité magnétique de dispersion de l'encoche de l'enroulement rotorique
$\lambda_{fr1}$	Coefficient de la conductibilité magnétique de dispersion frontale de l'enroulement statorique
$\lambda_{fr2}$	Coefficient de la conductibilité magnétique de dispersion frontale de l'enroulement rotorique
$\mu_0$	Perméabilité du l'air considéré (H /m)
$\alpha$	Coefficient de recouvrement polaire
$\rho$	Résistivité du matériau considéré (Ohm.m)
$\rho_{an\theta}$	Résistivité spécifique du matériau de l'anneau
$\rho_{b\theta}$	Résistivité spécifique du matériau des barres (Ohm.m)
$\sigma_1$	Coefficient de correction (de Blondel)
$\vartheta_i$	Facteur d'inclinaison
$\eta$	Rendement
$\Phi$	Flux sous un pôle (Wb)
$\tau$	Pas polaire (m)

## *Liste des Figures*

### ***Chapitre I***

<b>Fig.I.1</b>	Constitution générale d'une machine asynchrone	4
<b>Fig. I.2</b>	Tôle de stator	5
<b>Fig. I.3</b>	Stator d'un moteur asynchrone	5
<b>Fig. I.4</b>	(a) - Encoche ouvert et (b) – Encoche semi-ouvert	5
<b>Fig. I.5</b>	Tôles découpées par sections	6
<b>Fig. I.6</b>	La disposition en biais des barres rotoriques	7
<b>Fig. I.7</b>	Rotor bobiné	7
<b>Fig. I.8</b>	Différentes formes d'encoche profondes	8
<b>Fig. I.9</b>	Formes d'encoche pour différentes classes de moteur	9
<b>Fig. I.10</b>	Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur.	9

### ***Chapitre II :***

<b>Fig.II .1</b>	Enroulement statorique d'une phase d'un moteur asynchrone à 4 pôles	13
<b>Fig. II .2</b>	Hauteur de l'axe et diamètre extérieur du stator	14
<b>Fig. II .3</b>	variation de la courbe du champ provoqué par la denture	15
<b>Fig. II .4</b>	configuration statorique pour un pas dentaire	19

### ***Chapitre III :***

<b>Fig. III .1</b>	Les encoches piriformes a)-semi-fermée ; b)-fermée	25
<b>Fig. III .2</b>	Dimension des anneaux	26
<b>Fig. III .3</b>	encoches profondes	30
<b>Fig. III .4</b>	Configuration des encoches rotoriques	31
<b>Fig. III .5</b>	Schéma simplifié d'un moteur à bague	32
<b>Fig. III .6</b>	Configuration des encoches rotoriques	33

### ***Chapitre IV :***

<b>Fig.IV. 1</b>	encoche trapézoïdale	38
<b>Fig.IV. 2</b>	encoche ovale	40
<b>Fig.IV. 3</b>	encoche profonde	41
<b>Fig.IV. 4</b>	encoche rectangulaire	42

### ***Chapitre V :***

<b>Fig.V.1</b>	Courant et Couple de démarrage pour (rotor à cage)	60
<b>Fig.V. 2</b>	Courant et Couple de démarrage pour (encoches profondes)	63
<b>Fig.V. 3</b>	Courant et Couple de démarrage pour ( rotor bobiné)	66
<b>Fig.V. 4</b>	Courant de démarrage de la MAS à différent rotor	67
<b>Fig.V. 5</b>	Couple de démarrage de la MAS à différent rotor	67
<b>Fig.V. 6</b>	Courant de démarrage pour différent résistance rotorique	69
<b>Fig.V. 7</b>	Couple de démarrage pour différent résistance rotorique	69

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau. VI.1</b>	les coefficients $k_{fr}, k_s$	37
<b>Tableau.VI.2</b>	la résistance spécifique du matériaux de l'enroulement $\rho$	37
<b>Tableau.V.1</b>	caractéristiques de fonctionnement moteur asynchrone a rotor à cage.	58
<b>Tableau.V.2</b>	caractéristiques de démarrage moteur asynchrone a rotor à cage.	59
<b>Tableau.V.3</b>	caractéristique de fonctionnement de moteur asynchrone a rotor a encoche profondes.	61
<b>Tableau.V.4</b>	caractéristiques de démarrage moteur asynchrone a rotor à encoches profondes.	62
<b>Tableau.V.5</b>	caractéristique de fonctionnement de moteur asynchrone a rotor bobiné.	64
<b>Tableau.V.6</b>	caractéristiques de démarrage moteur asynchrone a rotor bobiné	65

## Sommaire

*Liste des Symboles* ..... .

Introduction générale ..... 1

### Chapitre I: Aspect Theorique

I.1. Constitution..... 4

I.2. Stator ..... 4

I.3. Rotor ..... 6

I.3.1. Rotor à cage ..... 6

I.3.2. Rotor bobiné ..... 7

I.4. Moteur à rotor encoches profondes..... 7

I.5. Influence de l'ouverture et du pont d'encoche sur les caractéristiques machine 8

I.6. Classification des moteurs à cage d'écureuil..... 8

I.7. Bobinage ..... 9

I.8. METHODES DE DIMENSIONNEMENT ET CALCUL DES MACHINES ... 9

I.8.1. Première Méthode..... 10

I.8.2. Deuxième Méthode..... 10

I.8.3. Troisième Méthode ..... 10

I.8.4. Méthode Classique « calcul de LIWSCHITZ »..... 11

### Chapitre II: Dimensionnement du stator

II.1 Introduction : ..... 13

II.2 Données techniques nécessaires pour la conception : ..... 13

II.3 Choix des dimensions principales : ..... 14

II.3.1 Le nombre du pair de pôles..... 14

II.3.2 La hauteur préalable de l'axe de rotation  $h = f(P2, 2p)$ ..... 14

II.3.3 Le diamètre intérieur ..... 14

II.3.4 Le pas polaire ..... 15

II.3.5 Puissance apparente théorique ..... 15

II.3.6 Coefficient de recouvrement polaire ..... 15

II.3.7 La longueur de calcul de l'entrefer : ..... 16

II.3.8 Coefficient géométrique de la machine ..... 16

II.4 Calcul de nombre d'encoches statoriques, de nombre de conducteurs par encoche au stator et de la section du conducteur de l'enroulement statorique ..... 16

II.4.1	Le pas dentaire statorique.....	16
II.4.2	Les nombres d'encoche possibles.....	16
II.4.3	Le pas dentaire .....	16
II.4.4	Calcul de l'enroulement statorique : .....	17
II.4.5	Le nombre des spires d'une phase du stator .....	17
II.4.6	Valeur exacte de la charge linéaire.....	17
II.4.7	Le flux magnétique dans l'entrefer .....	18
II.4.8	L'induction du champ magnétique dans l'entrefer .....	18
II.4.9	Densité du courant dans l'enroulement statorique.....	18
II.4.10	La section du fil efficace .....	18
II.5	Le calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer : .....	19
II.5.1	Valeurs de l'induction.....	19
II.5.2	Largeur de la dent statorique .....	19
II.5.3	Hauteur de la culasse du stator.....	19
II.5.4	Dimensionnement de l'encoche statorique .....	20
II.5.5	Surface d'une coupe transversale d'une encoche trapézoïdale .....	20
II.5.6	Le coefficient de remplissage de l'encoche .....	21
II.5.7	On calcule la largeur et la hauteur de calcul de dent .....	21

### Chapitre III : Calcul différent rotor

III.1	Dimensionnement du rotor à cage : .....	23
III.1.1	Calcul du rotor en court-circuit : .....	23
III.1.1.1	Entrefer .....	23
III.1.1.2	Le nombre des encoches du rotor .....	23
III.1.1.3	Le diamètre extérieur.....	23
III.1.1.4	La longueur du noyau .....	23
III.1.1.5	Le pas dentaire rotorique .....	24
III.1.1.6	Le diamètre de l'arbre préalable .....	24
III.1.1.7	Le courant dans la barre .....	24
III.1.1.8	La section de la barre.....	24
III.1.1.9	Les encoches rotoriques .....	25
III.1.1.10	largeur admissible de la dent rotorique .....	25
III.1.1.11	dimensions de l'encoche rotorique.....	25
III.1.1.12	La hauteur totale de l'encoche .....	26
III.1.1.13	La section de la barre(valeur exacte).....	26

III.1.1.14	densité du courant dans une barre .....	26
III.1.1.15	La section des anneaux circuitage.....	26
III.1.2	Calcul du courant d’aimantation ( calcul du circuit magnétique ) .....	27
III.1.2.1	Les valeurs exactes des inductions .....	27
III.1.2.2	Force magnétisante .....	28
III.1.2.2.1	Force magnétisante de l’entrefer .....	28
III.1.2.2.2	Force magnétisante de la zone dentaire du stator .....	28
III.1.2.2.3	Force magnétisante de la zone dentaire du rotor .....	28
III.1.2.2.4	Le coefficient de saturation de la zone dentaire .....	28
III.1.2.2.5	Force magnétomotrice de la culasse et du noyau .....	29
III.1.2.2.6	Force magnétisante totale du circuit magnétique.....	29
III.1.2.3	Coefficient de saturation du circuit magnétique .....	29
III.1.2.4	Le courant d’aimantation.....	29
III.1.2.5	La valeur relative du courant.....	30
III.2	dimensionnement du rotor à encoches profondes : .....	30
III.2.1.	L’entrefer .....	31
III.2.2.	La section de la barre.....	31
III.3	dimensionnement du rotor bobiné : .....	31
III.3.1	Calcul de L’entrefer .....	32
III.3.2	La longueur du noyau.....	32
III.3.3	Nombre d’encoches par pôle et par phase.....	32
III.3.4	Le nombre des spires d’une phase du stator .....	32
III.3.5	La tension de court –circuit.....	33
III.3.6	Le courant de phase rotorique préalablement .....	33
III.3.7	La section effective des conducteurs de l’enroulement rotorique .....	33
<b>Chapitre VI : caractéristiques de fonctionnement et de démarrage</b>		
VI.1.	Principe de fonctionnement d’un moteur asynchrone .....	36
VI.2.	Les paramètres du régime de fonctionnement.....	36
VI.2.1.	Les paramètres statorique.....	36
VI.2.1.1.	La résistance d’une phase statorique.....	36
VI.2.1.2.	la valeur relative .....	37
VI.2.1.3.	Réactance de fuite statorique .....	37
VI.2.1.4.	la perméance équivalente résultante.....	37
VI.2.2.	Les paramètres rotorique.....	39

VI.2.2.1.	<b>Rotor à cage</b> .....	39
VI.2.2.1.1.	<b>La résistance d'une phase rotorique</b> .....	39
VI.2.2.1.2.	<b>la résistance des deux éléments de l'anneau</b> .....	39
VI.2.2.1.3.	<b>Le coefficient de réduction de la résistance de la cage d'écureuil</b> .....	39
VI.2.2.1.4.	<b>La résistance réduite</b> .....	39
VI.2.2.1.5.	<b>La valeur relative</b> .....	39
VI.2.2.1.6.	<b>Réactance de fuite du rotor</b> .....	39
VI.2.2.1.7.	<b>La perméance équivalente d'encoche</b> .....	40
VI.2.2.1.8.	<b>La perméance équivalente différentielle encoche rotorique</b> .....	40
VI.2.2.1.9.	<b>La perméance des parties frontales de l'enroulement rotorique coulé</b> .....	40
VI.2.2.1.10.	<b>La réactance rotorique réduite à l'enroulement statorique</b> .....	40
VI.2.2.2.	<b>Rotor à encoches profondes</b> .....	41
VI.2.2.3.	<b>Rotor bobiné</b> .....	41
VI.2.2.3.1.	<b>Le coefficient de réduction de la résistance de la bague :</b> .....	41
VI.2.2.3.2.	<b>La réactance de fuite rotorique :</b> .....	41
VI.2.2.3.3.	<b>La perméance équivalente d'encoche :</b> .....	41
VI.3.	<b>Calcul des pertes</b> .....	42
VI.3.1.	<b>Pertes principales dans l'acier du stator</b> .....	42
VI.3.2.	<b>Pertes superficielles dans les dents du rotor et du stator par rapport</b> .....	43
VI.3.3.	<b>Les pertes superficielles totales</b> .....	43
VI.3.4.	<b>Pertes pulsatoires dans les dents statorique et rotorique</b> .....	43
VI.3.5.	<b>Pertes totales supplémentaires dans l'acier</b> .....	43
VI.3.6.	<b>Pertes mécanique et les pertes par ventilation</b> .....	43
VI.3.7.	<b>Pertes supplémentaires en régime nominale :</b> .....	44
VI.3.8.	<b>Pertes électrique à vide :</b> .....	44
VI.3.9.	<b>Le courant à vide:</b> .....	44
VI.3.10.	<b>Facteur de puissance à vide :</b> .....	44
VI.4.	<b>Calcul des caractéristiques de fonctionnement</b> .....	44
VI.5.	<b>Calcul des caractéristiques de démarrage :</b> .....	45
VI.5.1.	<b>La hauteur des barres réduite</b> .....	45
VI.5.2.	<b>Hauteur réelle des barres</b> .....	45
VI.5.3.	<b>Le coefficient d'augmentation de la résistance rotorique</b> .....	46
VI.5.4.	<b>La résistance rotorique</b> .....	46
VI.5.5.	<b>Inductance rotorique :</b> .....	46

VI.5.6.	Le courant rotorique sans tenir compte de la saturation :.....	46
VI.5.7.	Fmm moyenne par rapport à une couche statorique : .....	46
VI.5.8.	L'inductance fictive de fuite dans : .....	46
VI.5.9.	Le coefficient de permanence de la fuite de l'encoche.....	46
VI.5.10.	L'abaissement de la perméance de la fuite de l'encoche .....	46
VI.5.11.	Le coefficient de la permanence de fuite différentielle statorique.....	47
VI.5.12.	L'inductance statorique.....	47
VI.5.13.	Pour les valeurs rotorique .....	47
VI.5.14.	L'inductance réduite rotorique.....	47
VI.5.15.	L'inductance mutuelle dans le régime de démarrage.....	47
VI.5.16.	Le courant rotorique.....	47

### Chapitre V : Résultats et étude Comparative

V.1.	Procédure de dimensionnement .....	49
V.2.	Résultats de dimensionnement .....	49
V.3.	Le choix des dimensions principe.....	49
V.4.	Le calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer .....	51
V.5.	Calcul du rotor en court-circuit :.....	51
V.6.	Calcul du circuit magnétique: .....	53
V.7.	Les paramètres des régimes de fonctionnement .....	54
V.7.1.	Les paramètres statorique.....	54
V.7.2.	Les paramètres rotorique.....	55
V.7.3.	Calcul des pertes.....	56
Conclusion .....		
Bibliographie.....		
Resumé.....		

### Introduction générale

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus important dans l'industrie. Parce qu'il représente au mois 80% des moteurs électriques utilisés couramment.

Le choix judicieux de la puissance du moteur a aussi une très grande importance . Car il influe considérablement sur les investissements et les frais d'exploitation. L'utilisation d'un moteur de puissance insuffisante peut perturber le fonctionnement du mécanisme entraîné. Diminuer son rendement. Et provoquer des pannes, d'autre part. L'utilisation d'un moteur de très grande puissance diminue l'indice économique de l'installation. Le rend plus couteux, et conduit à des grandes pertes d'énergie.

Les moteurs asynchrone ne diffèrent que par le type construction du rotor. On distingue quatre types qui sont : rotor à bague, rotor à cage, rotor à encoches profonde, et le rotor à double cage.

Le rotor à cage est le plus répondu en pratique à cause des avantages suivants :

Il est robuste et son entretien est très limité. Son fonctionnement ne génère pas d'étincelles, si on compare avec le moteur à bagues.

Fonctionnement direct sur le secteur alternatif. C'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats. Comme le collecteur du moteur à courant continu. Et n'utilise pas de contacts glissants comme le moteur synchrone.

Sa vitesse varie peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement en général. ne dépasse pas quelques dizaines de la vitesse à vide, et la possibilité de la varier dans de larges limites.

Dans ce mémoire on s'intéresse au calcul du moteur à induction dit à encoches ouverte à l'aide d'un outil informatique en vue de son optimisation afin de satisfaire un cahier de charge. Il présente un cheminement qui discerne un calcul analytique. Ce dernier il utilise la méthode classique de LIWSCHITZ pour le dimensionnement et l'obtention des différents paramètres géométriques et électriques ainsi que les caractéristiques estimées suite aux contraintes imposées par le cahier des charges.

Le démarrage ne pose pas de problème pour les unités de petite puissance. Il est direct, par contre pour les moteurs de forte puissance il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant très élevé de 4 à 10 fois plus grand que le courant nominal ce courant représente brève, donc il est nécessaire de réduire le courant de démarrage.

Malgré l'amélioration de la caractéristique de démarrage du moteur à cage, l'appel du courant de démarrage demeure un problème général.

Avec l'augmentation de la puissance des réseaux, l'amélioration de démarrage, par suite de l'utilisation du déplacement du courant (moteur à double cage ou encoche profondes) et l'introduction systématique de la commande individuelle des différentes machines d'un atelier, ont fait que le démarrage des moteurs en court-circuit n'est plus un problème général.

En revanche, le rhéostat de démarrage des moteurs à rotor bobiné permet d'ajuster l'appel de courant de démarrage à la valeur strictement nécessaire pour les puissances supérieures.

Pour les raisons cités précédemment, on va étudier et comparer les caractéristiques électrodynamiques (couple et courant de démarrage) d'un moteur asynchrone de 37kw associe aux trois types de rotors cités précédemment.

Le calcul du stator fera l'objet du « chapitre II » dont lequel on détermine les dimensions principales du circuit magnétique l'enroulement statorique.

Le « chapitre III », on a calculé pour chaque type de rotor, la zone de denture rotorique, les enroulements rotoriques, ainsi que le circuit magnétique.

Le « chapitre VI » est consacré au calcul du différent rotor ces caractéristiques des fonctionnements ainsi que ces caractéristiques de démarrage.

Les résultats obtenues des différents rotors et leur commentaires feront l'Object du « chapitre V », et il nous restera en guise de conclusion, à en tirer les enseignements et expliquer comment nous envisagerons la poursuite de ce travail.

**Chapitre I :**  
**Aspect Théorique**

## I.1. Constitution

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend deux parties principales, un stator et un rotor, (Fig .I.1), Le rotor est monté sur un axe de rotation. Représente l'ensemble des éléments constituant de la machine asynchrone, ou l'on distingue clairement les deux parties principales.[1]

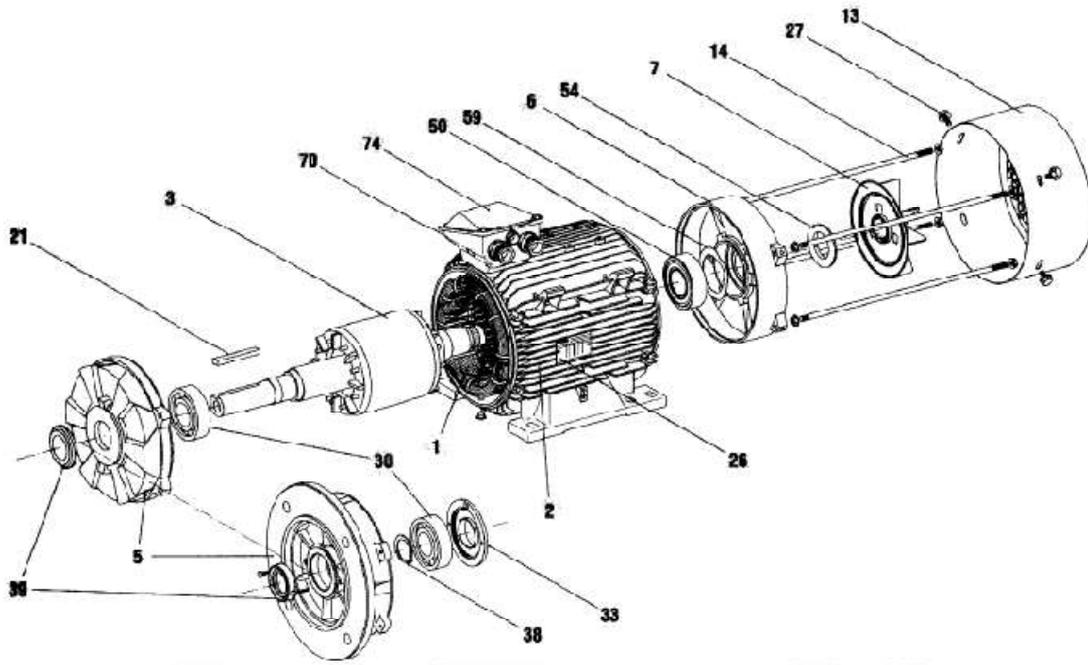


Fig.I.1: Constitution générale d'une machine asynchrone

- |  |  |
|--|--|
| 1 : Stator bobiné                        | 2 : Carter                                   |
| 3 : Rotor                                | 5 : Flasque côté accouplement                |
| 6 : Flasque arrière                      | 7 : Ventilateur                              |
| 13 : Capot de ventilation                | 14 : Tiges de montage                        |
| 21 : Clavette                            | 26 : Plaque signalétique                     |
| 27 : Vis de fixation du capot            | 30 : Roulement côté accouplement             |
| 33 : Chapeau intérieur côté accouplement | 38 : Circlips de roulement côté accouplement |
| 39 : Joint côté accouplement             | 50 : Roulement arrière                       |
| 54 : Joint arrière                       | 59 : Rondelle de précharge                   |
| 70 : Corps de boîte à bornes             | 74 : Couvercle de boîte à bornes [2, 3].     |

## I.2. Stator

Son circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées (Fig. I.2), faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0.35 et 0.50mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole

habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties (Fig. I.3) : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobine. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, le retour des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique. [2]

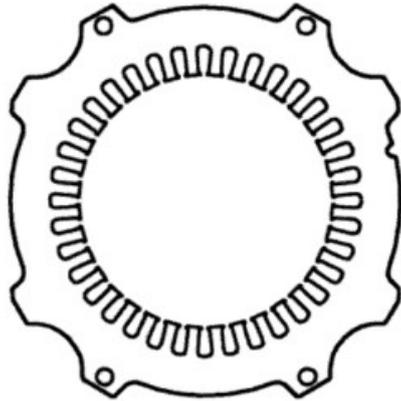


Fig. I.2 Tôle de stator

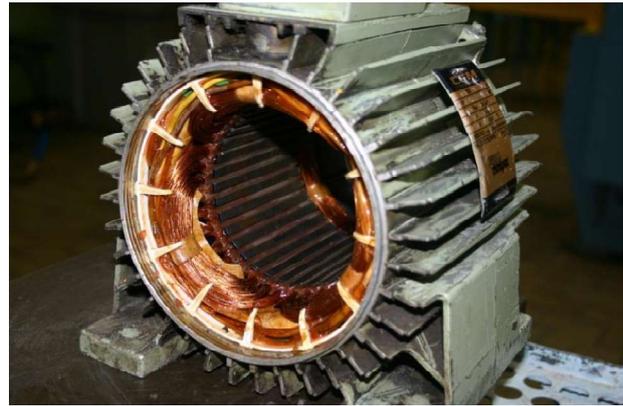


Fig. I.3 Stator d'un moteur asynchrone

Pour utiliser le moteur sous plusieurs tensions différentes, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes qu'on peut relier en série ou en parallèle. Dans ce dernier cas on s'y réfère comme des chemins en parallèle.[2]

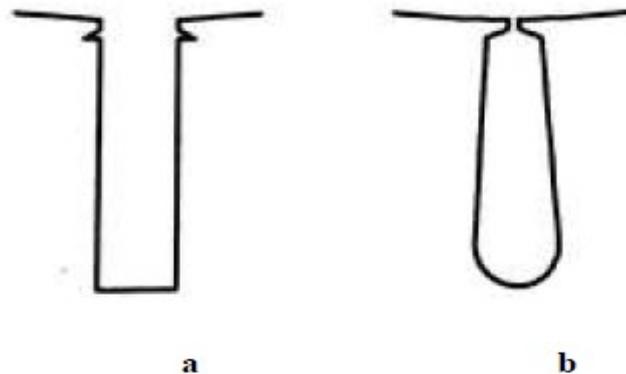


Fig I.4 : (a) - Encoche ouvert et (b) – Encoche semi-ouvert

De ce classement on peut déduire que le choix d'une encoche appropriée nous aide à donner au moteur les caractéristiques souhaitées. Il existe cependant des configurations plus complexes que celles que nous venons de voir [2].

Les diverses formes d'encoches sont de deux types génériques : ouvert et semi-ouvert (Fig. I.4). Les encoches de type ouvert sont habituellement de même largeur sur toute leur profondeur ; par conséquent, les dents sont de forme trapézoïdale avec un étranglement près de l'entrefer pour insérer une clavette. Les encoches de type semi ouvert sont généralement de forme trapézoïdale, ce qui permet d'usiner des dents à parois parallèles. L'ouverture laissée par ce deuxième type d'encoche est réduite à une largeur minimale mais permet toutefois qu'on y insère des conducteurs de faible diamètre. Pour des longueurs de stator (et de rotor) inférieures à 200 mm, on ne subdivise pas le paquet de tôles. Au-delà de 200 ou 250 mm. [1]

### I.3. Rotor

Le rotor est fait, comme le stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un noyau (Fig I. 5) .[1]



Fig. I.5 Tôles découpées par sections

#### I.3.1. Rotor à cage

Dans ce type des rotors, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par un coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor.

Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

Pour former le rotor, on empile généralement les laminations de façon que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur (Fig. I.5). Cette disposition a pour effet de réduire considérablement le bruit et les sous harmoniques durant

l'accélération et de donner un démarrage et une accélération plus uniforme, en plus d'éviter l'accrochage et les oscillations à faible charge.[3]

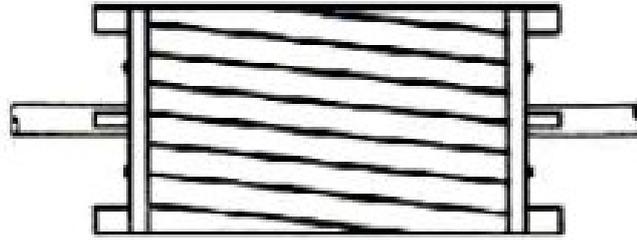


Fig. I.6. La disposition en biais des barres rotoriques

### I.3.2. Rotor bobiné

Les encoches présentes à la périphérie du rotor contiennent un enroulement similaire à celui du stator. Souvent le bobinage rotoriques est couplé en étoile, il est accessible de l'extérieur grâce à un système de bagues en cuivre isolées et solidaires du rotor sur lesquelles frottent des balais en graphite. Ce système permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur asynchrone.

Ce type de moteur peut fournir un couple de démarrage allant jusqu'à 2,5 fois plus grand que le couple nominal et peut faire un appel de courant arrivant à 2,5 fois plus grand que le courant nominal .

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage sont simples à construire, robuste, fiable, de coût plus faible et ayant un rendement plus important [1]



Fig. I.7 Rotor bobiné

### I.4. Moteur à rotor encoches profondes

Le principe de fonctionnement des moteurs à encoches profondes est basé sur un phénomène électromagnétique, à savoir l'effet pelliculaire. A fréquence variable, cet effet

a tendance à laisser le courant circuler qu'en surface des conducteurs. Pour que cet effet soit sensible il faut que le moteur ait des encoches suffisamment profondes. [1]

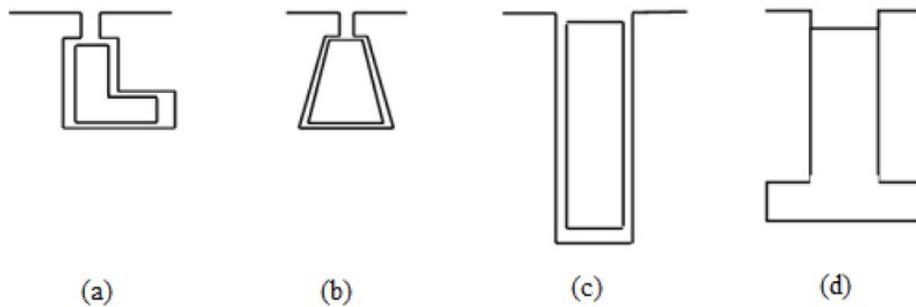


Fig. I.8 Différentes formes d'encoche profondes

### I.5. Influence de l'ouverture et du pont d'encoche sur les caractéristiques de la machine

L'ouverture d'encoche a une grande influence sur les caractéristiques de la machine, elle augmente le coefficient de carter, donc augmente le courant magnétisant, ce qui réduit le facteur de puissance et produit des pertes par pulsation du flux dans les dents, ce qui engendre une diminution du rendement. L'inconvénient du pont d'encoche réside dans la faite qu'il permet le passage du flux supplémentaire de fuite, ce qui engendre une réactance dite réactance de pont d'encoche [1].

### I.6. Classification des moteurs à cage d'écureuil

Selon le critère de la NEMA ([www.nema.org](http://www.nema.org)), on peut classier les moteurs à cage d'écureuil selon la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est grand. [3]

Selon NEMA, on peut classier le moteur asynchrone comme suit :

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

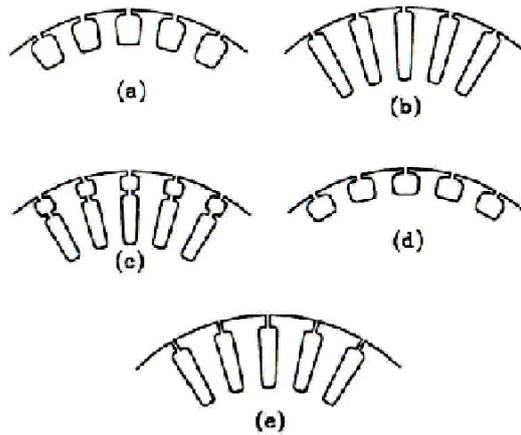


Fig I.9 : Formes d'encoche pour différentes classes de moteur.

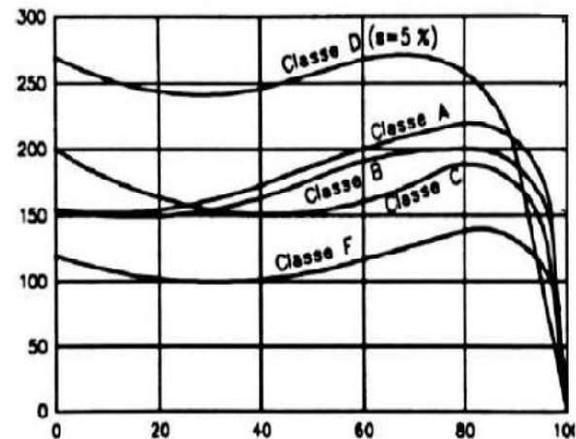


Fig I.10 : Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur.

### I.7. Bobinage

Trois types de bobinage de stator sont habituellement utilisés: l'imbriqué, le concentrique et l'ondulé, chacun d'entre eux présentant ses propres avantages. L'enroulement imbriqué s'utilise pour le bobinage de moteurs d'à partir quelques dizaines de kW. Dans les petits moteurs asynchrones on emploie généralement l'enroulement concentrique, surtout quand le bobinage est mécanisé. L'enroulement ondulé est indiqué pour les moteurs à bagues. Les enroulements imbriqué et ondulé sont le plus souvent à double couche, de manière que chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit forcément être pair.[5]

### I.8. METHODES DE DIMENSIONNEMENT ET CALCUL DES MACHINES ELECTRIQUES

Ils existent plusieurs méthodes pour le dimensionnement des machines électriques, c'est un domaine très large dont l'approche utilise beaucoup d'hypothèses.

Tout au long de notre recherche nous nous sommes trouvés devant plusieurs sortes de procédés propres à chacun des concepteurs, la méthode en général ne change pas puisque on remarque toujours un même cheminement qui autorise à dimensionner le stator suivi par un calcul du rotor.

Les caractéristiques statiques et dynamiques sont calculées d'après les schémas équivalents de la machine.

Par la suite nous vous proposons une liste de quatre méthodes de calcul non exhaustives rencontrées dans notre recherche bibliographique.[4]

### **I.8.1. Première Méthode**

Cette méthode proposée par Marcel JUFER et Jean-Claude SABONNADIÈRE, repose sur le calcul en utilisant pour commencer les formules de dimensionnement du Fer statorique ensuite ils entament le calcul rotorique : Le dimensionnement du circuit magnétique, est basé sur les contraintes suivantes :

Imposer un niveau d'induction correspondant au coude de saturation de façon à limité les chutes de potentiel et les pertes fer, tout en diminuant le volume et la masse du fer ; puis définir ce niveau d'induction par la géométrie et le principe de conservation du flux magnétique.

Le diamètre d'alésage et la longueur active sont les dimensions caractéristiques du processus de dimensionnement. Mais le facteur clé associé est l'induction radiale dans l'entrefer, sa distribution sera admise sinusoïdale.[4]

### **I.8.2. Deuxième Méthode**

Cette deuxième méthode à caractère pédagogique utilisé à l'école polytechnique de MONREAL est une méthode à but didactique, La méthode suggérée offre une certaine marge de manœuvres, des compromis doivent être faits pour le choix de certains paramètres comme le diamètre d'alésage du moteur par exemple, le résultat obtenu doit quelquefois faire l'objet de changement afin de satisfaire les exigences visées, Cette méthode inclue aussi les dispersions due à la disposition en biais des encoches rotoriques.[4]

### **I.8.3. Troisième Méthode**

Cette procédure réuni le calcul et la conception assistée par ordinateur d'une machine à induction, et emprunte différentes phases de calcul suivant un ordre chronologique. Cette approche est basé sure le principe de conception de G.KOUSKOFF et LIWSCHITZ. Sauf qu'on impose les données géométriques d'une machine industrielle déjà existante, comme contraintes auxquelles nous devons nous soumettre. Les résultats numériques du calcul sont comparés avec ceux donnés par la méthode des essais classiques puis traités par une analyse dynamique simulée du comportement de la machine en vue de mettre au point la corrélation et la concordance de ces résultats de conception avec ceux délivrés par le constructeur du moteur à induction étudié.[4]

**I.8.4. Méthode Classique « calcul de LIWSCHITZ »**

Cette méthode sera développée dans les chapitres suivants, elle sera à la base de nos calculs lors du dimensionnement des machines. [4]

**Chapitre II :**  
**Dimensionnement**  
**Du Stator**

## II.1 Introduction :

Dans la construction des machines électriques, les propriétés électromagnétiques ne sont pas les seuls paramètres à prendre en considération, mais on cherche toujours à avoir une machine moins couteuse et rentable.

Le calcul d'une machine électrique passe d'abord par plusieurs exigences, à savoir, un cahier des charges bien déterminé, son régime de fonctionnement, sa forme constructive, les exigences de l'exploitation, le courant et le couple de démarrage.

Toutes les formules sont prises de [6]

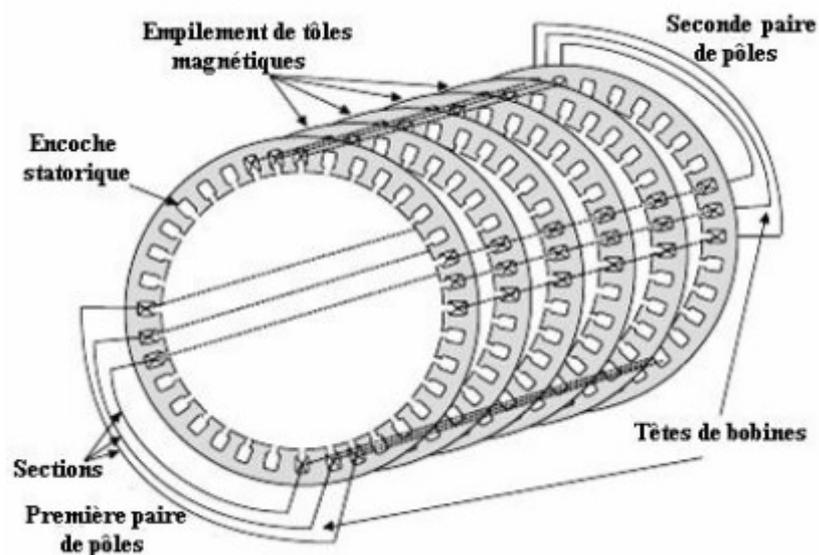


Fig. II.1 Enroulement statorique d'une phase d'un moteur asynchrone à 4 pôles

## II.2 Données techniques nécessaires pour la conception :

- Le nombre de phase :  $m_1=3$
- La puissance :  $P_2=37 \text{ Kw}$
- La tension :  $V=220/380 \text{ V}$
- La fréquence :  $f = 50 \text{ Hz}$
- La vitesse :  $N = 1500 \text{ tr/min}$
- Le mode de refroidissement :  $Ic \ 0141$
- Le type de protection :  $IP = 44$
- Classe d'isolation :  $F$
- Type d'acier :  $2013$
- Mode de montage :  $IM1001$

La machine est protégée à auto ventilation ou le ventilateur est fixe sur l'arbre . La machine est protégée contre la pénétration des corps solides supérieur à 12 mm et contre la pluie.

Pour construire une machine, on doit commencer d'abord par le calcul des dimensions principales puis les enroulements du circuit magnétique, en partant d'un modèle de base qui oriente tous les calculs.

### **II.3 Choix des dimensions principales :**

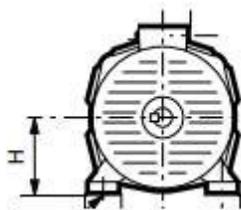
Le dimensionnement d'une machine électrique dépend, tant du point de vue magnétique que du point de vue électrique, d'une série de facteurs liés , les facteur qui influent sur le dimensionnement ne sont pas les même pour toutes les machines asynchrones, ce sont la capacité se surcharge ,le facteur de puissance et les conditions de démarrage qui deviennent déterminantes, il est indiqué de prendre pour base la puissance apparente.

#### **II.3.1 Le nombre du pair de pôles**

$$p = \frac{60}{N} \quad \text{II-1}$$

#### **II.3.2 La hauteur préalable de l'axe de rotation $h = f(P_2, 2p)$**

Cette hauteur est tirée de la Fig. 1 (voir l'annexe A). On prend du Tableau.1(voir l'annexe B) h standardisée la plus proche valeur inférieure par rapport à la hauteur



préalable.

Fig. II.2 Hauteur de l'axe et diamètre extérieur du stator

#### **II.3.3 Le diamètre intérieur**

Le diamètre extérieur  $D_a$  du stator est trouvé du Tableau. 2 (voir l'annexe B)

$$D = K_D \cdot D_a \quad \text{II-2}$$

Où  $K_D$  est le rapport entre  $D$  et  $D_e$  qui se détermine en fonction de nombre de pôles ( $2p$ ) suivant le Tableau. 3 (voir l'annexe B)

### II.3.4 Le pas polaire

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad \text{II-3}$$

### II.3.5 Puissance apparente théorique

$$p' = m.I.E = P_2 \frac{K_e}{\eta \cos \varphi} \quad \text{II-4}$$

Avec  $K_e = E/V$ : Le rapport de la F.E.M de l'enroulement et la tension nominale qui est approximativement déterminé suivant les courbes de  $k_e$  en fonction de  $D_a$  la Fig. 2 (voire l'annexe A)

Les valeurs approximatives du rendement  $\eta$  et du facteur  $\cos \varphi$  de puissance sont consultées à partir des graphiques des Fig. 3 (voire l'annexe A)

### II.3.6 Coefficient de recouvrement polaire

Pour la forme sinusoïdale, le coefficient de recouvrement polaire  $\alpha_i$  vaut  $2/\pi$ , mais l'augmentation de la saturation dans le fer provoque l'augmentation de ce coefficient. Il est donné par la formule suivante :

$$\alpha_i = 0,636 + 1,58(K_s - 1)^{2/3} = 0.7 \quad \text{II-5}$$

donc  $K_B = 1,09$

Répartition non sinusoïdale  $K_s = 1,25$

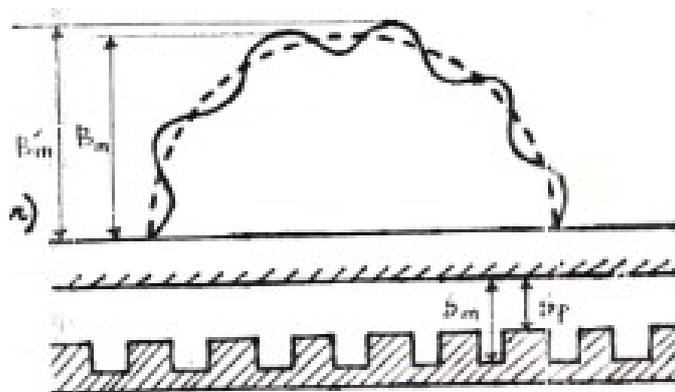


Fig. II.3 variation de la courbe du champ provoqué par la denture

### II.3.7 La longueur de calcul de l'entrefer :

$$l_{\delta} = \frac{2,02.p.P1.10^9}{\alpha_i.K_B.D^2.K_{B1}.A.B_{\delta}} \quad \text{II-6}$$

Ou Les charges électromagnétiques préalables A (A /m) et B $\delta$  (T) selon la Fig. 4 (voire l'annexe B)

Les coefficients des enroulements préalables :

$$K_{B1} = 0,91 \div 0,92 \text{ pour } 2p > 2 \text{ et à deux couches.}$$

### II.3.8 Coefficient géométrique de la machine

Les valeurs obtenues des dimensions principales D et li doivent être vérifiées d'après le rapport

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} \quad \text{II-7}$$

qui doit se trouver dans les limites données dans (Fig. 5) (voir l'annexe B)

## II.4 Calcul de nombre d'encoches statoriques, de nombre de conducteurs par encoche au stator et de la section du conducteur de l'enroulement statorique

Dans la phase du calcul préliminaire, une autre question est à considérer, il s'agit de, déterminer le nombre d'encoches Z<sub>1</sub> du stator et du nombre de spires N<sub>1</sub> de l'enroulement de phase du stator, de telle façon que la densité linéaire du courant A, et l'induction B $\delta$  dans l'entrefer soient plus proches des valeurs préalablement choisies au début du calcul et le nombre d'encoches assure la répartition régulière des bobines des enroulements.

### II.4.1 Le pas dentaire statorique

Les valeurs de t<sub>1</sub> du moteur asynchrone dont l'enroulement est à bobines simples sont données dans la (Fig. 6) (voir l'annexe B) pour l'enroulement monté fil à fil

### II.4.2 Les nombres d'encoche possibles

$$Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{1max}} \div Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{1min}} \quad \text{II-8}$$

### II.4.3 Le pas dentaire

Le pas dentaire est la distance entre les axes de deux encoches voisines, il est donné par la formule suivante :

$$t_1 = \frac{\pi D}{2p m_1 q_1} \quad \text{II-9}$$

Ce pas dentaire doit être dans les limites admissibles et supérieures à 6 mm.

On peut déterminer le nombre d'encoches par pôle et par phase  $q_1$  d'après le Tableau. 4 (voir l'annexe B) et puis on calcule le nombre d'encoches du stator

$$Z_1 = 2p \cdot q_1 \cdot m_1 \quad \text{II-10}$$

#### II.4.4 Calcul de l'enroulement statorique :

Le choix du nombre effectif des conducteurs dans l'encoche  $U_{en}$  se réalise comme suit :  $U_{en}$  doit être entier, et pour les enroulements à deux couches  $U_{en}$  est un nombre pair. Au début on choisit le nombre des conducteurs dans l'encoche à condition que les branches de l'enroulement de phase ne soient pas couplées en parallèle ( $a=1$ ) et on a :

$$U'_{en} = \frac{\pi D A}{I_{1no} Z_1} \quad \text{II-11}$$

Avec  $I_{1nom}$  : courant nominal du stator donné par

$$I_{1nom} = \frac{P_2}{m_1 V_{1nom} \eta \cos \varphi} \quad \text{II-12}$$

Si le nombre de branches couplés en parallèle de l'enroulement est "a" (le courant circulant dans chaque branche sera diminué a fois pour maintenir le courant nominal constant). Le nombre des conducteurs effectifs sera augmenté pour assurer la densité linéaire A constante, c'est-à-dire :

$$U_{en} = a_1 \cdot U'_{en} \quad \text{II-13}$$

La valeur  $U_{en}$  obtenue est arrondie à un nombre entier ou pair en fonction du type de l'enroulement. Les enroulements utilisés dans les machines asynchrones sont donnés par le Tableau. 5 (voir l'annexe B)

#### II.4.5 Le nombre des spires d'une phase du stator

$$W_1 = \frac{U_{en} \cdot Z_1}{2 a_1 m_1} \quad \text{II-14}$$

#### II.4.6 Valeur exacte de la charge linéaire

$$A = \frac{2 I_{1no} W_1 m_1}{\pi D} \quad \text{II-15}$$

Qui ne doit pas être différente de A préalable tenant compte des limites admissibles

#### II.4.7 Le flux magnétique dans l'entrefer

La densité de flux dans l'entrefer est donnée par la relation suivante :

$$\Phi = \frac{k_e U_{1nom}}{4K_B W_1 K_{B1} f_1} \quad \text{II-16}$$

#### II.4.8 L'induction du champ magnétique dans l'entrefer

La valeur exacte de l'induction dans l'entrefer est donnée comme suit :

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_\delta} = \frac{p \Phi}{D l_\delta} \quad \text{II-17}$$

Si  $B_\delta$  est hors des limites admissibles ( $B_\delta > B_{max}$  ou  $B_\delta < B_{min}$ ) plus que de 5% il faut changer Uen et répéter le calcul.

#### II.4.9 Densité du courant dans l'enroulement statorique

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} \quad \text{II-18}$$

La valeur de (AJ1) (A2/m3) est déterminée selon la Fig. 7 (voir l'annexe A)

#### II.4.10 La section du fil efficace

$$S_{1ef} = \frac{I_{1nom}}{\alpha_1 J_1} \quad \text{II-19}$$

On utilise les fils de bobinage ronds  $d \leq 1.4$  mm pour les enroulements destinés au bobinage automatique ( la hauteur de l'axe  $h \leq 160$  mm) pour les autres moteurs  $d \leq 1.7$  mm.

le diamètre, les sections des conducteurs standardisés produits en URSS ( $S_{\text{él}}$ , del et dis) Le tableau. 6 (voir l'annexe B)

Si la section de calcul  $S_{ef}$  est supérieure aux sections des fils indiqués on prend plusieurs fils élémentaires nél d'après la condition

$$S_{ef} = S_{\text{él}} \cdot n_{\text{él}} \quad \text{II-20}$$

On peut prendre  $n_{\text{él}} = 2 \div 3$  pour le bobinage automatique et  $n_{\text{él}} \leq 10$  pour les autres.

La section des fils rectangulaires doit être inférieure à 20 mm<sup>2</sup> si non, on prend plusieurs fils élémentaires de façon que  $S_{ef} \approx S_{\text{él}} \cdot n_{\text{él}}$

Si la section de calcul est très grande, on augmente le nombre des branches parallèles a l

Après avoir choisi le fil on calcule la densité du courant

$$J_1 = \frac{I_{1nom}}{\alpha_1 S_{\text{él n\acute{e}l}}} \quad \text{II-21}$$

**II.5 Le calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer :**

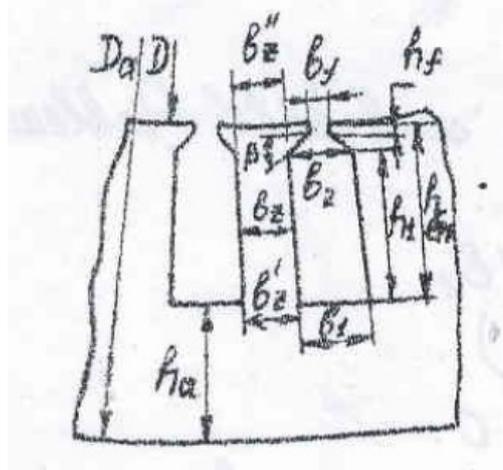


Fig. II.4 configuration statorique pour un pas dentaire

**II.5.1 Valeurs de l'induction**

On trouve préalablement Dans les dents du stator Bz1 et Dans la culasse du stator Ba (Tableau. 7) (voir l'annexe B)

**II.5.2 Largeur de la dent statorique**

calcul de la largeur de la dent statorique se base sur la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire. Elle est donnée par la relation suivante :

$$bz1 = \frac{B_{\delta} t_1 l_{\delta}}{B_{z1} l_1 k_r} \quad \text{II-22}$$

Ou

$$l_1 = l_{\delta} - l_c \quad \text{II-24}$$

$l_1$ : la longueur du noyau du stator

$l_c$ : la longueur sommaire des canaux de ventilation radiales

$k_r$ : le coefficient de remplissage du paquet du fer (Tableau. 8) (voir l'annexe B)

**II.5.3 Hauteur de la culasse du stator**

La hauteur de la culasse est donnée comme suit :

$$h_a = \frac{\phi}{2B_a l_1 k_r} \quad \text{II-23}$$

Pour

$$h = 50 \div 250 \text{ mm}, \quad U \leq 600 \text{ V acier 2013} \quad k_r = 0.97$$

### II.5.4 Dimensionnement de l'encoche statorique

On trouve  $hf = 0.5 \div 1$  mm en fonction de la puissance, Pour les moteurs ayant  $h \geq 160$  mm  $0.5 \leq hf \leq 1$  mm

On suppose

$$b_f = dis + (1.5 \div 2) \quad \text{II-25}$$

Ou dis : le diamètre d'un fils isolé. On calcule :

$$h_{en} = \frac{Da-D}{2} - h_a \quad \text{II-26}$$

$$b_1 = \frac{\pi(D+2h_{en})}{Z_1} - b_{z1} \quad \text{II-27}$$

$$b_2 = \frac{\pi(D+2h_f-b_f)-Z_1 b_{z1}}{Z_1-\pi} \quad \text{II-28}$$

$$h_1 = h_{en} - \left( h_f + \frac{b_2-b_f}{2} \right) \quad \text{II-29}$$

On calcule les dimensions de l'encoche réelle

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{en} \quad \text{II-30}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{en} \quad \text{II-31}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_{en} \quad \text{II-32}$$

Ou

$\Delta b_{en},(\text{mm})$	$\Delta h_{en},(\text{mm})$	pour $h,(\text{mm})$
0.2	0.2	160-250

### II.5.5 Surface d'une coupe transversale d'une encoche trapézoïdale

La surface d'une coupe transversale d'une encoche trapézoïdale est donnée comme suit :

$$S'_{en} = \frac{b'_1+b'_2}{2} h'_1 - S_{is} - S_{pe} \quad \text{II-33}$$

La section de l'isolant par rapport à la masse

$$S_{is} = b_{is} (2h_{en} + b_1 + b_2) \quad \text{II-34}$$

Ou  $b_{is}$  l'épaisseur de l'isolant à un seul côté (Tableau. 9) (voir l'annexe B)

pour  $h=180 \div 250$  mm

$$S_{pe} = 0,46 b_1 + 0,9 b_2 \quad \text{II-35}$$

Pour l'enroulement à une couche  $S_{pe}=0$ .

### II.5.6 Le coefficient de remplissage de l'encoche

$$k_r = \frac{d_{is}^2 U'_{en} \cdot n_{\text{él}}}{S_{en}} \quad \text{II-36}$$

Ou  $k_r = 0.7 \div 0.72$  pour le bobinage automatique

$k_r = 0.7 \div 0.75$  pour le bobinage manuel

Si le calcul de  $k_r$  est inférieur aux valeurs indiquées, on augmente la surface d'encoche, Soit par  $h_a$ , soit par  $b_z$ , soit par  $h_a$  et  $b_z$  simultanément en fonction de l'induction admissible.

Si les valeurs de l'induction sont inférieures aux celles admissibles les dimensions du moteur sont exagérées il faut diminuer la longueur du noyau du stator ou la hauteur de l'axe de rotation. On répète le calcul.

Si  $k_r$  obtenu est supérieur à la valeur admissible, il faut augmenter les dimensions de l'encoche en calculant  $h_a$  et  $b_z$  pour les valeurs des inductions  $B_a$  et  $B_z$  les plus grande admissibles, on peut diminuer le nombre des conducteurs élémentaires  $n_{\text{él}}$  en augmente la section d'un fils, si  $k_r$  reste supérieur à la valeur admissible il faut changer les dimensions principales du moteur et répéter le calcul.

### II.5.7 On calcule la largeur et la hauteur de calcul de dent

$$b'_z = \pi \frac{D+2h_{en}}{Z} - b_1 \quad \text{II-37}$$

$$b''_z = \pi \frac{D+2(h_{en}-h_1)}{Z} - b_2 \quad \text{II-38}$$

$$h_z = h_{en} \quad \text{II-39}$$

Si  $b'_z \approx b''_z$ ; on prend

$$b_z = \frac{b'_z + b''_z}{2} \quad \text{II-40}$$

la longueur de calcul de dent si  $b'_z \neq b''_z$  il faut soit varier les dimensions de l'encoche soit calculer la densité du champ magnétique de dent comme pour les encoches rectangulaires.

**Chapitre III :**  
**Calcul Différent**  
**Rotors**

### **III.1 Dimensionnement du rotor à cage :**

#### **III.1.1 Calcul du rotor en court-circuit :**

##### **III.1.1.1 Entrefer**

Le nombre d'ampères-tours requis pour faire passer le flux à travers l'entrefer est proportionnel à la densité de flux et à la longueur de l'entrefer. Même avec une faible densité de flux et un entrefer étroit, la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer est beaucoup plus importante que dans le reste du circuit magnétique. C'est donc l'entrefer qui requiert la plus grande partie du courant de magnétisation. Pour obtenir de bonnes performances, le courant de magnétisation devrait être le plus petit possible, ce qui nécessite un entrefer aussi étroit que les contraintes mécaniques le permettent. Par contre, un entrefer trop étroit favorise les harmoniques qui peuvent nuire au fonctionnement du moteur. [10]

$$\delta = ((5 + 0,002D) / 1000) \cdot \tau \quad \text{III-1}$$

##### **III.1.1.2 Le nombre des encoches du rotor**

Pour un moteur asynchrone, il est très important de bien choisir le nombre d'encoches du rotor afin d'éviter la présence de vibration, de bruit magnétique, de couple saccadé et de plages de synchronisme. Le nombre d'encoches du rotor ne doit jamais être égal à celui du stator ; il peut être plus grand mais il est généralement plus petit dans les rotors à cage d'écureuil. On obtient habituellement de bons résultats pour un écart entre 15 et 30%.  $Z_2 > Z_1$  pour les moteurs puissants et  $Z_2 < Z_1$  pour les moteurs de petite puissance. Le nombre d'encoches au rotor ( $Z_2$ ) recommandé en fonction du nombre de pôles ( $2p$ ) et du (Tableau. 10) (voir l'annexe).

##### **III.1.1.3 Le diamètre extérieur**

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

$$D_2 = D - 2\delta \quad \text{III-2}$$

##### **III.1.1.4 La longueur du noyau**

La longueur réelle du rotor s'exprime comme suit :

$$l_2 = l_1 = l_\delta \quad \text{III-3}$$

**III.1.1.5 Le pas dentaire rotorique**

Le pas dentaire du rotor représente la distance séparant les axes de deux encoches voisines. Il est donné par la formule suivante :

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} \quad \text{III-4}$$

**III.1.1.6 Le diamètre de l'arbre préalable**

$$D_{ar} \approx k_{ar} D_a \quad \text{III-5}$$

Avec :  $k_{ar}$  : Rapport entre  $D_{ar}$  et  $D_a$ , qui se détermine selon le Tableau. 11 (voir l'annexe B)

Le diamètre intérieur du rotor est donné par la relation suivante :

$$D_j = D_{ar} \quad \text{III-6}$$

**III.1.1.7 Le courant dans la barre**

Le Courant dans les barres de la cage du rotor s'exprime comme suit :

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot \epsilon_i \quad \text{III-7}$$

Avec  $\epsilon_i$  : Coefficient tenant compte de l'influence du courant magnétisant et les résistances des bobines sur le rapport  $I_1/I_2$ , on le choisit d'après la Fig. 8 (voir l'annexe A)

$k_i$ : Rapport de transformation du courant, Pour le moteur à cage d'écureuil

$$k_i = \frac{2 m_1 \omega_1 k_{B1}}{Z_2} \quad \text{III-8}$$

**III.1.1.8 La section de la barre**

$$S_b = \frac{I_2}{J_2} \quad \text{III-9}$$

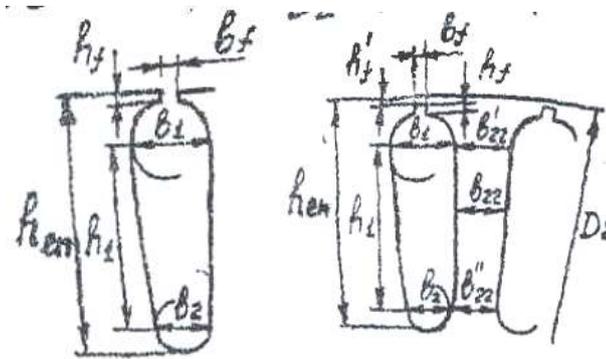
Avec :  $J_2 = (2.5 \div 3.5) \text{ A/mm}^2$  pour les barres en aluminium

$J_2 = (4.0 \div 8.0) \text{ A/mm}^2$  pour les barres en cuivre.

**III.1.1.9 Les encoches rotoriques**

Pour les moteurs dont  $h=160\div 250$  mm, on choisit les encoches fermées, (Fig. III.1.b). On prend :

$$b_f=1.5 \text{ mm} \qquad h_f=0.7 \text{ mm} \qquad h'_f=0.3 \text{ mm à } 2p=4$$



a) b)  
Fig. III.1. Les encoches piriformes

a)-semi-fermée ; b)-fermée

**III.1.1.10 largeur admissible de la dent rotorique**

La largeur de la dent rotorique s'exprime comme suit :

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_2}{B_{z2} \cdot l_{ac} \cdot k_f} \qquad \text{III-10}$$

$$l_{ac2} = l_2 \qquad \text{III-11}$$

Avec

$l_{ac2}$  : Longueur du circuit magnétique du rotor

$l_2$  : Longueur réelle de l'induit

$B_{z2}$  : Induction dans les dents du rotor.

$k_f = 0.95 \div 0.97$

**III.1.1.11 dimensions de l'encoche rotorique**

$$b_{1r} = \frac{\pi(D_2 + 2h_f - 2h'_f) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2} \qquad \text{III-12}$$

$$b_{2r} = \frac{\sqrt{b_1 \left( \frac{z_1}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - S_b / 4}}{\frac{Z_2}{\pi} - \pi / 2} \qquad \text{III-13}$$

$$h_{1r} = \frac{(b_1 - b_2) Z_2}{2\pi} \qquad \text{III-14}$$

Avec :

$b_{1r}$  : Diamètre supérieur de l'encoche ;

$b_{2r}$  : Diamètre inférieur de l'encoche.

Il faut arrondir les dimensions de l'encoche jusqu'aux fractions décimales de mm

### III.1.1.12 La hauteur totale de l'encoche

La hauteur totale de l'encoche est donnée par :

$$h_{en2} = h'_f + h_f + h_1 + \frac{(b_{1r} + b_{2r})}{2} \quad \text{III-15}$$

### III.1.1.13 La section de la barre (valeur exacte)

La valeur exacte de la section de la barre est donnée par :

$$S_b = \frac{\pi}{8} (b_{1r}^2 + b_{2r}^2) + \frac{1}{2} (b_{1r} + b_{2r}) h_1 \quad \text{III-16}$$

### III.1.1.14 densité du courant dans une barre

La densité du courant dans une barre s'exprime comme suit :

$$J_2 = \frac{I_2}{S_b} \quad \text{III-17}$$

La densité du courant dans les anneaux circuitages Jan est inférieure à celle dans les barres de (15 % ÷ 20 %)  $J_{an} = (0,80 \div 0,85) \cdot J_2$

### III.1.1.15 La section des anneaux circuitage

$$S_{an} = \frac{I_{an}}{J_{an}} \quad \text{III-18}$$

Ou

$$I_{an} = \frac{I_2}{2 \sin p\pi/Z_2} \quad \text{III-19}$$

Les dimensions des anneaux circuitage d'un cage d'écureuil simple sont suivantes :

$$b_{An} \approx 1.25 h_{en2} \quad \text{III-20}$$

$$a_{An} = S_{an} / b_{An} \quad \text{III-21}$$

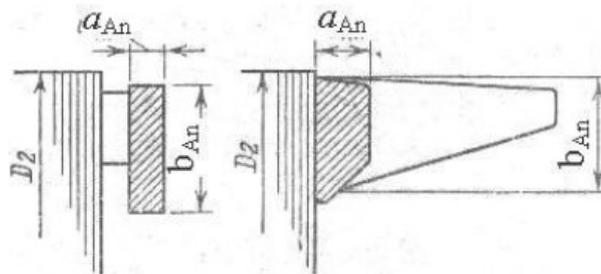


Fig. III.2 Dimension des anneaux

Les anneaux sont dotés des deux côtés par des ailettes de ventilation. Le nombre d'ailettes de ventilateur est égale au nombre premier qui est 2-3 fois plus petit que celui des encoches.

### **III.1.2 Calcul du courant d'aimantation ( calcul du circuit magnétique )**

On fait le calcul du circuit magnétique pour le régime à vide, dans ce cas la courbe de la répartition du flux magnétique est non sinusoïdale à cause de la saturation des dents du rotor et du stator, on détermine la densité du champ magnétique d'après les courbes d'aimantation tenant compte de la saturation du circuit magnétique

#### **III.1.2.1 Les valeurs exactes des inductions**

L'induction dans les dents statoriques est déduite à partir de la conservation du flux à travers le pas dentaire comme suit :

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{ac} \cdot kf} \quad \text{III-22}$$

L'induction dans les dents rotoriques est donnée par l'expression suivante :

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{ac2} \cdot kf} \quad \text{III-23}$$

Si la section des dents est variable suivant la hauteur on calcule les inductions  $B_{zmax}$  ;  $B_{zmin}$  et  $B_{zmoy}$  ou bien  $B_{z1/3}$

L'induction dans la culasse et dans le noyau s'exprime successivement par les deux relations suivantes :

$$B_a = \frac{\phi}{2h'_a \cdot l_{ac} \cdot kf} \quad \text{III-24}$$

$$B_j = \frac{\phi}{2h'_j \cdot l_{ac2} \cdot kf} \quad \text{III-25}$$

Avec :

la hauteur de calcul du dos du stator

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{en1} \quad \text{III-26}$$

la hauteur de calcul du dos du rotor

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} * \left( \frac{D_2}{2} - h_{en2} \right) - \frac{2}{3} d_{c2} m_{c2} \quad \text{III-27}$$

$m_{c2}, d_{c2}$  : le nombre des rangs et de diamètre des canaux axiaux de ventilation .

Pour la hauteur de l'axe de rotation  $h \leq 250$  mm :  $m_{c2} = 0$   $d_{c2} = 0$

### III.1.2.2 Force magnétisante

Chaque pôle d'un moteur asynchrone doit fournir suffisamment de force magnétisante pour faire passer le flux à travers l'entrefer, les dents du stator et du rotor ainsi que la culasse du stator et celle du rotor.

#### III.1.2.2.1 Force magnétisante de l'entrefer

On obtient la force magnétisante requise par pôle pour faire passer le flux à travers l'entrefer à l'aide de la relation :

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \quad \text{III-28}$$

Avec Le coefficient de l'entrefer

$$k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \delta} \quad \text{III-29}$$

et

$$\gamma = \frac{(b_{f1}/\delta)^2}{5 + b_{f1}/\delta} \quad \text{III-30}$$

#### III.1.2.2.2 Force magnétisante de la zone dentaire du stator

La force magnétisante dans les dents du rotor est donnée comme suit :

$$F_{z1} = 2 h_{z1} \cdot H_{z1} \quad \text{III-31}$$

Avec  $H_{z1}$  : Le champ magnétique dans la dent statorique

$h_{z1} = h_{en1}$  : Hauteur de la dent statorique.

#### III.1.2.2.3 Force magnétisante de la zone dentaire du rotor

La force magnétisante dans les dents du rotor est donnée comme suit :

$$F_{z2} = 2 h_{z2} \cdot H_{z2} \quad \text{III-32}$$

Les valeurs des densités du champ magnétique dans les dents sont déterminées d'après les courbes d'aimantation.  $H_{z1}$  et  $H_{z2}$  selon Tableau. 12 (voir l'annexe B)

#### III.1.2.2.4 Le coefficient de saturation de la zone dentaire

Le coefficient de saturation est donné par la relation suivante :

$$K_{\mu d} = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad \text{III-33}$$

On compare  $K_{\mu d}$  obtenu avec celui-ci à dévissable  $K_{\mu dad} = 1,2 \div 1,6$ .

Si  $K_{\mu d} \neq K_{\mu dad}$  il faut corriger les dimensions du circuit magnétique.

### III.1.2.2.5 Force magnétomotrice de la culasse et du noyau

Les forces magnétomotrices de la culasse et du noyau sont données par les deux expressions suivantes :

$$F_a = L_a H_a \quad \text{III-34}$$

$$F_j = L_j H_j \quad \text{III-35}$$

Avec  $H_a$  et  $H_j$  champs magnétiques dans la culasse et dans le noyau d'après les courbes d'aimantation Tableau. 13 (voir l'annexe B)

La longueur de la ligne moyenne magnétique du dos du stator

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} \quad \text{III-36}$$

Et du rotor :

$$L_j = \frac{\pi(D_{ar} - h_j)}{2p} \quad \text{III-37}$$

Ou La hauteur du dos du rotor :

$$h_j = \frac{\pi(D_2 - D_j)}{2} - h_{en2} \quad \text{III-38}$$

### III.1.2.2.6 Force magnétisante totale du circuit magnétique

$$F_\epsilon = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j \quad \text{III-39}$$

### III.1.2.3 Coefficient de saturation du circuit magnétique

Le Coefficient de saturation du circuit magnétique est donné par la relation suivante :

$$K_{scm} = k_\mu = F_\epsilon / F_\delta$$

### III.1.2.4 Le courant d'aimantation

Le courant magnétisant représente la partie réactive du courant à vide. Il est donné par la relation suivante :

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\epsilon}}{0.9m\omega_1 k_{b1}} \quad \text{III-40}$$

### III.1.2.5 La valeur relative du courant

$$I_{\mu}^* = I_{\mu}/I_{1nom} \quad \text{III-41}$$

La valeur de  $I_{\mu}^*$  permet de juger le vrai choix et le calcul des dimensions et les enroulements du moteur, en effet un mauvais choix de ces dimensions ( $I_{\mu}^*$  hors des limites) conduit : soit à avoir les parties actives (gabarit des limites ) sont sous dimensionnés et par conséquent ,un mauvais rendement et un facteur de puissance élevé, mais de mauvaise utilisation des matériaux par unité de puissance.

### III.2 dimensionnement du rotor à encoches profondes :

Le moteur à encoche profondes correspond au moteur à cage simple. Sauf que , la forme des encoches différent, elle est profonde et étroit, on peut avoir les formes suivantes Fig. III.3 :

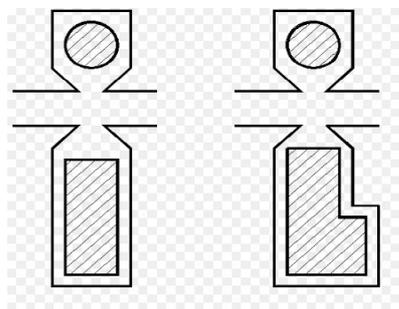


Fig. III.3 encoches profondes

Nous envisagerons celles de la forme rectangulaires, comme étant les plus simples et les plus réponsus.

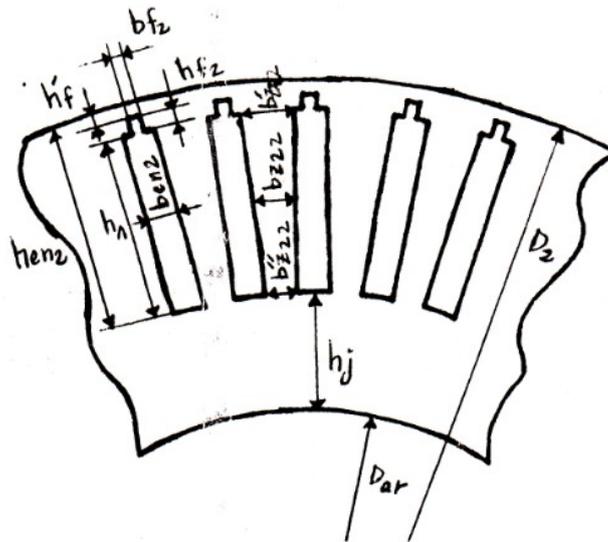


Fig. III.4 Configuration des encoches rotoriques

Le calcul du rotor à encoches profondes c'est le même comme le rotor à cage sauf

Les équations suivant :

### III.2.1.L'entrefer

$$\delta = ((3 + 0,002D)/1000) \cdot \tau \quad \text{III-42}$$

### III.2.2.La section de la barre

$S_b$  selon le Tableau. 14 (voir l'annexe B)

Ou  $h_B$  la hauteur de la barre

$b_B$  la largeur de la barre

$$b_1 = b_2 = b_B \quad \text{III-43}$$

La hauteur totale de l'encoche :

$$h_{en2} = h'_f + h_f + b_B \quad \text{III-44}$$

Le reste de calcul se fait comme l'ordre de calcul du rotor à cage

### III.3 dimensionnement du rotor bobiné :

Le rotor bobiné est toujours constitué par un assemblage de tôles en acier circulaires isolées et serrées entre deux plateaux de fonte ces tôles sont munies d'encoches pour loger le bobinage rotorique . qui est généralement couplé en étoile.

Les enroulements rotoriques sont couplés par l'intermédiaire des bagues de frottement et des balais sur une batterie de résistance réglable. Montée en étoile.

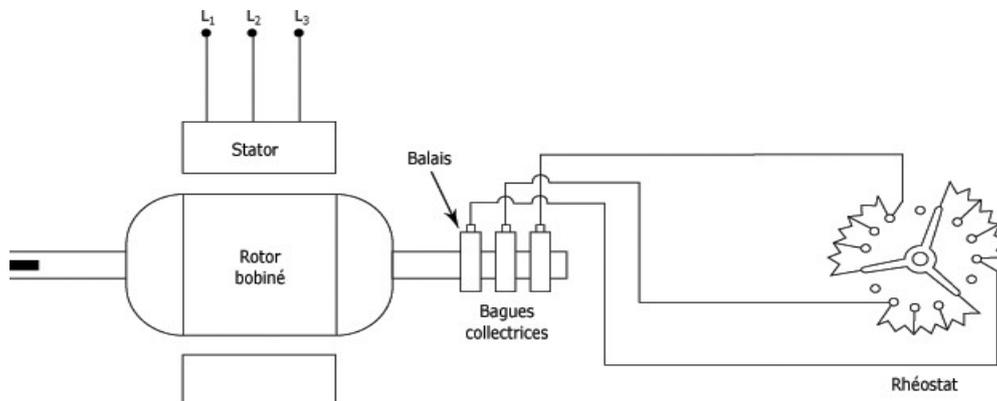


Fig. III.5 Schéma simplifié d'un moteur à bague

Le choix des dimensions principales en effet dans la même succession. De même est effectué le calcul dimension de la zone de dents du stator et de l'entrefer. Il y a les particularités du calcul du rotor à bagues.

### III.3.1 Calcul de L'entrefer

Le calcul de l'entrefer pour rotor bobiné fait comme le calcul de l'entrefer d'encoche à profond.

### III.3.2 La longueur du noyau

$$l_2 = l_1 + 0,005 \quad \text{III-45}$$

le nombre d'encoches c'est le même nombre dans les deux cas rotor (à cage et encoches profondes)

### III.3.3 Nombre d'encoches par pôle et par phase

Le nombre d'encoches qu'occupe chaque phase sous chaque pôle est donné par la relation suivante :

$$q_2 = \frac{Z_2}{2 p_2 m_2} \quad \text{III-46}$$

### III.3.4 Le nombre des spires d'une phase du stator

$$W_2 = 2 p_2 q_2 \quad \text{III-47}$$

### III.3.5 La tension de court –circuit

$$V_{cc} = \sqrt{3}V_{1nom} \frac{W_2}{W_1} \quad \text{III-48}$$

### III.3.6 Le courant de phase rotorique préalablement

C'est le même calcul sauf

$$k_i = \frac{m_1 W_1 k_{b1}}{m_2 W_2 k_{b2}} \quad \text{III-49}$$

$$k_{b2} = \frac{0.5}{N \sin \frac{\pi}{2mN}} \quad \text{III-50}$$

$$N = b_d + c \quad \text{III-51}$$

b- la partie entière q fractionnaire

c- le numérateur et d- dénominateur de la partie fractionner

Comme la forme des encoches du stator est trapézoïde, alors la forme des encoches du rotor est rectangulaire semi-fermée et l'enroulement est à deux couches en barre

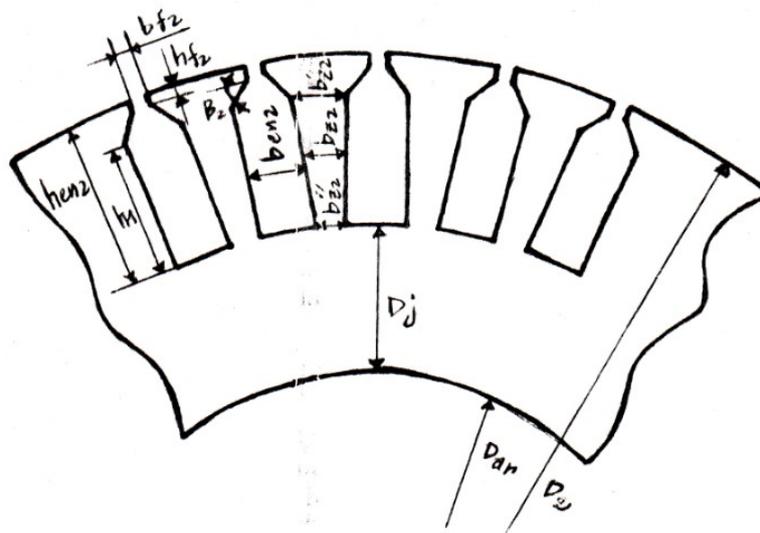


Fig. III.6 Configuration des encoches rotoriques

Comme la forme de l'encoche est rectangulaire, donc la section des fils est rectangulaire elle doit être inférieure à 20 [mm<sup>2</sup>]

### III.3.7 La section effective des conducteurs de l'enroulement rotorique

$$S_{ef2} = I_2 / J_2 \quad \text{III-52}$$

Si  $S_{ef2} > 20$  [mm<sup>2</sup>]

$$S_{ef2} = S_{el} \cdot n_{el} \quad \text{III-53}$$

$S_{el2}$  selon Tableau. 15 (voire l'annexe B)

Epaisseur de la dent près de l'entrefer.

$$b'_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{ac2} \cdot k_f} \quad \text{III-54}$$

On trouve préalablement

$$b_{en} = t_2 - b'_{z2} \quad \text{III-55}$$

$$B_{t2} = 0,6 \cdot b_{en2} \quad \text{III-56}$$

$$b_{el2} = b_{en2} - 2b_{is} - \Delta h_{en} \quad \text{III-57}$$

Ou  $b_{is}$  est trouvé du Tableau. 16 (voire l'annexe B)

**Chapitre VI :**  
**caractéristiques de**  
**fonctionnement et de**  
**démarrage**

## VI.1. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement [3, 6].

## VI.2. Les paramètres du régime de fonctionnement

### VI.2.1. Les paramètres statorique

#### VI.2.1.1. La résistance d'une phase statorique

La résistance active de phase de l'enroulement statorique est donnée comme suit :

$$r_1 = \rho \frac{L_1}{S_{\text{ef}} \cdot a} \quad \text{VI-1}$$

Où

la section du fil efficace

$$S_{\text{ef}} = S_{\text{él}} \cdot n_{\text{él}}$$

Le nombre des branches parallèles de l'enroulement : a

longueur totale des conducteurs d'une phase

$$L_1 = l_{\text{moy}1} \cdot \omega_1 \quad \text{VI-2}$$

la longueur moyenne d'une spire

$$l_{\text{moy}1} = 2(l_{\text{en}1} + l_{\text{fr}1}) \quad \text{VI-3}$$

la longueur de la partie d'encoche

$$l_{\text{en}1} = l_1 \quad \text{VI-4}$$

la longueur moyenne de la partie frontale

$$l_{\text{fr}1} = k_{\text{fr}} \frac{\pi(D+h_{\text{en}1})}{2p} \beta_1 \quad \text{VI-5}$$

La saillie de la partie frontale de l'enroulement

$$l_{s1} = k_s \frac{\pi(D+h_{en1})}{2p} \beta_1 + B \quad \text{VI-6}$$

$B=(0.01 \div 0.015)\text{m}$  ;

les coefficients  $k_{fr}$ ,  $k_s$  déterminent du tableau:

2P	Partie non isolée		Partie isolée	
	$k_{fr}$	$k_s$	$k_{fr}$	$k_s$
4	1,30	0,40	1,55	0,50

Tableau. VI.1 les coefficients  $k_{fr}$ ,  $k_s$

matériaux	$\theta=20^\circ$	$\theta=75^\circ$	$\theta=115^\circ$
cuivre	$\frac{1}{57} 10^{-6}$	$\frac{1}{47} 10^{-6}$	$\frac{1}{41} 10^{-6}$
aluminium	$\frac{1}{35} 10^{-6}$	$\frac{1}{28} 10^{-6}$	$\frac{1}{26} 10^{-6}$
Aluminium coulé	$\frac{1}{30} 10^{-6}$	$\frac{1}{24} 10^{-6}$	$\frac{1}{22} 10^{-6}$

Tableau. VI.2 la résistance spécifique du matériaux de l'enroulement  $\rho$  - [Ohms . m]

### VI.2.1.2. la valeur relative

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{1nom}}{V_{nom}} \quad \text{VI-7}$$

### VI.2.1.3. Réactance de fuite statorique

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w}{pq} l'_\delta \Sigma \lambda = 18.5 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} \Sigma \lambda \quad \text{VI-8}$$

Où

### VI.2.1.4. la perméance équivalente résultante

$$\Sigma \lambda = \lambda_{en} + \lambda_{fr1} + \lambda_{d1} \quad \text{VI-9}$$

$\lambda_{en1}$  la perméance équivalente d'encoche

$\lambda_{fr1}$  la perméance équivalente des parties frontales

$\lambda_{d1}$  la perméance équivalente différentielle

Pour les encoches trapézoïdales

$$\lambda_{en1} = \frac{h_3}{3b} K_\beta + \left( \frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_f} + \frac{h_f}{b_f} \right) K'_\beta \quad \text{VI-10}$$

Ou

pour  $\frac{2}{3} < \beta < 1$   $K'_\beta = 0.25(1 + 3b)$  VI-11

pour  $\frac{1}{3} < \beta < \frac{2}{3}$   $K'_\beta = 0.25(6b - 1)$  VI-12

pour les enroulement à deux couches

$$K_\beta = 0.25(1 + 3K'_\beta) \quad \text{VI-13}$$

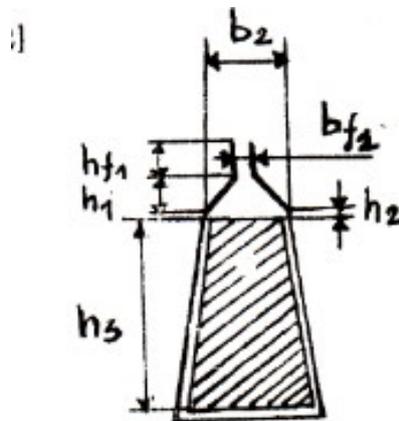


Fig. VI.1 encoche trapézoïdale

La perméance équivalente différentielle

$$\lambda d_1 = \frac{t_1}{12\delta k_\delta} \xi \quad \text{VI-14}$$

pour les encoches semi-fermées et semi-ouvertes du stator tenant compte de l'inclinaison des encoches .

$$\xi = 2k'_{in} k_\beta - k_{b1}^2 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 (1 + \beta_{in}^2) \quad \text{VI-15}$$

Ou

$t_1$  et  $t_2$  : les pas dentaires du stator et du rotor

le coefficient d'inclinaison

$$\beta_{in} = b_{in}/t_2 = 0 \quad \text{VI-16}$$

Pour les machines sans inclinaison des encoches  $b_{in}=0$

$K'_{in}$  est déterminé d'après Fig. 10

$$\lambda_{fr1} = \frac{0,34 \cdot q_1}{l_{fe1}} (l_{fe1} - 0,64 \cdot \xi \cdot \tau) \quad \text{VI-17}$$

$$\lambda_{en} = \frac{h_3 - h_0}{3b_{en}} k_{\beta} + \left( \frac{h_2}{b_{en}} + \frac{3h_1}{b_{en} + 2b_f} + \frac{h_f}{b_f} \right) k'_{\beta} \quad \text{VI-18}$$

## VI.2.2. Les paramètres rotorique

### VI.2.2.1. Rotor à cage

#### VI.2.2.1.1. La résistance d'une phase rotorique

$$r_2 = r_b + 2r_{\acute{e}an} \quad \text{VI-19}$$

Ou

la résistance des barres  $r_b = \rho_{b\theta} \frac{l_b}{s_b} \quad \text{VI-20}$

#### VI.2.2.1.2. la résistance des deux éléments de l'anneau

$$2r_{\acute{e}an} = \rho_{an\theta} \frac{\pi D_{anmoy}}{Z_2 s_{an}} \quad \text{VI-21}$$

$\rho_{b\theta}, \rho_{an\theta}$  : les résistances spécifiques du matériaux de la barre et de l'anneau  
le diamètre moyeu de l'anneau

$$D_{anmoy} = D_2 - b_{an} \quad \text{VI-22}$$

#### VI.2.2.1.3. Le coefficient de réduction de la résistance de la cage d'écureuil au stator

$$K = \frac{4m_1 (w_1 k_{b1})^2}{Z_2} \quad \text{VI-23}$$

#### VI.2.2.1.4. La résistance réduite

$$r_2' = r_2 \cdot k \quad \text{VI-24}$$

#### VI.2.2.1.5. La valeur relative

$$r_2'^* = r_2' \frac{I_{1nom}}{V_{1nom}} \quad \text{VI-25}$$

#### VI.2.2.1.6. Réactance de fuite du rotor

$$x_2 = 7.9 f_1 l'_{\delta} \cdot 10^{-6} (\lambda_{en2} + \lambda_{fr2} + \lambda_{d2}) \quad \text{VI-26}$$

**VI.2.2.1.7. La perméance équivalente d'encoche**

$$\lambda_{en2} = \left[ \frac{h_1}{3b} \left( 1 - \frac{\pi b^2}{8S_b} \right) + 0.66 - \frac{b_f}{2b} \right] k_d + \frac{h_f}{b_f} \quad \text{VI-27}$$

Pour toutes les encoches pour le régime de fonctionnement  $k_d = 1$

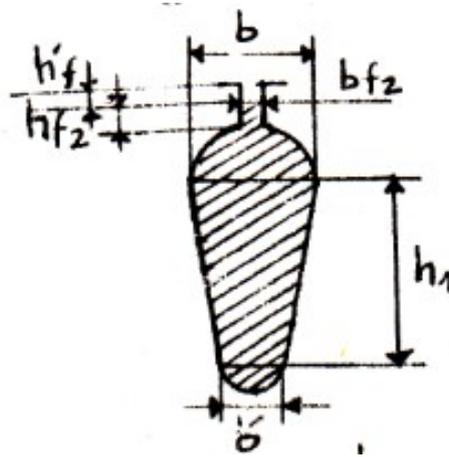


Fig. VI.2 encoche ovale

**VI.2.2.1.8. La perméance équivalente différentielle encoche rotorique**

$$\lambda d_2 = \frac{t_2}{12\delta k_\delta} \xi \quad \text{VI-28}$$

Ou

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi P}{Z_2} \right) - \frac{\Delta Z}{1 - (P/Z_2)^2} \quad \text{VI-29}$$

$\Delta Z$  est déterminé de la Fig. 9 (voir l'annexe A)

Si  $Z_2 / p \geq 10$ ,

$$\xi = 1 - \Delta Z \quad \text{VI-30}$$

**VI.2.2.1.9. La perméance des parties frontales de l'enroulement rotorique coulé**

$$\lambda_{fr2} = \frac{2,3 D_{an moy}}{Z_2 l' \delta \Delta^2} \lg \frac{4,7 D_{an moy}}{2 A_{an} + b_{an}} \quad \text{VI-31}$$

Ou  $D_{an moy}$  – le diamètre moyen de l'anneau

$$\Delta = 2 \sin p\pi / Z_2 \quad \text{VI-32}$$

**VI.2.2.1.10. La réactance rotorique réduite à l'enroulement statorique**

$$x'_2 = K x_2 \quad \text{VI-33}$$

### VI.2.2.2. Rotor à encoches profondes

Pour calcul les paramètres rotorique à encoches profondes on fait le même ordre de calcul des paramètres de rotor à cage sauf :

La perméance équivalente d'encoche

$$\lambda_{en2} = \frac{h_1}{3b} k_d + \frac{h_2}{b} + \frac{2h_2}{b+2b_f} + \frac{h_f}{b_f} \quad \text{VI-34}$$



Fig. VI.3 encoche profonde

### VI.2.2.3. Rotor bobiné

Pour calcul les paramètres rotorique à rotor bobiné on fait le même ordre de calcul des paramètres de rotor à cage sauf

#### VI.2.2.3.1. Le coefficient de réduction de la résistance de la bague :

$$k = \frac{m_1(W_1 k_{b1})^2}{m_2(W_2 k_{b2})^2} \quad \text{VI-35}$$

#### VI.2.2.3.2. La réactance de fuite rotorique :

$$x_2 = 15,8 \left( \frac{f_1}{100} \right) \left( \frac{w_2}{100} \right)^2 \left( \frac{l_\delta}{p \cdot q_2} \right) (\lambda_{en2} + \lambda_{d2} + \lambda_{fr2}) \quad \text{VI-36}$$

#### VI.2.2.3.3. La perméance équivalente d'encoche :

$$\lambda_{fr} = \frac{0,34 \cdot q_2}{l_{fe2}} (l_{fe2} - 0,64 \cdot \xi \cdot \tau) \quad \text{VI-37}$$

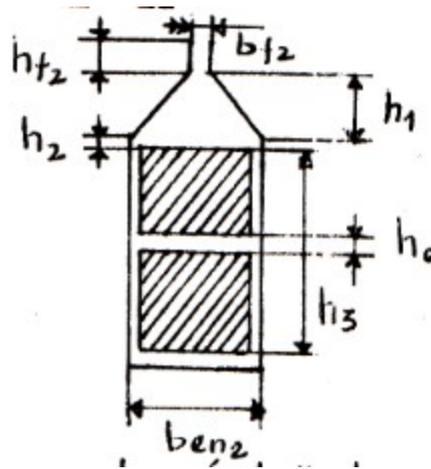


Fig. VI.4 encoche rectangulaire

### VI.3. Calcul des pertes

#### VI.3.1. Pertes principales dans l'acier du stator

$$P_{fp} = P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta (Kd_a B_a^2 m_a + kd_z B_{zmoy}^2 m_{z1}) \quad \text{VI-38}$$

Ou

$$B_{\max} = 1 \text{ T}$$

la fréquence

$$f = 50 \text{ Hz}$$

l'indice de puissance

$$\beta = 1.5$$

pertes spécifiques pour l'induction  $P_{1,0/50} = 2.5 \div 2.6 \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}}\right]$

$Kd_z, kda$  – les coefficients qui tiennent compte de la répartition non uniforme du champ magnétique dans les sections des traçons du circuit magnétique et des facteurs technologiques

Pour  $P < 250 \text{ kW}$   $kd_a = 1.6$  ;  $kd_z = 1,8$

$m_a, m_{z1}$  - les masses de l'acier de la culasse du stator (du dos) et des dents statoriques

$$m_a = \pi(D_a - h_a) h_a l_{ac1} k_f \gamma_f \quad \text{VI-39}$$

$$m_{z1} = Z_1 h_{z1} b_{z1moy} l_{ac1} k_f \gamma_f \quad \text{VI-40}$$

Ou la masse spécifique de l'acier  $\gamma_f = 7.8 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

**VI.3.2. Pertes superficielles dans les dents du rotor et du stator par rapport à 1m2**

$$p_{sup2} = 0.5 k_{02} (Z_1 n / 10000)^{1.5} (B_{02} t_1 10^3)^2 \quad \text{VI-41}$$

$$p_{sup} = 0.5 k_{01} (Z_2 n / 10000)^{1.5} (B_{01} t_2 10^3)^2 \quad \text{VI-42}$$

$B_{01} = \beta_{01} k_{\delta} B_{\delta}$  - l'amplitude du champ pulsatoire l'entrefer sous les dents du stator

On détermine  $\beta_{01}$  et  $\beta_{02}$  d'après la Fig. 10 (voir l'annexe A)

$k_{01}$  et  $k_{02}$  - les coefficients qui tiennent compte de l'influence du traitement de la surface des têtes des dents pertes spécifiques.

$$\text{Pour } P < 160 \text{ KW} \quad k_{01} = 1.4 \div 1.8 ; \quad k_{02} = 1.4 \div 1.8$$

**VI.3.3. Les pertes superficielles totales**

$$P_{sup1} = p_{sup1} (t_1 - b_{f1}) Z_1 l_{ac1} \quad \text{VI-43}$$

$$P_{sup2} = p_{sup2} (t_2 - b_{f2}) Z_2 l_{ac2} \quad \text{VI-44}$$

**VI.3.4. Pertes pulsatoires dans les dents statorique et rotorique**

$$P_{pul1} = 0.11 \left( \frac{Z_2 n}{1000} B_{pul1} \right)^2 m_{z1} \quad \text{VI-45}$$

$$P_{pul2} = 0.11 \left( \frac{Z_1 n}{1000} B_{pul2} \right)^2 m_{z2} \quad \text{VI-46}$$

Ou

$$B_{pul1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_1} B_{z1moy} \quad \text{VI-47}$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{f2}/\delta)^2}{5 + b_{f2}/\delta} \quad \text{VI-48}$$

$$B_{pul2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_1} B_{z2moy} \quad \text{VI-49}$$

$$\gamma_1 = \frac{b_{f1}/\delta}{5 + b_{f1}/\delta} \quad \text{VI-50}$$

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2moy} l_{ac2} k_f \gamma_f \quad \text{VI-51}$$

**VI.3.5. Pertes totales supplémentaires dans l'acier**

$$P_{fsup} = P_{sup1} + P_{sup2} + P_{pul1} + P_{pul2} \quad \text{VI-52}$$

**VI.3.6. Pertes mécanique et les pertes par ventilation**

$$P_{méc} = k_t \left( \frac{n}{1000} \right)^2 D_a^4 \quad \text{VI-53}$$

Ou

pour  $2p \geq 4$

$$k_t = 1.3(1 - D_a)$$

### VI.3.7. Pertes supplémentaires en régime nominale :

$$P_{sn} = 0.005 P_{1no} = 0.005 \frac{P_{2no}}{\eta} \quad \text{VI-54}$$

### VI.3.8. Pertes électrique à vide :

$$P_{el.o} = 3I_u^2 r_1 \quad \text{VI-55}$$

### VI.3.9. Le courant à vide:

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_\mu^2} \quad \text{VI-56}$$

Ou

la composante active du courant à vide

$$I_{oa} = \frac{P_{fp} + P_{méc} + P_{sup} + P_{el.o}}{m V_{1nom}} \quad \text{VI-57}$$

### VI.3.10. Facteur de puissance à vide :

$$\cos \varphi_o = I_{oa} / I_o \quad \text{VI-58}$$

## VI.4. Calcul des caractéristiques de fonctionnement

Dans de nombreux cas, il est plus commode d'avoir à faire non à une machine asynchrone réelle qui représente un système de deux ou plusieurs circuits couplés électromagnétiquement, mais à un système électrique équivalent en créant en fin , un schéma équivalent .

On calcule

$$r_{12} = \frac{P_{fp}}{m I_\mu^2} \quad \text{VI-59}$$

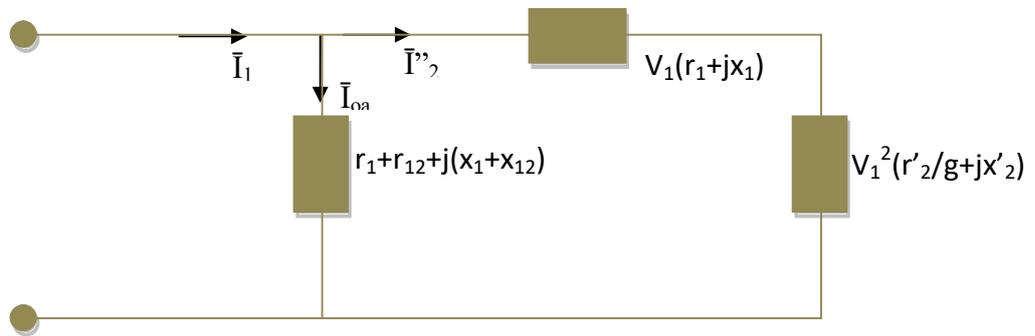
$$x_{12} = \frac{V_{1no}}{I_\mu} - x_1 \quad \text{VI-60}$$

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} \quad \text{VI-61}$$

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12} (r_1 + r_{12}) + x_{12} (x_1 + x_{12})} < 1^\circ \quad \text{VI-62}$$

Si  $\gamma < 1^\circ$  on utilise le schéma équivalent corrigé en L

donc on utilise le schéma équivalent corrigée:



$$I_{oa} = \frac{P_{fp} + 3 I_{\mu}^2 r_1}{3V_{1nom}} \quad \text{VI-63}$$

Pour la méthode simplifiée

$$a' = \sigma_1^2; \quad b' = 0$$

$$a = R_1 = \sigma_1 r_1 \quad \text{VI-64}$$

$$b = x_{cc} = \sigma_1(x_1 + \sigma_1 x'_2) \quad \text{VI-65}$$

### VI.5. Calcul des caractéristiques de démarrage :

#### VI.5.1. La hauteur des barres réduite

$$\xi = 63,61 h_B \sqrt{g} 10^{-3} \quad \text{VI-66}$$

$$h_B = h_1 + (b_1 + b_2)/2 \quad \text{VI-67}$$

$\varphi = f(\xi)$  selon Fig. 11

$\varphi' = f(\xi) = Kd$  selon Fig. 12

#### VI.5.2. Hauteur réelle des barres

$$h_r = \frac{h_B}{1 + \varphi} \quad \text{VI-68}$$

Pour  $\frac{b_2}{2} \leq h_r \leq \frac{b_2}{2} + h_1$

$$S_r = \frac{\pi b_r^2}{8} + \frac{(b_1 + b_r)(h_r - b_1)}{2} \quad \text{VI-69}$$

Pour  $h_r \leq b_2/2$

$$S_r = \frac{\pi b_r^2}{4(\varphi_r + 1)} \quad \text{VI-70}$$

Remarque

$S_r = h_r \cdot b$  Pour rotor a encoches profondes

$$K_r = S_B / S_r$$

Ou  $S_B$  et  $S_r$  sont déterminés comme dans le cas précédent, mais

$$b_r = b_2 + \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left( h_r - \frac{b_2}{2} \right) \quad \text{VI-71}$$

### VI.5.3. Le coefficient d'augmentation de la résistance rotorique

$$K_R = \frac{(r_2 + r_b(k_r - 1))}{r_2} = 1 + \frac{r_b}{r_2} (k_r - 1) \quad \text{VI-72}$$

### VI.5.4. La résistance rotorique

$$r'_{2\xi} = K_r r'_2 \quad \text{VI-73}$$

Lors du démarrage

On trouve  $\lambda_{en\xi 2}$  d'après II.9.3 tenant compte de  $K_d = f(\xi) = \phi'$

### VI.5.5. Inductance rotorique :

$$x'_{2\xi} = k_x x'_2 \quad \text{VI-74}$$

Ou

$$k_x = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2} = \frac{\lambda_{en\xi 2} + \lambda_{d2} + \lambda_{fr2}}{\lambda_{en2} + \lambda_{d2} + \lambda_{fr2}} \quad \text{VI-75}$$

### VI.5.6. Le courant rotorique sans tenir compte de la saturation :

$$I'_2 = \frac{V_{1nom}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{g}\right)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}} \quad \text{VI-76}$$

On tient compte de l'influence de la saturation. On prend  $k_{sat} = 1,35$  et ( $I_1 = I_2$ ) pour  $g = 1$  et  $k_{sat} = 1$ , pour  $g = 0$  Donc le coefficient de saturation est une fonction linéaire.

$$K_{sat} = 0,35 g + 1 \quad \text{VI-77}$$

### VI.5.7. Fmm moyenne par rapport à une couche statorique :

$$F_{enmoy} = 0,7 \frac{K_{sat} I_{1n} U_{en1}}{a} \left( k'_B + k_{B1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad \text{VI-78}$$

### VI.5.8. L'inductance fictive de fuite dans :

$$B_{f\delta} = (F_{enmoy} / 1,6 \cdot \delta \cdot C_n) \quad \text{VI-79}$$

$$C_n = 0,64 + 2,5 \sqrt{\delta / (t_1 + t_2)} \quad \text{VI-80}$$

### VI.5.9. Le coefficient de permanence de la fuite de l'encoche

$$C_1 = (t_1 - b_{f1}) (1 - \mu_\delta) \quad \text{VI-81}$$

$\mu_\delta = F(B_{f\delta})$  selon Fig. 13

### VI.5.10. L'abaissement de la perméance de la fuite de l'encoche

$$\Delta \lambda_{en1sat} = \frac{h_{f1} + 0,58 h'}{b_{f1}} \frac{C_1}{C_1 + 1,5 b_{f1}} \quad \text{VI-82}$$

**Le coefficient de fuite d'une encoche statorique**

$$\lambda_{en1sa} = \lambda_{en1} - \Delta\lambda_{en1s} \quad \text{VI-83}$$

**VI.5.11. Le coefficient de la permanence de fuite différentielle statorique**

$$\lambda_{d1sat} = \lambda_{d1} \cdot \mu_\delta \quad \text{VI-84}$$

**VI.5.12. L'inductance statorique**

$$x_{1sat} = x_1 \sum \lambda_{1sat} / \sum \lambda_1 \quad \text{VI-85}$$

Ou 
$$\sum \lambda_{1sat} = \lambda_{en1sa} + \lambda_{d1sat} + \lambda_{fr1} \quad \text{VI-86}$$

**VI.5.13. Pour les valeurs rotorique**

$$\Delta\lambda_{en2sat} = \frac{h_{f2} C_2}{b_{f2} b_{f2} + C_2} \quad \text{VI-87}$$

Ou 
$$C_2 = (t_2 - b_{f2}) (1 - \mu_\delta) \quad \text{VI-88}$$

$$\lambda_{en2\xi sat} = \lambda_{en2\xi} - \Delta\lambda_{en2sa} \quad \text{VI-89}$$

$$\lambda_{d2sat} = \lambda_{d2} \cdot \mu_\delta \quad \text{VI-90}$$

**VI.5.14. L'inductance reduite rotorique**

$$x'_{2\xi sa} = x'_2 (\sum \lambda_{2\xi sat} / \sum \lambda_2) \quad \text{VI-91}$$

Ou 
$$\sum \lambda_{2\xi sat} = \lambda_{en2\xi sat} + \lambda_{d2sat} + \lambda_{fr} \quad \text{VI-92}$$

**VI.5.15. L'inductance mutuelle dans le régime de démarrage**

$$x_{12} = x_{12} \cdot F_\Sigma / F_\delta \quad \text{VI-93}$$

Le coefficient

$$C_{1ensat} = 1 + (x_{1sat} / x_{12}) \quad \text{VI-94}$$

**VI.5.16. Le courant rotorique**

$$I'_2 = U_{1nom} / \sqrt{a_{en}^2 + b_{en}^2} \quad \text{VI-95}$$

Ou

$$a_{en} = r_1 + C_{1en} r'_{2\xi} / g \quad \text{VI-96}$$

$$b_{en} = x_{1sat} + C_{1ensa} x'_{2\xi sat} \quad \text{VI-97}$$

$$C^*, I^* = f(g)$$

$$C^* = (I'_2 / I_{2n})^2 \cdot k_r (g_n / g) \quad \text{VI-98}$$

$$I_1 = I'_2 \cdot \sqrt{a_{en}^2 + (b_{en} + x_{12d})^2} / C_{1ens} \cdot x_{12d} \quad \text{VI-99}$$

$$I^* = I_1 / I_{1nom} \quad \text{VI-100}$$

**Chapitre V :**  
**Résultats et étude**  
**Comparative**

### V.1. Procédure de dimensionnement

La première étape de la procédure de dimensionnement consiste à définir le cahier des charges en déterminant les différents points de fonctionnements. Le choix de la structure de la machine dépend du cahier des charges et de l'application à laquelle est destinée cette machine.

On calcule les dimensions principales et géométriques des machines à l'aide des lois de conservation du flux dans différentes parties de la machine en utilisant des équations analytiques.

Généralement, la méthode de dimensionnement est un processus itératif qui sert à comparer les différentes solutions possibles. Dans la deuxième étape on estime le niveau de saturation des circuits magnétiques du moteur et les inductions dans les différentes parties pour calculer les pertes magnétiques et les pertes par effet Joule.

Ensuite les paramètres du schéma équivalent sont calculés. Ceci permet d'obtenir le couple que le moteur peut fournir et le courant qu'il peut absorber. Enfin on peut ainsi évaluer le rendement dans toutes les conditions de fonctionnement.

### V.2. Résultats de dimensionnement

Après le calcul de la procédure de dimensionnement développée, on obtient les résultats sous la forme suivante :

### V.3. Le choix des dimensions principale

	valeurs	unite
La vitesse du synchronisme N	1500	[tr/min]
La fréquence du réseau est f	50	[Hz]
Le Nombre des poles p	4	
La hauteur préalable de l'axe de rotation H	200	[mm]
Le diamètre extérieur du stator $D_a$	359	[mm]
Le rapport (Diametre interieur/Diametre exterieur) $K_D$	0,64	
Le diamètre intérieur D	229,76	[mm]
Le pas polaire $\tau_9$	180,45	[mm]
La puissance utile de la machine $P_2$	37	[KW]
Le facteur de chute de tension $k_e$	0,98	

Le rendement de la machine	$\eta$	0,885	
Le facteur de puissance	$\cos \varphi$	0,885	
La puissance de calcul	$P'$	47,24	[KVA]
Les charges électromagnétiques préalables	$A$	$45.10^3$	[A/m]
	$B_\delta$	0,83	[T]
Le facteur de distribution du champs dans l'entrefer suppose	$\alpha_i$	0,7	
Le facteur de forme	$K_b$	1,09	
Le facteur de l'enroulement du stator	$K_{b1}$	0,915	
La longueur de calcul de l'entrefer	$l_\delta$	138,64	[mm]
		73	
Le rapport de la longueur sur le pas polaire	$\lambda$	0,7683	
Les nombres d'encoches possible	$Z_{1max}$	57	
	$Z_{1min}$	46	
Le nombre de phases du stator	$m_1$	3	
Le nombre d'encoche /pole/phase du stator	$q_1$	4	
Les nombres d'encoches	$Z_1$	48	
Le pas dentaire	$t_1$	15,037	[mm]
Le courant nominal d'une phase statorique	$I_{1nom}$	71,576	[A]
Tension d'alimentation	$V_{1nom}$	220	[V]
Le nombre de voies en parallele de l'enrlt statorique	$a_1$	2	
Le nombre des conducteurs efficaces préalables	$U_{en}$	18	
Nombre de spires d'une phase du stator	$W_1$	72	
La charge linéaire	$A$	42838	[A/m]
Le flux magnétique dans l'entrefer	$\theta$	0.015	[Wb]
L'induction du champ magnétique dans l'entrefer	$B_\delta$	0.83	[T]
La caractéristique de la charge thermique	$AJ_1$	214,19.	[A <sup>2</sup> /m.m
		$10^3$	m <sup>2</sup> ]
La densité du courant préalable	$J_1$	5	[A/mm <sup>2</sup> ]
La section du fil efficace préalable	$S_{ef}$	7,1577	[mm <sup>2</sup> ]
Le nombre de conducteurs élémentaire au stator	$N_{el}$	5	
La section d'un conducteur élémentaire	$S_{el}$	1,368	[mm <sup>2</sup> ]

La section des fils	$S_{ef}$	6,84	[mm <sup>2</sup> ]
La densité du courant	$J_1$	5,23	[A/mm <sup>2</sup> ]

#### V.4. Le calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer

	valeurs	unite
Le coefficient de remplissage du paquet du fer $k_r$	0,97	
l'induction $B_{z1}$	1,9	[T]
L'épaisseur de la dent du stator $b_{z1}$	6,7723	[mm]
$B_a$	1,5	[T]
La hauteur du dos du stator $h_a$	36,0286	[mm]
La hauteur de l'encoche $h_{en}$	28,5914	[mm]
La largeur de l'encoche $b_1$	6,7723	[mm]
$b_f$	3,368	[mm]
$h_f$	1	[mm]
La largeur de l'encoche $b_2$	8,7485	[mm]
La hauteur de la dent $h_1$	24,7011	[mm]
Largeur de la dent $b'_z$	6.7723	[mm]
Largeur de la dent $b''_z$	6.7985	[mm]
Le coefficient de remplissage de l'encoche	0,4342	

#### V.5. Calcul du rotor en court-circuit :

	bobiné	cage	profondi	unite
Entrefer	0,6043	0.9552	0,6043	[mm]
Le nombres des encoches du rotor	38	38	38	
Diamètre extérieur du rotor	228,5514	227.8496	228,5514	[mm]
La largeur du noyau	148,1049	146,2834	146.2834	[mm]
Le pas dentaire A la tete	18,8951	18.8371	18.8951	[mm]
Au milieu	16.8106	15.1401	13.8521	[mm]
Au Pied	14.7260	11.4431	8.8090	[mm]
$k_{ar}$	0,23	0,23	0,23	

Le diamètre de l'arbre préalable $D_{ar}$	82,57	82,57	82,57	[mm]
Le diamètre intérieur du noyau $D_j$	82,57	82,57	82,57	[mm]
$k_{b2}$	0,9540	////////	////////	
$k_{b1}$	0,915	0,915	0,915	
$\vartheta_i$	0,92	0,92	0,92	
Le nombre de phase de L'enroulement du rotor $m_2$	3	////////	////////	
Le nombre de conducteurs efficaces dans l'encoche rotorique	12	////////	////////	
Le nombre de spires d'une phase rotorique	38	////////	////////	
La section d'un conducteur elementaire	10.642	////////	////////	[mm <sup>2</sup> ]
La section d'un conducteur efficace	10.642	////////	////////	[mm <sup>2</sup> ]
La section du cuivre dans l'encoche	127,7097	////////	////////	[mm <sup>2</sup> ]
La section de l'encoche rotorique	212.59	////////	////////	[mm <sup>2</sup> ]
Le coefficient D'utilisation de l'encoche rotorique	0.60	////////	////////	
Le facteur de courant $k_i$	0,9	10,4021	10,4021	
Le courant rotorique $I_2$	117,0672	684,9838	684,9838	[A]
La densité du courant $J_2$	5,5	3	////////	[A/m <sup>2</sup> ]
La section de la barre	////////	228,3279	////////	[mm <sup>2</sup> ]
$b_f$		1.5	1.5	[mm]
$h_f$		0.7	0.7	[mm]
$h'_f$		0.3	0.3	[mm]
$k_f$	0.97	0.97	0.97	
$b_{z2}$	1.7	1.9		[T]
la largeur admissible des dents au :	10.4638	8.4833	14.8951	[mm]
prés de L'entrefer				
//            Au milieu	8.3792	8.3500	9.8521	[mm]
//            Au fond	6.2947	8.2166	4.8090	[mm]
Les dimensions de l'encoche $b_1$		9.4104	4	[mm]

	$b_2$		3.2265	4	[mm]
	$h_1$		37.3999	//////	[mm]
La hauteur de la barre		//////	//////	60	[mm]
La hauteur totale de l'encoche			44.7184	61	[mm]
La section de la barre	127,7097		275.1737	240	[mm <sup>2</sup> ]
La densité du courant de la barre	5.5		2.4893	2.8541	[A/m <sup>2</sup> ]
La densité du courant dans les anneaux circuitages	////////		1.9914	2.2833	[A/m <sup>2</sup> ]
Le courant des anneaux circuitages	//////		2080,8	2080,8	[A]
La section des anneaux circuitages	//////		1.0449e+03	911.3301	[mm <sup>2</sup> ]
Les dimensions des anneaux circuitages	ban	//////	55.8980	76.25	[mm]
	Aan		18.6928	11.9519	[mm]

### V.6. Calcul du circuit magnétique:

		bobiné	cage	profondi	unite
l'induction dents statorique au prés $B_{z1}$		1.9	1.9	1.9	[T]
l'induction dents rotorique au prés de l'entrefer $B_{z2}$		1.494	1.838	1.0496	[T]
	// Au milieu	1.659	1.500	1.1633	[T]
	// Au fond	1.931	1.152	1.5156	[T]
hauteur du dos du stator $h'_a$		36.0286	36.028	27.2475	[mm]
l'induction dos du stator $B_a$		1.5	1.5	1.5	[T]
hauteur du dos du rotor $h'_j$		47.776	35.395	27.247	[mm]
l'induction dos du rotor $B_j$		1.093	1.555	1.151	[T]
Facteur de carter $k_\delta$		1.389	1.377	1.173	
FMM dans l'entrefer $F_\delta$		1108,2	1735,9	977.359	[At]
champ magnétique $H_{z1}$		21.767	1.289	1.289	[A / m]
FMM de la zone dentaire du stator $F_{z1}$		124.47	124.47	44.94	[At]
champ magnétique $H_{z2}$		0.800	1.214	0.2645	[A / m]
	au prés de l'entrefer				

//	Au milieu	0.999	0.808	0.4015	[A /m]
//	Au fond	1.332	0.388	0.8260	[A /m]
FMM de la zone dentaire du stator $F_{z2}$		62,92	74.480	44.9489	[At]
Le coefficient de saturation $K_{\mu d}$		1,1691	1.1146	1.329	
densités du champ magnétique $H_a$		5.062	5.739	5.062	[A /m]
La longueur de la ligne moyenne magnétique du dos statorique $L_a$		253,6611	253.661	253.661	[mm]
FMM de la dos du stator $F_a$		131,903	131.903	131.903	[At]
densités du champ magnétique $H_j$		2.099	5.7394	2.363	[A /m]
La longueur de la ligne moyenne magnétique du dos rotorique $L_j$		102,3737	92.649	86.250	[mm]
FMM de la dos du rotor $F_j$		21,4935	53,175	20,388	[At]
FMM par deux poles $F_\epsilon$		1448,9	2119,9	1299,1	[At]
Coefficient de saturation du circuit magnétique $K_{scm}$		1,307	1,221	1.329	
Le courant d'aimantation $I_\mu$		16.291	23.836	14.606	[A]
La valeur relative $I_\mu^*$		22.76	33.301	20.406	

## V.7. Les paramètres des régimes de fonctionnement

### V.7.1. Les paramètres statorique

	valeurs	unite
coefficients $k_{fr}$	1,30	
langueur moyenne de la partie frontale $l_{fr1}$	263.781	[mm]
la longueur de la partie d'encoche $l_{en1}$	146,283	[mm]
la langueur moyenne d'une spire $l_{moy1}$	820,129	[mm]
langueur totale des conducteurs d'une phase $L_1$	5904,9	[mm]
la résistance spécifique $\rho$	2.4390e-08	
la résistance d'une phase statorique $r_1$	0.0585	[ $\Omega$ ]
$K'_\beta$	0.850	

$K_\beta$	0.887	
la perméance équivalente d'encoche $\lambda_{en1}$	1.562	
$K_{in}'$	1.2	
$\xi$	0.886	
La perméance équivalente différentielle $\lambda d_1$	1.322	
la perméance équivalente des parties frontales $\lambda_{fr1}$	1.500	
Réactance de fuite statorique $x_1$	0.170	[ $\Omega$ ]

### V.7.2. Les paramètres rotorique

	bobiné	cage	profonde	unite
les résistances spécifiques du matériaux de la barre $\rho_{b\theta}$	2.4390e-08	2.4390e-08	2.4390e-08	
les résistances spécifiques du matériaux de l'anneau $\rho_{an\theta}$	////////	4.5455e-08	4.5455e-08	
la résistance des barres $r_b$	////////	1.3127e-05	1.4855e-05	[ $\Omega$ ]
la résistance des deux éléments de l'anneau $2r_{\acute{e}an}$	////////	6.1841e-07	6.2802e-07	[ $\Omega$ ]
le diamètre moyeu de l'anneau $D_{anmoy}$	////////	171.9516	152.3014	
La résistance d'une phase rotorique $r_2$	0.0726	1.4364e-05	1.6111e-05	[ $\Omega$ ]
Le coefficient de réduction de la résistance $K$	3.3025	1370,6	1.3706e+03	
La résistance réduite $r_2'$	0.2396	0.0197	0.0221	[ $\Omega$ ]
la perméance équivalente d'encoche $\lambda_{en2}$	1.392	2.0472	5.4667	
$\Delta Z$	0.140	0.021	0.021	
$\xi$	0.860	0.979	0.979	
La perméance équivalente différentielle $\lambda d_2$	1.612	1.168	2.081	
la perméance équivalente des parties frontales $\lambda_{fr2}$	1.217	1.354	1.106	

Réactance inductive de la phase de l'enroulement rotorique $x_2$	0.062	2.7638e-04	5.1681e-04	[ $\Omega$ ]
La réactance rotorique réduite à l'enroulement statorique $x'_2$	0.205	0.378	0.708	[ $\Omega$ ]

### V.7.3. Calcul des pertes

	bobiné	cage	profonde	unite
pertes spécifiques pour l'induction $P_{1,0}/_{50}$	2.55	2.55	2.55	[Ohm.m]
masses de l'acier de la culasse du stator $m_a$	40.459	40.963	40.429	
masses de l'acier des dents statoriques $m_{z1}$	2.886	10.414	10.278	
Pertes principales dans l'acier du stator $P_{fp}$	419.240	548.616	541.457	[w]
$\beta_{01}$	0.32	0.32	0.32	
$\beta_{02}$	0.37	0.146	0.16	
l'amplitude du champ pulsatoire $B_{01}$	0.369	0.365	0.325	
l'amplitude du champ pulsatoire $B_{02}$	0.426	0.166	0.162	
$\gamma_2$	5.241	0.3753	0.823	
$B_{pul1}$	0.200	0.0226	0.0314	[w]
Pertes pulsatoires dans les dents statorique $P_{pul1}$	0.662	0.0306	0.0583	[w]
$\gamma_1$	2.938	1.4582	2.9380	
$B_{pul2}$	0.078	0.0690	0.0745	[w]
Pertes pulsatoires dans les dents rotorique $P_{pul2}$	0.051	0.7167	1.3280	[w]
Les pertes superficielle dans le stator $P_{sup1}$	61.847	61.1190	48.0730	[w]
Les pertes superficielle dans le stator	72.172	13.9953	13.1889	[w]

$P_{sup2}$				
$k_t$	0.833	0.833	0.8333	
Pertes mécanique et les pertes par ventilation $P_{méc}$	499.673	499.673	499.673	[w]
Pertes supplémentaires en régime nominale $P_{sn}$	209.039	209.039	209.039	[w]
Pertes électrique à vide $P_{el.o}$	46.572	90.122	33.683	[w]
Le courant à vide $I_{oa}$	0.91	1.839	1.723	[A]
la composante active du courant à vide $I_o$	16.317	23.907	14.707	[A]
Facteur de puissance à vide $\cos \varphi_o$	0.077	0.077	0.117	

### Calcul des caractéristiques de fonctionnement

	bobiné	cage	profonde	unite
$r_{12}$	0.526	0.321	0.846	[ $\Omega$ ]
$x_{12}$	13.333	9.036	14.899	[ $\Omega$ ]
$\sigma_1$	1.012	1.021	1.010	
$\gamma$	0.219	0.285	0.164	
$I_{oa}$	0.705	0.967	0.871	[A]
a	0.059	0.054	0.053	
b	0.383	0.592	0.888	

Formules g	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.060	0.070	0.080	0.09	0.1	0.2
$a'r'_2/g$	4.107	2.053	1.369	1.026	0.821	0.684	0.586	0.513	0.456	0.410	0.342	0.293	0.256	0.228	0.205	0.102
$b'r'_2/g$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R = R_1 + b'r'_2/g$	4.161	2.107	1.423	1.080	0.875	0.738	0.640	0.567	0.510	0.464	0.396	0.347	0.310	0.282	0.259	0.156
$Z = \sqrt{R^2 + X_{cc}^2}$	4.203	2.189	1.541	1.232	1.0573	0.947	0.872	0.820	0.782	0.753	0.713	0.687	0.669	0.6564	0.647	0.613
	54.88	106.09	152.15	192.45	227.00	256.25	280.84	301.48	318.81	333.39	356.22	372.88	385.34	394.85	402.27	431.60
$\sin\phi'_2 = X_{cc}/Z$	0.141	0.270	0.384	0.480	0.560	0.625	0.679	0.722	0.757	0.786	0.831	0.862	0.885	0.902	0.916	0.966
$\cos\phi'_2 = R/Z$	0.990	0.962	0.923	0.876	0.828	0.780	0.734	0.691	0.652	0.617	0.555	0.505	0.464	0.429	0.400	0.255
$I_{1a} = I_{oa} + I''_2 \cos\phi'_2$	53.65	98.56	133.57	158.32	174.15	183.03	186.87	187.26	185.38	182.08	173.36	163.78	154.49	145.92	138.18	93.57
$I_{1r} = I_u + I''_2 \sin\phi'_2$	23.83	31.21	51.03	78.69	109.63	140.47	169.22	194.96	217.49	236.95	280.33	300.10	314.99	326.42	335.36	370.78
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$	59.59	110.53	157.24	198.30	233.58	263.48	288.64	309.76	327.49	342.42	365.79	382.85	395.61	405.35	412.95	443.00
$I_2' = \sigma_1 I_2'$	53.45	102.62	145.74	182.27	212.53	237.27	257.43	273.85	287.28	298.34	315.16	327.08	335.78	342.31	347.33	366.54
	35.40	65.05	88.15	104.49	114.94	120.79	123.33	123.59	122.35	120.17	114.41	108.09	101.96	96.31	91.20	61.75
$\Delta P_{c1} = 3I_1^2 r_1$	0.611	1.954	3.812	5.882	7.941	9.856	11.568	13.065	14.358	15.467	17.233	18.540	19.525	20.279	20.868	23.195
$\Delta P_{c2} = 3I_1^2 r_2'$	0.168	0.622	1.254	1.962	2.667	3.325	3.914	4.429	4.874	5.257	4.432	4.76	5.022	5.216	5.368	7.935
$\Delta P_{com} = \Delta P_{comnom} \left(\frac{I_1}{I_{1nom}}\right)^2$	0.157	0.502	0.980	1.513	2.042	2.535	2.975	3.360	3.693	3.978	5.866	6.318	6.659	6.920	7.125	5.966
$\sum \Delta P = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{com} + \Delta P_f + \Delta P_{mec}$	1.985	4.127	7.095	10.406	13.699	16.765	19.507	21.904	23.974	25.751	28.581	30.677	32.255	33.464	34.410	38.146
$P_2 = P_1 - \sum \Delta P$	33.42	60.92	81.06	94.08	101.24	104.03	103.82	101.68	98.38	94.42	85.83	77.42	69.71	62.84	56.791	23.61
$\eta = P_2/P_1$	0.9439	0.9366	0.9195	0.9004	0.8808	0.861	0.841	0.822	0.804	0.785	0.750	0.716	0.683	0.652	0.622	0.382
$\cos\phi = I_{1a}/I_1$	0.864	0.888	0.861	0.822	0.778	0.734	0.692	0.652	0.616	0.583	0.526	0.479	0.440	0.408	0.381	0.244

Tableau. V.1 caractéristiques de fonctionnement moteur asynchrone a rotor à cage

Formules	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.22	0.18	0.14	0.1	0.06	0.02	0.00
$\xi = 63,61 h_B \sqrt{g}$	2.780	2.638	2.487	2.326	2.154	1.966	1.758	1.523	1.304	1.179	1.040	0.879	0.681	0.393	0
$\varphi = f(\xi)$	1.780	1.638	1.487	1.326	1.154	0.966	0.758	0.523	0.304	0.179	0.040	-0.120	-0.3188	-0.606	inf
$K_r = S_B / S_r$	1.887	1.982	2.104	2.268	2.499	2.850	3.443	4.613	8.961	8.268	7.402	6.270	4.689	2.175	0
$K_R = 1 + \frac{rb}{r_2}(k_r - 1)$	1.811	1.897	2.009	2.159	2.370	2.691	3.232	4.301	8.275	7.643	6.851	5.816	4.371	2.074	0.086
$r'_{2\xi} = K_r r'_2$	0.035	0.037	0.039	0.042	0.046	0.053	0.063	0.084	0.162	0.150	0.134	0.114	0.086	0.040	0.001
$K_d = f(\xi) = \varphi'$	0.539	0.568	0.603	0.644	0.696	0.762	0.852	0.984	1.150	1.271	1.441	1.705	2.202	3.814	inf
$k_x = \frac{\sum \lambda 2\xi}{\sum \lambda 2}$	0.840	0.8508	0.862	0.877	0.895	0.918	0.949	0.994	1.051	1.093	1.152	1.244	1.415	1.973	inf
$x'_{2\xi} = k_x x'_2$	0.318	0.322	0.326	0.332	0.339	0.347	0.359	0.376	0.398	0.414	0.436	0.471	0.536	0.747	inf
$x_{1sat} = x_1 \sum \lambda_{1sat} / \sum \lambda_1$	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191
$x'_{2\xi sat} = x'_2 (\sum \lambda_{2\xi sat} / \sum \lambda_2)$	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290
$C_{1ensat} = 1 + (x_{1sat} / x_{12d})$	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017
$a_{en} = r_1 + C_{1ensat} r'_{2\xi} / g$	0.072	0.0747	0.077	0.080	0.085	0.092	0.101	0.118	0.142	0.1619	0.193	0.249	0.380	1.034	inf
$b_{en} = x_{1sat} + C_{1ensat} x'_{2\xi sat}$	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486
$I'_2 = V_{1nom} / \sqrt{a_{en}^2 + b_{en}^2}$	446.96	446.67	446.29	445.78	445.07	444.01	442.30	439.1	433.79	428.80	420.06	402.27	356.22	192.45	0.00
$I_1 = I'_2 \cdot \sqrt{a_{en}^2 + (b_{en} + x_{12d})^2} / C_{1ensat} \cdot x_{12d}$	458.73	458.43	458.04	457.52	456.79	455.71	453.95	450.69	445.24	440.12	431.17	412.95	365.79	198.30	0.00
$I^* = I_1 / I_{1nom}$	6.409	6.404	6.399	6.392	6.381	6.366	6.342	6.296	6.220	6.149	6.024	5.769	5.110	2.770	0.00
$C^* = (I'_2 / I_{2n})^2 \cdot k_r (g_n / g)$	0.575	0.626	0.687	0.762	0.856	0.978	1.141	1.371	1.633	1.800	1.988	2.162	2.113	0.858	0.00
$C_d = C^* \cdot C_n$	135.53	147.52	161.93	179.58	201.72	230.36	268.83	323.10	384.81	424.04	468.38	509.41	497.84	202.25	0.00

Tableau. V.2 caractéristiques de démarrage moteur asynchrone a rotor à cage

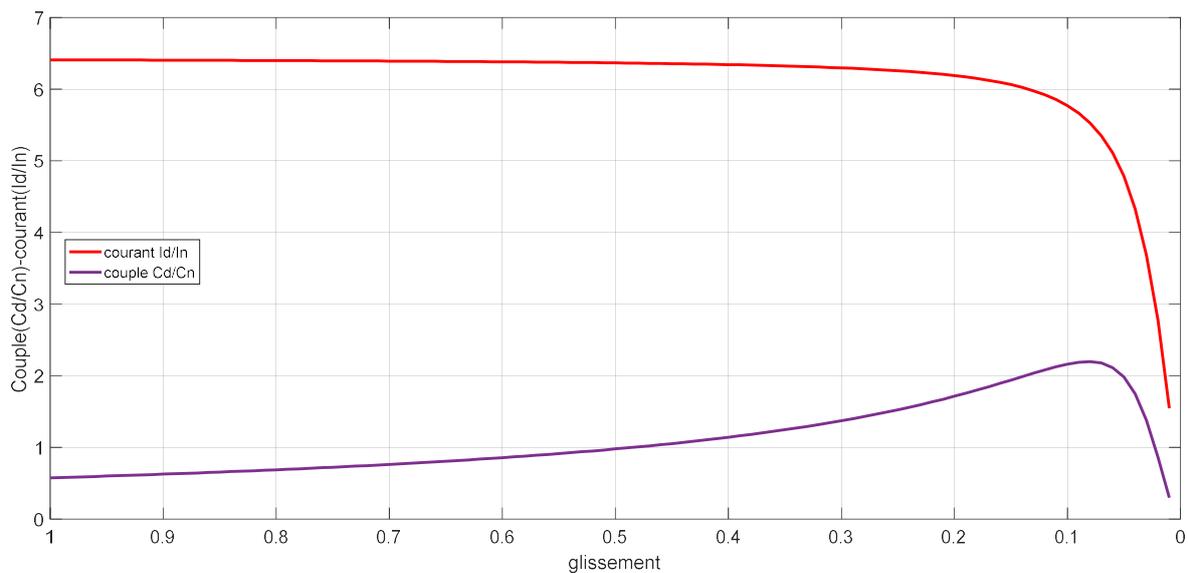


Fig. V. 1 Courant et Couple de démarrage pour (rotor à cage)

Le courant absorbé atteint au démarrage une valeur maximale  $I_{max}=6,4.I_{nominal}$ , qui dépasse 6 fois le courant nominal et qui reste constante allant de  $g=1$  jusqu'à  $g=0,3$ . Le courant absorbé commence à diminuer progressivement à partir de  $g=0,3$  jusqu'à atteindre une valeur minimale de 25 à 30% du courant nominal .

Le couple électromagnétique est de 57 % le couple nominale au démarrage, il commence à augmenter d'une façon inversement proportionnelle au glissement jusqu'à une valeur maximale 2,16 au voisinage du fonctionnement nominal, puis commence à diminuer jusqu'à une valeur nulle à l'arrêt.

Formules	g	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.1	0.2
$a'r'_2/g$		4.513	2.256	1.504	1.128	0.902	0.752	0.644	0.564	0.501	0.451	0.376	0.322	0.282	0.250	0.225	0.112
$b'r'_2/g$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R = R_1 + b'r'_2/g$		4.619	2.363	1.610	1.234	1.009	0.858	0.751	0.670	0.607	0.557	0.482	0.428	0.388	0.357	0.332	0.219
$Z = \sqrt{R^2 + X_{cc}^2}$		4.704	2.524	1.839	1.521	1.344	1.235	1.163	1.113	1.076	1.049	1.011	0.986	0.969	0.957	0.948	0.915
$\sin\phi'_2 = X_{cc}/Z$		0.188	0.351	0.483	0.584	0.660	0.719	0.763	0.798	0.825	0.846	0.878	0.900	0.916	0.927	0.936	0.970
$\cos\phi'_2 = R/Z$		0.982	0.936	0.875	0.811	0.750	0.694	0.645	0.602	0.564	0.531	0.477	0.434	0.400	0.373	0.350	0.239
$I_{1a} = I_{oa} + I''_2 \cos\phi'_2$		47.69	83.34	106.49	119.17	124.58	125.51	123.86	120.84	117.17	113.28	105.62	98.70	92.67	87.46	82.98	59.37
$I_{1r} = I_u + I''_2 \sin\phi'_2$		23.43	45.27	72.36	99.07	122.74	142.64	159.00	172.36	183.27	192.23	205.82	215.44	222.48	227.78	231.87	248.01
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$		51.17	94.39	130.25	158.74	180.96	198.23	211.70	222.32	230.77	237.59	247.75	254.83	259.94	263.77	266.71	255.02
$I_2' = \sigma_1 I_2'$		47.27	88.09	120.89	146.20	165.42	180.00	191.16	199.80	206.59	212.01	219.98	225.44	229.36	232.26	234.48	243.03
		31.48	55.00	70.28	78.65	82.22	82.83	81.74	79.75	77.33	74.76	69.71	65.14	61.16	57.72	54.76	39.18
$\Delta P_{c1} = 3I_1^2 r_1$		0.891	2.840	5.234	7.583	9.658	11.39	12.82	13.99	14.94	15.71	16.89	17.73	18.34	18.79	19.15	20.53
$\Delta P_{c2} = 3I_1^2 r_2'$		0.148	0.514	0.968	1.416	1.812	2.146	2.420	2.644	2.827	2.977	3.2056	3.366	3.484	3.573	3.642	3.912
$\Delta P_{com} = \Delta P_{comnom} \left(\frac{I_1}{I_{1nom}}\right)^2$		0.115	0.367	0.676	0.980	1.248	1.473	1.657	1.808	1.930	2.031	2.183	2.291	2.370	2.429	2.474	2.653
$\sum \Delta P = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{com} + \Delta P_f + \Delta P_{mec}$		2.196	4.762	7.920	11.02	13.76	16.05	17.94	19.48	20.74	21.77	23.33	24.43	25.23	25.84	26.30	28.14
$P_2 = P_1 - \sum \Delta P$		29.28	50.24	62.36	67.63	68.46	66.77	63.80	60.27	56.59	52.99	46.38	40.71	35.92	31.88	28.45	11.04
$\eta = P_2/P_1$		0.930	0.913	0.887	0.859	0.832	0.806	0.780	0.755	0.731	0.708	0.665	0.625	0.587	0.552	0.519	0.281
$\cos\phi = I_{1a}/I_1$		0.8975	0.8787	0.8271	0.7690	0.7124	0.6606	0.6145	0.5741	0.5387	0.5077	0.4566	0.4165	0.3845	0.3585	0.3369	0.2328

Tableau. V.3 caractéristique de fonctionnement de moteur asynchrone a rotor a encoche profondes

Formules	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.22	0.18	0.14	0.1	0.06	0.02	0.00
$g$															
$= 63,61 h_B \sqrt{g}$	3.816	3.620	3.413	3.193	2.956	2.698	2.413	2.090	1.790	1.619	1.428	1.206	0.934	0.539	0
$\varphi = f(\xi)$	2.816	2.620	2.413	2.193	1.956	1.698	1.413	1.090	0.790	0.619	0.428	0.206	-0.065	-0.460	-1
$K_r = S_B / S_r$	3.816	3.620	3.413	3.193	2.956	2.698	2.413	2.090	1.790	1.619	1.428	1.206	0.934	0.539	0
$K_R = 1 + \frac{rb}{r_2}(k_r - 1)$	3.597	3.416	3.225	3.022	2.803	2.566	2.303	2.005	1.728	1.571	1.394	1.190	0.939	0.575	0.078
$r'_{2\xi} = K_r r'_2$	0.079	0.075	0.071	0.066	0.061	0.056	0.050	0.044	0.038	0.034	0.030	0.0263	0.0208	0.012	0.001
$K_d = f(\xi) = \varphi'$	0.393	0.414	0.439	0.469	0.507	0.555	0.621	0.717	0.837	0.926	1.050	1.242	1.604	2.779	Inf
$k_x = \frac{\sum \lambda_2 \xi}{\sum \lambda_2}$	0.649	0.661	0.676	0.693	0.715	0.743	0.781	0.836	0.906	0.957	1.029	1.140	1.349	2.027	Inf
$x'_{2\xi} = k_x x'_2$	0.459	0.468	0.478	0.491	0.506	0.526	0.553	0.592	0.642	0.678	0.728	0.807	0.955	1.436	Inf
$x_{1sat} = x_1 \sum \lambda_{1sat} / \sum \lambda_1$	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161
$x'_{2\xi sat} = x'_2 (\sum \lambda_{2\xi sat} / \sum \lambda_2)$	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620
$C_{1ensat} = 1 + (x_{1sat} / x_{12d})$	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008
$a_{en} = r_1 + C_{1ensat} r'_{2\xi} / g$	0.074	0.076	0.079	0.083	0.089	0.096	0.107	0.125	0.151	0.173	0.208	0.270	0.416	1.143	inf
$b_{en} = x_{1sat} + C_{1ensat} x'_{2\xi sat}$	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787
$I'_2 = V_{1nom} / \sqrt{a_{en}^2 + b_{en}^2}$	278.31	278.23	278.12	277.98	277.78	277.48	276.99	276.07	274.49	272.97	270.23	264.34	247.12	158.49	0.00
$I_1 = I'_2 \cdot \sqrt{a_{en}^2 + (b_{en} + x_{12})^2} / C_{1ensa} \cdot x_{12}$	287.04	286.95	286.84	286.70	286.49	286.19	285.68	284.73	283.11	281.54	278.72	272.65	254.92	163.71	0.00
$I^* = I_1 / I_{1nom}$	4.010	4.009	4.007	4.005	4.002	3.998	3.991	3.978	3.955	3.933	3.894	3.809	3.561	2.287	0.00
$C^* = (I'_2 / I_{2n})^2 \cdot k_r (g_n / g)$	0.630	0.663	0.703	0.751	0.810	0.885	0.9868	1.1319	1.269	1.383	1.530	1.719	1.915	1.358	0.00
$C_d = C^* \cdot C_n$	148.41	156.34	165.70	176.96	190.87	208.64	232.44	266.62	424.39	462.54	511.59	574.863	640.233	453.95	0.00

Tableau. V.4 caractéristiques de démarrage moteur asynchrone a rotor à encoches profondes

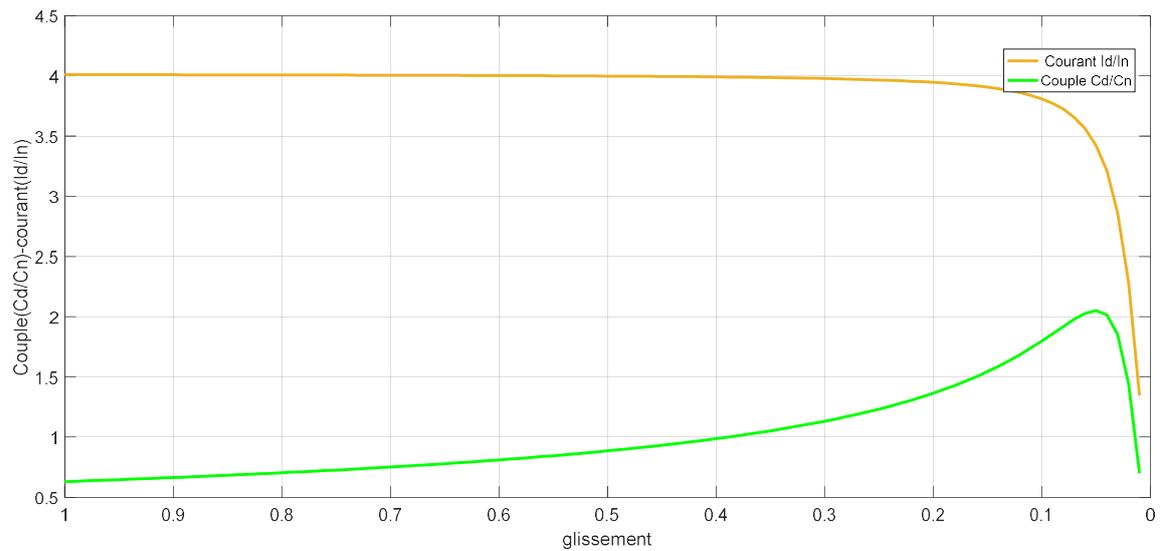


Fig. V. 2 Courant et Couple de démarrage pour (encoches profondes)

Le courant absorbé atteint au démarrage une valeur maximale  $I_{max}=4.I_{nominal}$ , qui dépasse 4 fois le courant nominal et qui reste constante allant de  $g = 1$  jusqu'à  $g=0,24$ . Le courant absorbé commence à diminuer progressivement à partir de  $g = 0,24$  jusqu'à atteindre une valeur minimale de 25 à 30% le courant nominal .

Le couple électromagnétique est de 63 % le couple nominale au démarrage, il commence à augmenter d'une façon inversement proportionnelle au glissement jusqu'à une valeur maximale 1.91 au voisinage du fonctionnement nominal, puis commence à diminuer jusqu'à une valeur nulle à l'arrêt.

Formules	g	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.1	0.2
$a'r'_2/g$		40.97	20.48	13.65	10.24	8.194	6.828	5.852	5.121	4.552	4.097	4.097	3.511	3.072	2.731	2.458	1.229
$b'r'_2/g$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R = R_1 + a'r'_2/g$		41.02	20.544	13.71	10.30	8.253	6.887	5.912	5.180	4.611	4.156	4.156	3.571	3.132	2.790	2.517	1.288
$Z = \sqrt{R^2 + X_{cc}^2}$		41.03	20.54	13.72	10.30	8.262	6.898	5.924	5.194	4.627	4.173	4.173	3.591	3.155	2.816	2.546	1.344
		5.361	10.70	16.03	21.34	26.62	31.89	37.13	42.35	47.54	52.70	52.70	61.25	69.721	78.10	86.39	163.66
$\sin\varphi'_2 = X_{cc}/Z$		0.009	0.018	0.027	0.037	0.046	0.055	0.064	0.073	0.082	0.091	0.091	0.106	0.121	0.136	0.150	0.285
$\cos\varphi'_2 = R/Z$		1.000	0.9998	0.9996	0.9993	0.998	0.998	0.997	0.997	0.996	0.995	0.995	0.994	0.992	0.990	0.988	0.958
$I_{1a} = I_{oa} + I''_2 \cos\varphi'_2$		6.271	11.61	16.93	22.23	27.50	32.75	37.96	43.14	48.28	53.39	53.39	61.81	70.11	78.28	86.31	157.77
$I_{1r} = I_u + I''_2 \sin\varphi'_2$		16.34	16.49	16.73	17.08	17.52	18.06	18.69	19.41	20.23	21.13	21.13	22.83	24.76	26.92	29.29	62.97
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$		17.50	20.17	23.81	28.04	32.61	37.40	42.31	47.31	52.35	57.42	57.42	65.89	74.36	82.78	91.15	169.88
$I_2' = \sigma_1 I_2'$		5.361	10.70	16.03	21.34	26.62	31.89	37.13	42.35	47.54	52.70	53.38	62.04	70.61	79.10	87.50	165.76
		4.139	7.666	11.17	14.67	18.15	21.61	25.05	28.47	31.87	35.24	35.24	40.79	46.274	51.66	56.97	104.13
$\Delta P_{c1} = 3I_1^2 r_1$		0.053	0.071	0.099	0.138	0.186	0.245	0.314	0.392	0.481	0.578	0.578	0.762	0.970	1.202	1.458	5.064
$\Delta P_{c2} = 3I_1^2 r_2'$		0.017	0.070	0.158	0.279	0.435	0.625	0.847	1.102	1.389	1.707	2.048	2.767	3.584	4.498	5.504	19.75
$\Delta P_{com} = \Delta P_{comnom} \left(\frac{I_1}{I_{1nom}}\right)^2$		0.012	0.016	0.023	0.032	0.043	0.057	0.073	0.0913	0.111	0.134	0.134	0.177	0.225	0.279	0.339	1.177
$\sum \Delta P = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{com} + \Delta P_f + \Delta P_{mec}$		0.503	0.577	0.700	0.869	1.085	1.347	1.654	2.005	2.401	2.840	3.181	4.125	5.200	6.400	7.720	26.41
$P_2 = P_1 - \sum \Delta P$		3.636	7.088	10.47	13.80	17.07	20.26	23.40	26.47	29.46	32.40	32.05	36.67	41.07	45.26	49.24	77.71
$\eta = P_2/P_1$		0.878	0.924	0.937	0.940	0.940	0.937	0.934	0.929	0.924	0.919	0.909	0.898	0.887	0.876	0.864	0.746
$\cos\varphi = I_{1a}/I_1$		0.358	0.575	0.711	0.793	0.843	0.875	0.897	0.911	0.922	0.929	0.929	0.938	0.942	0.945	0.946	0.928

Tableau. V.5 caractéristique de fonctionnement de moteur asynchrone a rotor bobiné

Formule g	$R_2 = a'r'_2/g$	$R_a$ $= R_1 + R_2$	$Z_{cc}$ $= \sqrt{R^2 + X_{cc}^2}$	$I'_{1cc}$ $= \frac{V_{1n}}{Z_{cc}}$	$I_{1cc}$ $= I'_{1cc} \cdot \sigma_1$	$I^*$ $= \frac{I_{1cc}}{I_{1n}}$	$C_d$ $= \frac{PmV^2_{1n}R_2}{w_1Z^2_{cc}}$	$C^* = \frac{C_d}{C_n}$
1	0.245	0.305	0.490	449.01	454.76	6.353	293.61	1.246
0.9	0.273	0.332	0.507	433.57	439.12	6.135	304.17	1.291
0.8	0.307	0.366	0.530	414.77	420.08	5.869	313.17	1.329
0.7	0.351	0.410	0.561	391.71	396.72	5.542	319.21	1.355
0.6	0.409	0.468	0.605	363.20	367.85	5.139	320.17	1.359
0.5	0.491	0.550	0.671	327.78	331.98	4.638	312.93	1.328
0.4	0.614	0.673	0.775	283.78	287.41	4.015	293.19	1.244
0.3	0.819	0.878	0.958	229.48	232.42	3.247	255.65	1.085
0.22	1.117	1.176	1.237	177.77	180.05	2.515	209.20	0.888
0.18	1.365	1.424	1.475	149.09	151.00	2.109	179.83	0.763
0.14	1.755	1.815	1.855	118.58	120.10	1.678	146.28	0.621
0.1	2.458	2.517	2.546	86.39	87.50	1.222	108.69	0.461
0.06	4.097	4.156	4.173	52.70	53.38	0.745	67.43	0.286
0.02	12.29	12.35	12.35	17.80	18.03	0.251	23.08	0.098
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau. V.6 caractéristiques de démarrage moteur asynchrone a rotor bobine

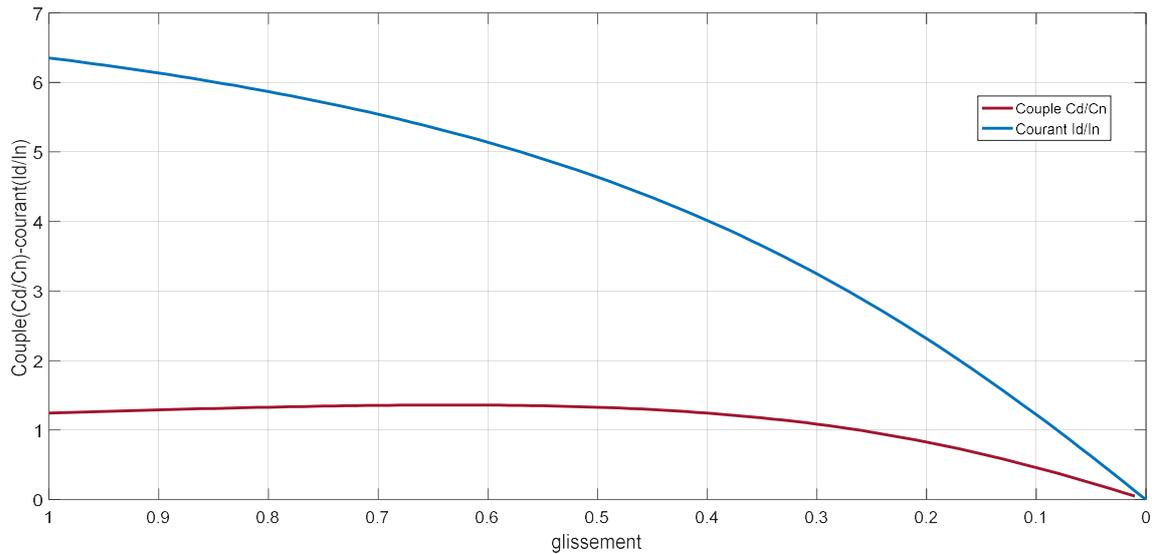


Fig. V. 3 Courant et Couple de démarrage pour ( rotor bobiné)

- Le courant absorbé atteint au démarrage une valeur maximale  $I_{max}=6.35.I_{nominal}$ , qui dépasse 6 fois le courant nominal et qui diminue progressivement de  $g=1$  jusqu'à  $g=0$  jusqu'à atteindre une valeur minimale proche de 0 . .
- Le couple électromagnétique est de 87 % le couple nominale au démarrage, il commence faiblement à augmenter d'une façon inversement proportionnelle au glissement jusqu'à une valeur maximale 0.95 au voisinage du fonctionnement nominal, puis commence à diminuer jusqu'à une valeur nulle à l'arrêt.

#### V.8. Conclusion :

L'examen des résultats de la procédure de dimensionnement à savoir les paramètres du schéma équivalent, ...etc. et leurs comparaisons avec celles du catalogue permet de conclure que l'approche de la méthode LIWSCHITZ donne des valeurs proches à ceux données par le constructeur malgré qu'elle est conditionnée par des courbes et des équations empiriques.

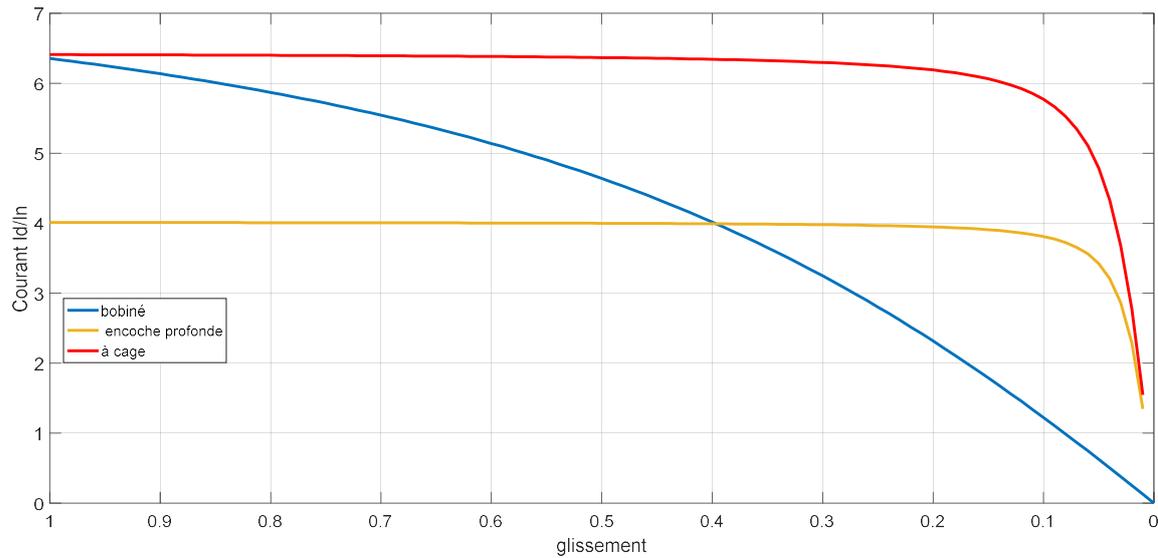


Fig. V.4 Courant de démarrage de la MAS à différent rotor

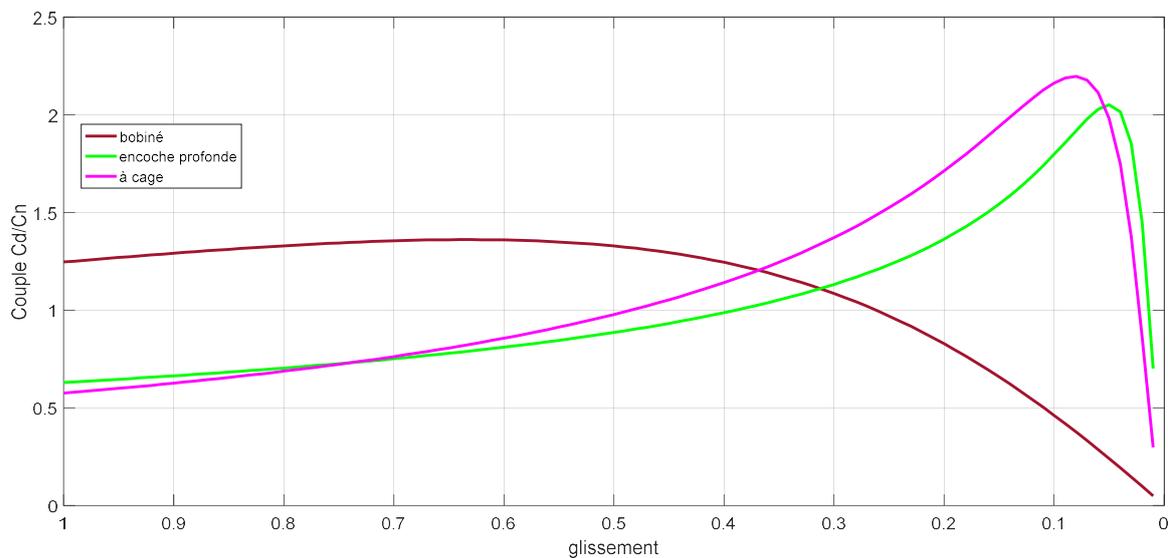


Fig. V.5 Couple de démarrage de la MAS à différent rotor

Pour que le rotor du moteur puisse tourner au démarrage, le couple de démarrage développé doit être supérieur au couple résistant sur l'arbre. D'autre part, la valeur du courant de démarrage ne doit pas dépasser certaines limites qui dépendent de la puissance du réseau. Pour cela on fait la comparaison des résultats obtenus avec les différents types de rotors :

Le courant absorbé atteint au démarrage le même pour la machine asynchrone à rotor à cage rotor bobiné ou, il est très grande par rapport le courant de démarrage pour rotor à encoche profonde.

Le couple très fort est le couple du rotor bobiné après le couple à encoche profonde

après tout encoche rotor à cage

Le couple max du rotor à cage fort a le couple du rotor a encoche profonde.

Le couple max du rotor bobiné presque égale le couple de démarrage.

-La marge de stabilité pour rotor à cage plus large que rotor à encoche profonde.

### V.9. Caractéristiques de démarrage

Les éléments principaux du démarrage sont le couple et le courant de démarrage.

Considères :

	Id [A]	Cd [Nm]
rotor a cage	458,73	135,53
rotor à encoche profondes	287.04	148,41
rotor bobiné	454,76	293.61

Le tableau ci-dessus donne les valeurs des couples et des courants de démarrage d'un moteur de 37 KW a rotor à cage, d'un moteur à encoche profondes, et d'un moteur à rotor bobiné, calculés dans les exemples précédant et ayant les mêmes dimension du stator et la même vitesse de rotation.

Généralement l'intensité du courant appelé au démarrage sous tension nominale ( $I_d/I_n$ ) est très importante alors que le couple est faible, une durée de démarrage longue et un échauffement excessif des enroulements.

Il est souhaitable de réduire l'intensité du courant appelé pendant le démarrage, aussi bien pour la machine que pour la ligne alimentant le moteur, il convient pour réduire la durée du régime transitoire. On distingue :

pour réduire l'intensité du courant ( $I_d$ ), consiste à réduire la tension appliqué au moteur.

pour augmenter le moment du couple ( $C_d$ ) conduisant a modifier l'impédances des enroulement rotoriques.

On a basé notre étude sur le deuxième procédé qui consiste à augmenté les impédances rotoriques, ou les valeurs du couple ont été améliorer on disposant :

### V.10. Démarrage par résistances rotoriques

Ce démarrage se fait en plaçant temporairement un ou plusieurs groupes de résistances en série avec le rotor. Ce système fonctionne suivant le principe de chute de

tension dans les résistances insérées en série avec le rotor. A la fin du démarrage, les résistances seront court circuitées. [3]

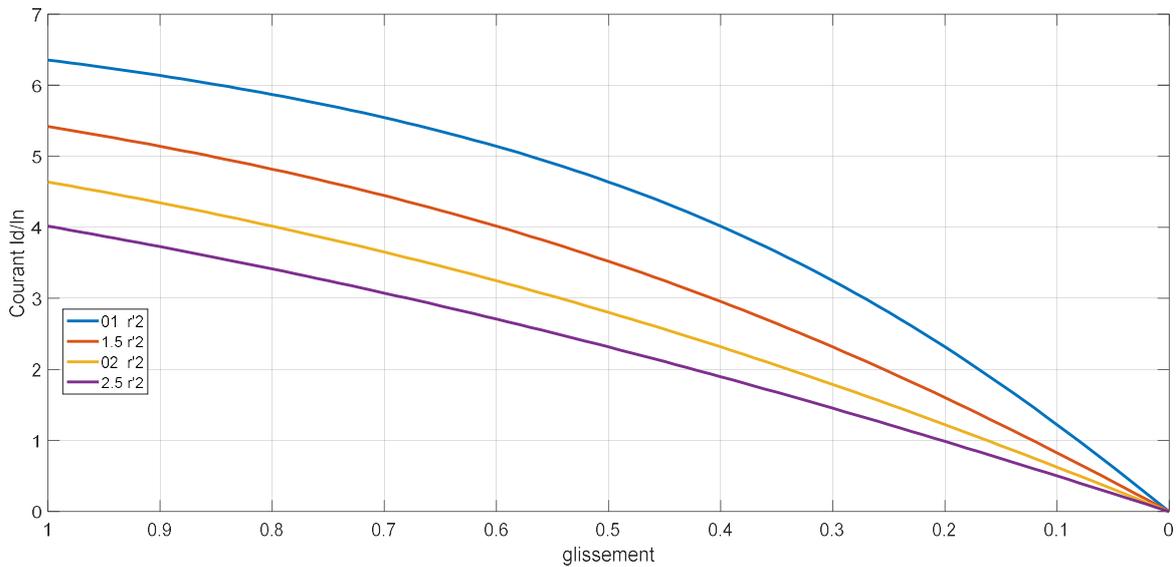


Fig. V.6 Courant de démarrage pour différent résistance rotorique

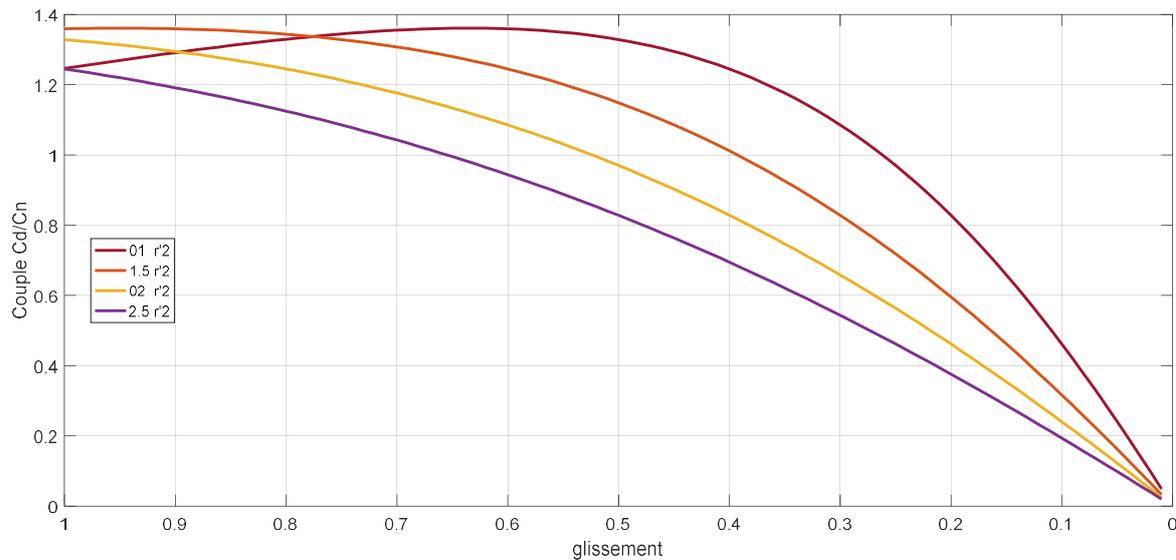


Fig. V.7 Couple de démarrage pour différent résistance rotorique

Le courant de démarrage diminué pour chaque augmentation de la résistance rotorique

Le couple de démarrage augment pour la résistance égale 1.5 fois la résistance rotorique et commence à diminuer pour chaque augmentation de la résistance.

Pour garder même couple de démarrage et diminuer le courant de démarrage la résistance démarrage doit être 150% la résistance origine de la machine.

## Conclusion

Le travail dont nous avons rendu compte dans ce mémoire, commence par des généralités sur les moteurs asynchrones et consiste essentiellement à réaliser un programme sous MATLAB, qui permet de calculer les dimensions principales et les différentes contraintes (électrique, magnétique...) dans les différentes parties d'un moteur asynchrone associé à trois types de rotors (à cage, encoche profonde et bobiné)

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principaux éléments de conception de la machine asynchrone, Une présentation des moteurs asynchrones a été faite, commençant avec les éléments de construction du moteur asynchrone triphasé. On a aussi donné les procédures de son calcul ainsi que les différentes méthodes de conception. Nous avons pris comme support de travail une méthode de calcul utilisée par la majorité des chercheurs dans le domaine de la conception et de l'analyse des machines,

Le deuxième chapitre, consiste en la prédétermination des dimensions principales de la zone de denture du stator et des enroulements statoriques.

Le troisième chapitre, on a calculé pour chaque type de rotor, la zone de denture rotorique, les enroulements rotoriques, ainsi que le circuit magnétique.

Le quatrième, on a établi les relations nécessaires au calcul des caractéristiques de fonctionnement et de démarrage pour un moteur asynchrone à cage, à encoches profondes, et à rotor bobiné.

Pour le dernier chapitre, les résultats obtenus ont été présentés pour le stator et les différents types de rotors, en plus de leur comparaison.

## Bibliographie

[1] **A.BOUTCHICHA et A.LACHACHE** “ Etude de la conception d’une machine asynchrone a encoches rotoriques ouvertes“, Mémoire master académique, universite mohamed boudiaf - m’sila.

[2] **R.P.BOUCARDE et G.OLIVIER** : Conception de moteurs asynchrones triphasés, édition L’Ecole Polytechnique, Montréal, 1997.

[3] **M. BENSMAINE, T. MEBAREK**, “Dimensionnement et Simulation d’un Moteur Asynchrone à Cage d’Ecureuil”, Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.

[4] **R. REDJEM**, “Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques”, Mémoire de magister en Electrotechnique, Université Mentouri Constantine, 2006.

[5] **A.ARZANDÉ** "CONCEPTION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE DE CAGE D'ÉCUREUIL RÉSUMÉ" Projet de fin d'études - Université pontificale de Comillas  
PEDRO MARTÍNEZ-OSORIO MARTÍN-RIVA Chef de projet: (Supélec) Diplôme d'Ingénieur en Génie Electromécanique Spécialité électrique juillet 2014

[6] **V.GRASSEVITCH et V.TROCHINS et A.TRAIAIA** “CALCUL DES MACHINES ASYNCHRONES“ , ELABORATION DES MACHINES ELECTRIQUES PARTIE 3

[7] **S. CHEKROUN**, “ Conception des Convertisseurs Electromagnétiques”, Cours en ligne, Université de M’sila.

# Annexe

# Annexe A

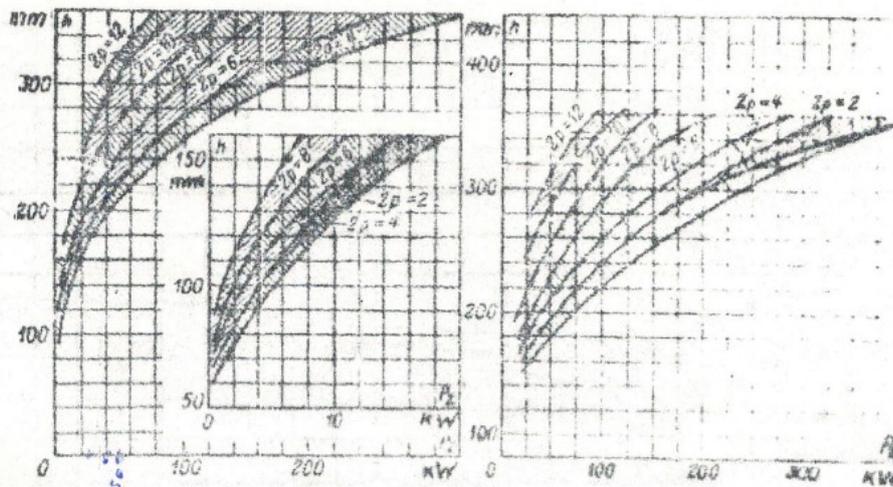


Fig. 1 La hauteur de L'axe de rotation des moteurs asynchrones

$$H=f(P_2, 2p) : a- \text{ pour IP 44 } ; b- \text{ pour IP23}$$

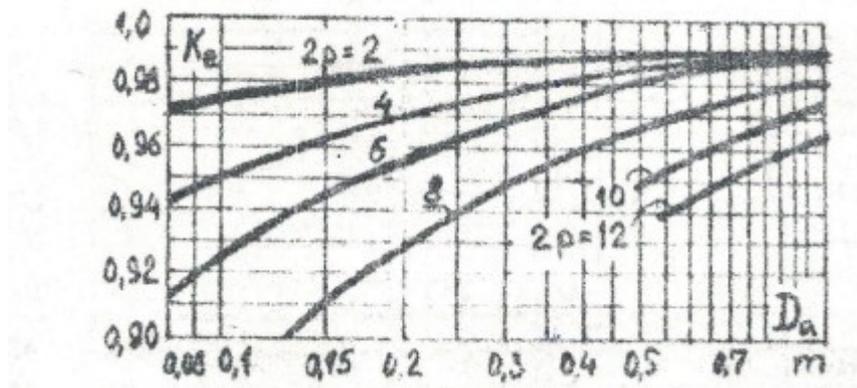


Fig. 2 Coefficient  $K_e = f(D_a)$

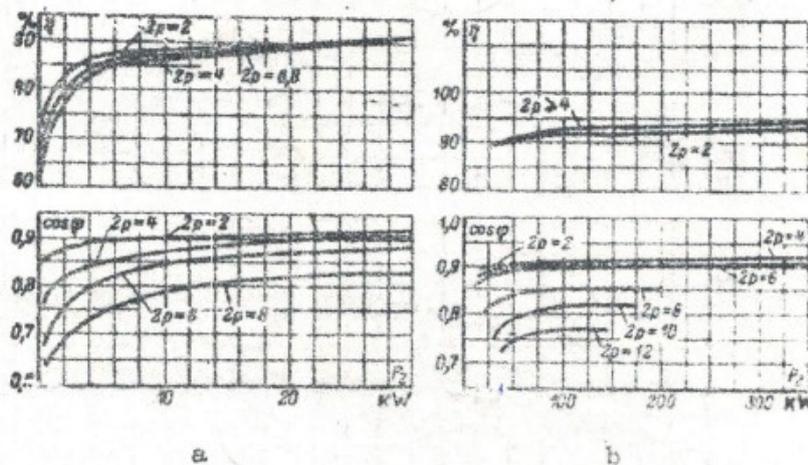


Fig. 3 Dépendance  $\eta, \cos \varphi = f(P_2)$  des moteurs asynchrones

a- pour  $P_2 < 30$  KW ; b- pour  $P_2 < 400$  KW

# Annexe A

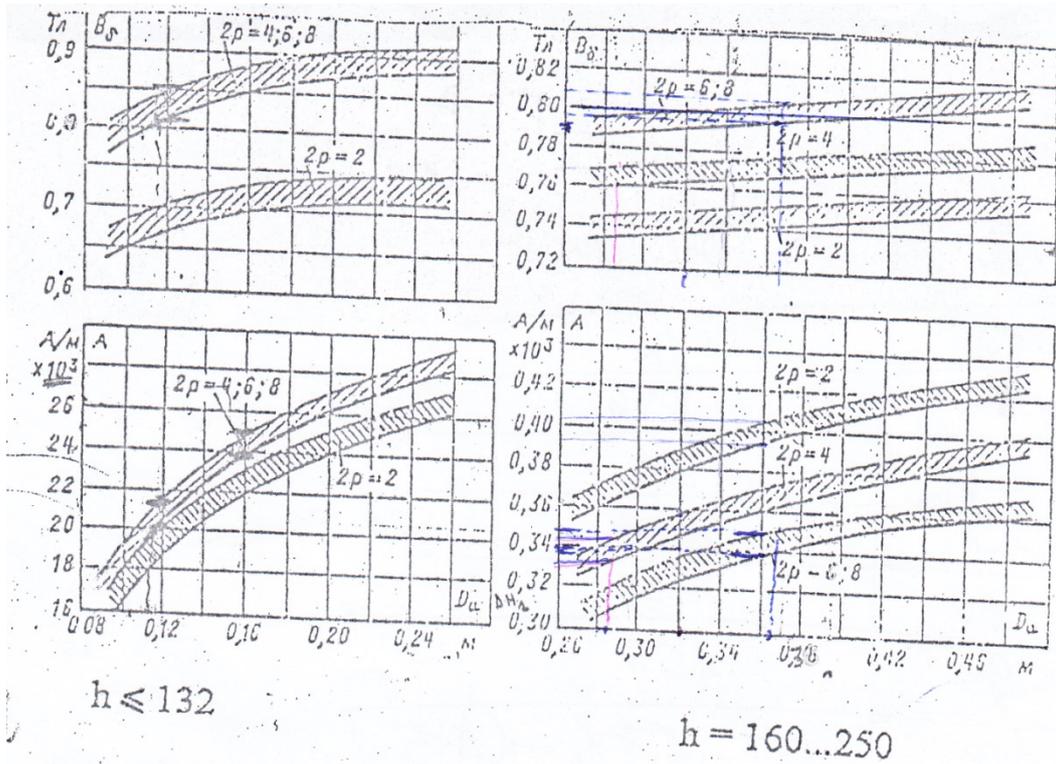


Fig. 4 Les charges électromagnétique A (A/m) et  $B_\delta$ (T)

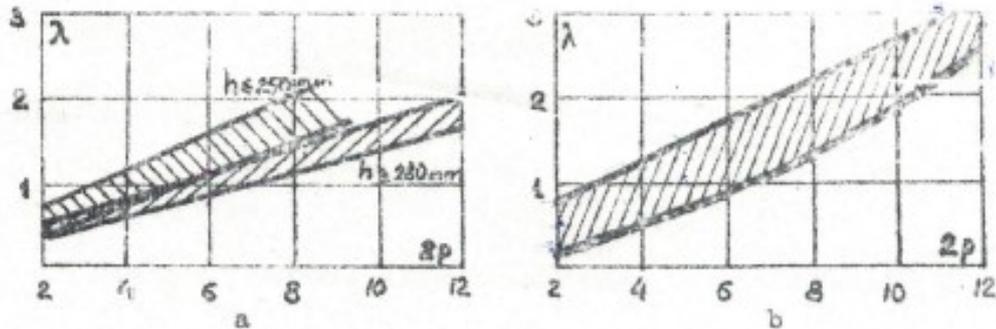


Fig. 5 Rapport  $\lambda$  pour des moteurs asynchrones

a- pour IP 44 ; b- pour IP 23

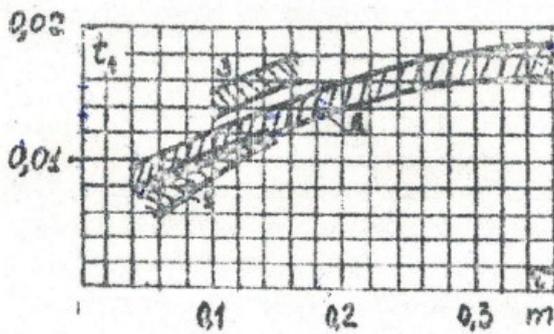


Fig. 6 Le pas dentaire du stator des moteurs asynchrone à enroulement monté fil à fil

1- pour  $h \leq 90 \text{ mm}$  ; 2- pour  $h = 100 \div 250 \text{ mm}$  ; 3- pour  $h \geq 280 \text{ mm}$ ,  $2p \geq 10$

# Annexe A

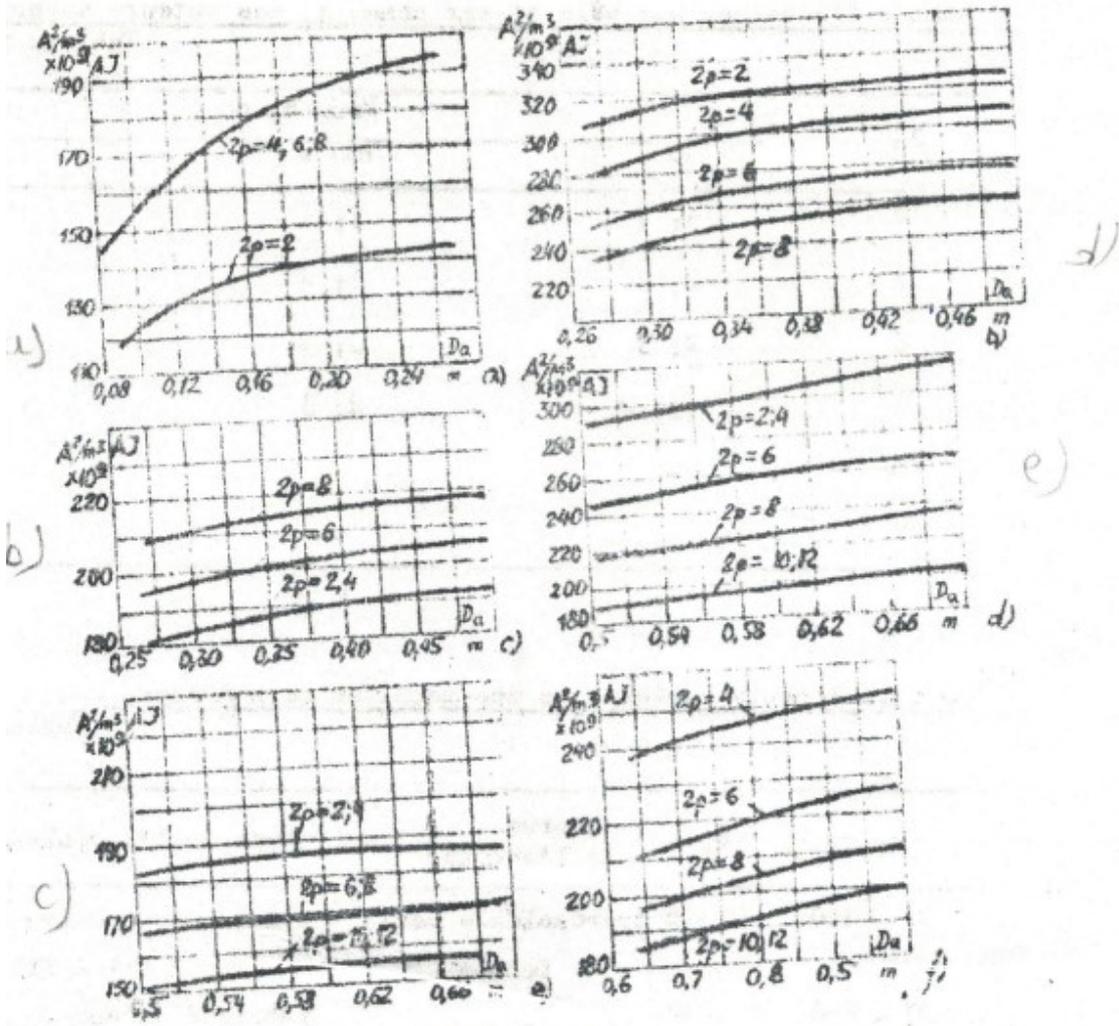


Fig. 7 Valeurs moyennes du produit AJ des moteurs asynchrones:  
 a - pour IP 44, h = 132 mm ; b - pour IP 44, h = 160 - 250 mm ;  
 c - pour IP 44, h = 280 - 355 mm ; d - pour IP 23, h = 160 - 250 mm  
 e - pour IP 23, h = 280 - 355 mm ; f - pour IP 23, U = 6000 V

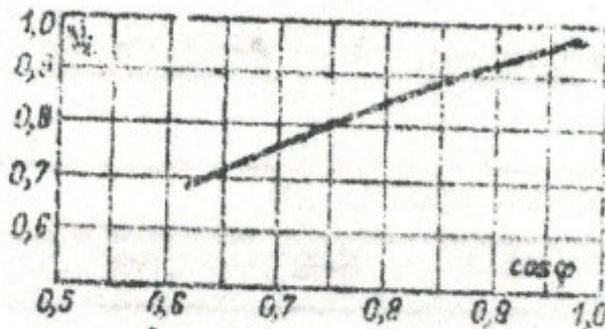


Fig. 8 Coefficient  $\eta_i$  on fonction du  $\cos \varphi$

# Annexe A

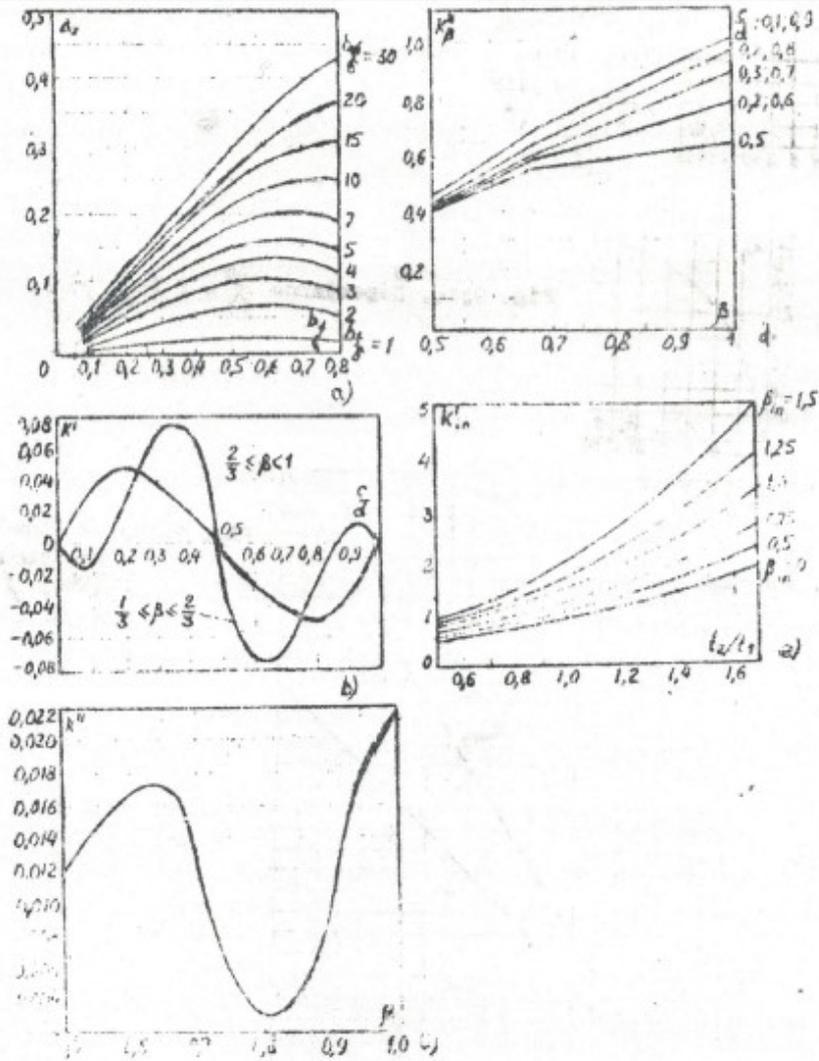


Fig. 9 Coefficient pour le calcul de la perméance différentielle

a-  $\Delta Z = f(b_f/t, b_f/\delta)$  ; b-  $k'$  en fonction de la partie fractionnaire du nombre d'encoches par pole et par phase  $q$  ( $q = b \div c/d$ ) ; c-  $k''$  En fonction du racourcissement du pas  $\beta$  ; d-  $k'_\beta$  en fonction de  $\beta$  et de  $c/d$ ; e-  $k_{in}$  en fonction du rapport  $t_2/t_1$  et  $\beta_{in}$

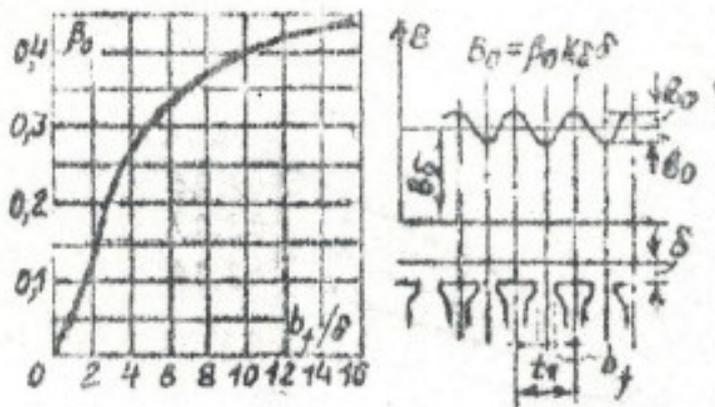


Fig. 10 Dépendance  $\beta_0 = f(b_f/\delta)$

## Annexe A

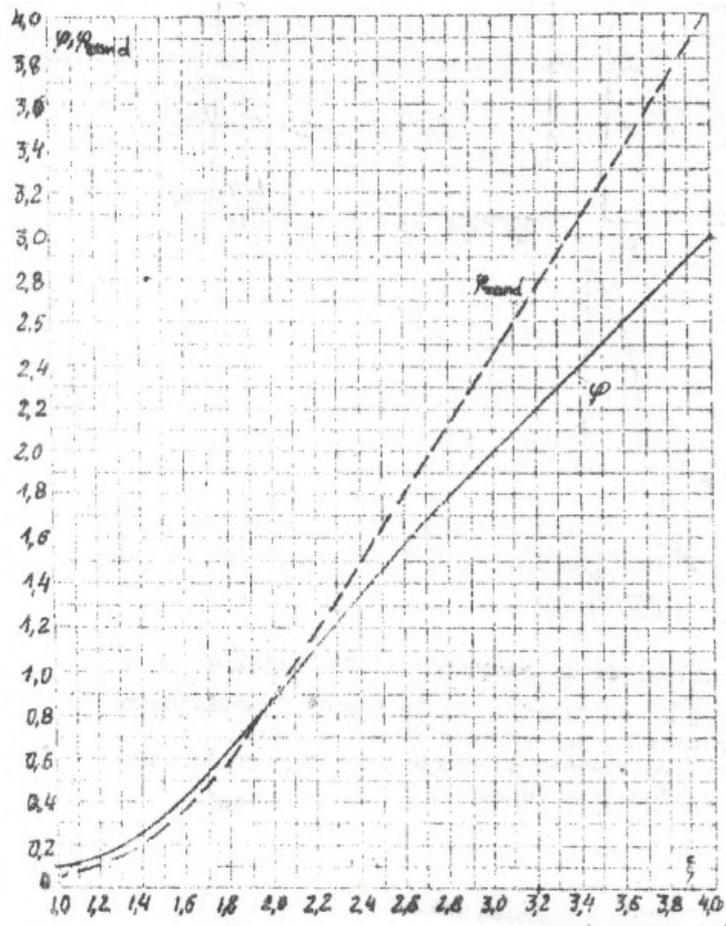


Fig. 11 Coefficients  $\varphi$  et  $\varphi_{\text{iron}}$  en fonction de  $\xi$  ( $\varphi \approx \xi - 1$  pour  $\xi > 4$  et  $\varphi \approx 4 \xi^{1/45}$  pour  $\xi < 1$ )

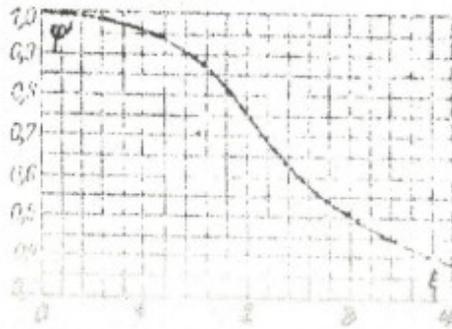


Fig. 12 Coefficient  $\varphi'$  en fonction de  $\xi$  ( $\varphi' = 3/2 \xi$  pour  $\xi > 1$ )

## Annexe A

---

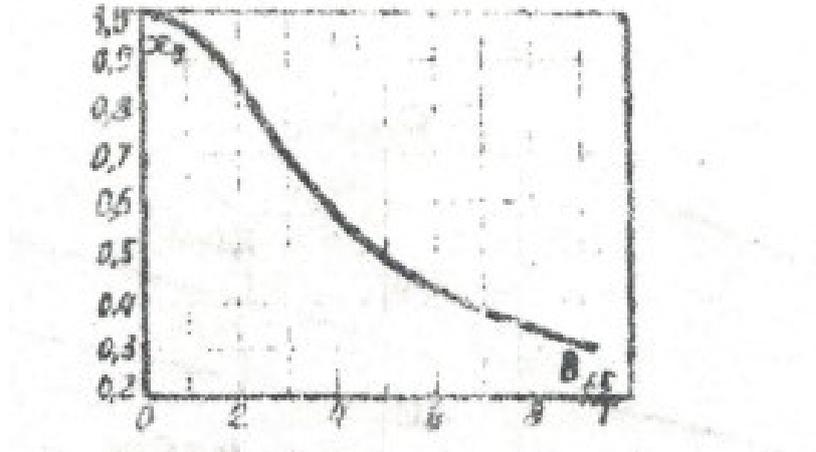


Fig. 13 Dépendance  $\mu_\delta = F ( B_{f\delta} )$

La hauteur de L'axe de rotation h, mm	Puissance P <sub>2</sub> KW, pour 2p						C <sub>2</sub> , Nm Pour n=1500tr/ min
	2	4	6	8	10	12	
<b>à rotor on court-circuit, IP 44, IC 0141</b>							
56	0.18	0.12	-	-	-	-	0.77
	0.25	0.18	-	-	-	-	1.15
63	0.37	0.25	0.18	-	-	-	1.59
	0.55	0.37	0.25	-	-	-	2.35
71	0.75	0.55	0.37	0.25	-	-	3.5
	1.1	0.75	0.55	-	-	-	4.75
80	1.5	1.1	0.75	0.37	-	-	7.0
	2.2	1.5	1.1	0.55	-	-	9.5
90	3.0	2.2	1.5	0.75	-	-	14
100	4	3.0	2.2	1.5	-	-	19
	5.5	4	-	-	-	-	25.4
112	7.5	5.5	3.0	2.2	-	-	35
	-	-	4	3.0	-	-	
132	11	7.5	5.5	4	-	-	47.4
	-	11	7.5	5.5	-	-	70
160	15	15	11	7.5	-	-	95.3
	18.5	18.5	15	11	-	-	118
180	22	22	18.5	15	-	-	140
	30	30	-	-	-	-	190
200	37	37	22	18.5	-	-	234.5
	45	45	30	22	-	-	284
225	55	55	37	30	-	-	349
250	75	75	45	37	-	-	474
	90	90	55	45	-	-	574
280	110	110	75	55	-	-	699
	132	132	90	75	-	-	838
315	160	160	110	90	55	45	1018
	200	200	132	110	75	55	1267
355	250	250	160	132	90	75	1592
	315	315	200	160	110	90	2006
400	-	315	250	200	-	-	2006
	-	400	315	250	200	-	2545
	-	500	400	-	-	-	3183
450	-	630	500	315	250	200	4012
	-	800	630	400	315	250	5094
	-	-	-	500	-	-	-

Tableau. 1 La hauteur de l'axe de rotation du moteur asynchrone H=(P<sub>2</sub>, 2p)

<b>H[mm]</b>	<b>DH<sub>1</sub> [mm]</b>
50	86
56	96
63	108
71	122
80	139
90	157
100	175
112	197
132	232
160	285
180	322
200	359
225	406
250	452
280	520
315	590
355	660
400	740
450	850
560	990

Tableau. 2 Diamètre extérieur du stator du station ( D<sub>a</sub>) DH<sub>1</sub>=f(H)

<b>2p</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8-12</b>
<b>K<sub>D</sub></b>	<b>0.25 - 0.57</b>	<b>0.64 - 0.68</b>	<b>0.70 - 0.72</b>	<b>0.74 - 0.77</b>

Tableau. 3 Rapport entre les diamètres D et extérieur Da K<sub>D</sub>=D/ Da

<b>2p</b>	<b>Pour h, mm</b>		
	<b>50-132</b>	<b>160-225</b>	<b>250-450</b>
<b>2</b>	<b>3 ; 4</b>	<b>5 ; 6</b>	<b>7 ; 8</b>
<b>4</b>	<b>2 ; 3</b>	<b>3 ; 4</b>	<b>4 ; 5</b>
<b>6</b>	<b>2 ; 3</b>	<b>3 ; 4</b>	<b>4 ; 5</b>
<b>8</b>	<b>1,5 ; 2</b>	<b>2 ; 3</b>	<b>3 ; 4</b>
<b>10</b>	<b>----</b>	<b>----</b>	<b>2 ; 3</b>
<b>12</b>	<b>----</b>	<b>----</b>	<b>2 ; 2,5</b>

Tableau. 4 Le nombre d'encoches par pole et par phase q<sub>1</sub> des moteurs asynchrones

H [mm]	2p	Forme de l'encoche	Type de l'enroulement
50-160	2-8	Trapézoïdale demi-fermée	Concentrique à une couche monté fil à fil
180-250	2-12	//	Imbriqué à deux couches monté fil à fil
280-315	10-12	//	//
280-355	2-8	Rectangulaire demi-ouverte	à deux couches en barre
400-450	2-12	Rectangulaire ouverte	à deux couches en barre

Tableau. 5 Le enroulements statoriques des machines asynchrones

Le diamètre du conducteur sans isolation, mm	La valeur moyenne du diamètre du conducteur avec isolation, mm	La surface de la section transversale du conducteur sans isolation, mm <sup>2</sup>	Le diamètre nominal du conducteur sans isolation, mm	La valeur moyenne du diamètre du conducteur avec isolation, mm	La surface de la section transversale du conducteur sans isolation, mm <sup>2</sup>
0.09	0.11	0.00636	0.53	0.585	0.221
0.10	0.122	0.00785	0.56	0.615	0.246
0.112	0.134	0.00985	0.60	0.655	0.283
0.125	0.147	0.01227	0.63	0.69	0.312
0.132	0.154	0.01368	0.67	0.73	0.353
0.14	0.162	0.01539	0.71	0.77	0.396
0.15	0.18	0.01767	0.75	0.815	0.442
0.16	0.19	0.0201	0.80	0.865	0.503
0.17	0.20	0.0227	0.85	0.915	0.567
0.18	0.21	0.0255	0.90	0.965	0.636
0.19	0.22	0.0284	0.95	1.015	0.709
0.20	0.23	0.0314	1.00	1.08	0.785
0.212	0.242	0.0353	1.06	1.14	0.883
0.224	0.259	0.0394	1.12	1.20	0.985
0.236	0.271	0.0437	1.18	1.26	1.094
0.25	0.285	0.0491	1.25	1.33	1.227
0.265	0.300	0.0552	1.32	1.405	1.368
0.28	0.315	0.0616	1.40	1.485	1.539
0.30	0.335	0.0707	1.50	1.585	1.767
0.315	0.350	0.0779	1.60	1.685	2.011
0.335	0.370	0.0881	1.70	1.785	2.27
0.355	0.395	0.099	1.80	1.895	2.54
0.375	0.415	0.1104	1.90	1.995	2.83
0.40	0.44	0.1257	2.00	2.095	3.14
0.425	0.465	0.1419	2.12	2.22	3.53
0.45	0.49	0.1590	2.24	2.34	3.94
0.475	0.515	0.1772	2.36	2.46	4.36
0.50	0.545	0.1963	2.50	2.60	4.91

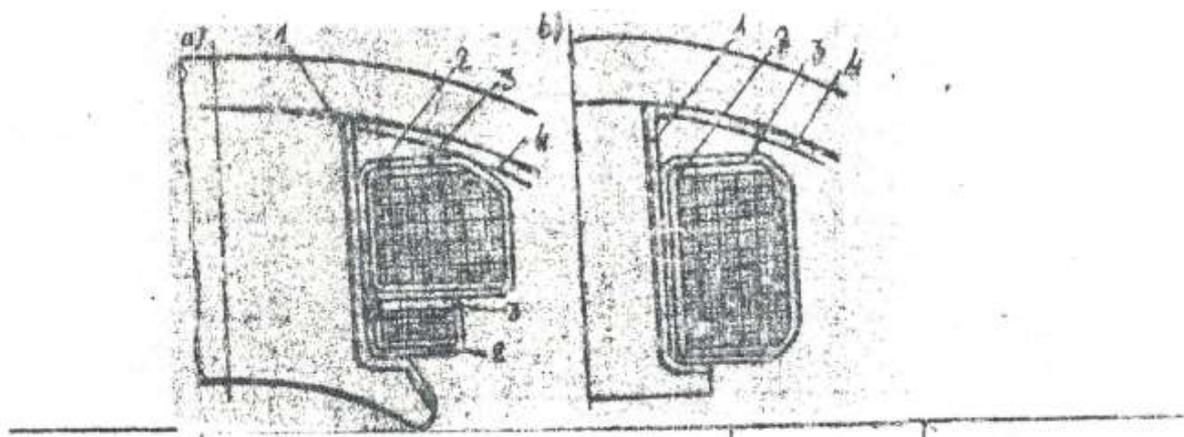
Tableau. 6 Fils ronds émaillés

Tronçons du circuit magnétique	Symboles	IP44					IP23					
		2p=2	4	6	8	10,12	2	4	6	8	10	12
Culas. du stat.	B <sub>a</sub>		3,4-3,6		3,8-3,85	3,9-3,2		3,45-3,6		3,3-3,4		3,1-3,3
Dents du stat. section const. enr. fil à fil	B <sub>st</sub>			3,7-3,9			3,9-3,1		3,8-2,0		3,7-3,9	
Dans la section la plus étroite encoche d-fermée	B <sub>simax</sub>			1,75-1,95			1,9-2,1		1,8-2,0			
encoche ouverte	B <sub>simax</sub>			1,6-1,8					3,7-3,9			
Culas. du rotor à cage	B <sub>rj</sub>	≤ 1,45	≤ 1,25	≤ 1,15		≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 1,35	≤ 1,25			≤ 0,55
à bagues pour U=6000V	B <sub>rj</sub>	-	≤ 1,25	≤ 1,05		≤ 0,75	-	≤ 1,35	≤ 1,15			≤ 0,85
Dents du rotor section const. (encoches ovales)	B <sub>rj</sub>	-	≤ 1,55	≤ 1,30		≤ 0,10	-	≤ 1,45	≤ 1,20			≤ 1,0
sect. la pl. enr. à cage	B <sub>st</sub>			3,75-3,85				3,4-3,8		1,8-1,95		
sect. la pl. enr. à bagues	B <sub>st</sub>			3,8-3,9				3,4-3,8		3,8-2,0		

Tableau. 7 L'induction magnétique admissible dans les tronçons du circuit magnétique

Epaisseur d'une Tôle, mm	Isolation des tôles		
	non isolées oxydées	vernis	papier
1,0	0,98	0,97	0,95
0,5	0,97	0,95	0,90
0,35	0,95	0,93	0,87

Tableau. 8 Coefficients de remplissage de paquet on l'acier



Position	Matériaux	Epaisseur [mm]	Nombre de couches
1	Resine epoxyde	1,00	1

<b>2</b>	<b>Isolation à base de tissu et de Mica verni</b>	<b>0,25</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Ruban en verre</b>	<b>0,10</b>	<b>1 en demire couverture</b>
<b>4</b>	<b>Stratifié en pabre de verre</b>	<b>0,50</b>	<b>1</b>

Tableau. 9 Isolation d'enroulement d'excitation

2p	Nombre d'encoche du stator	Nombre d'encoche rotor	
		sans inclinaison	avec inclinaison
4	12	9 ;	15;
	18	10; 14 ;	18; 22
	24	15; 16; 17; 32	16; 18; 20; 30; 33; 34; 35; 36
	36	26; 44; 46	24; 27; 29; 30; 32; 34; 45; 48
	42	34; 50; 52; 54	33; 34; 38; 51; 53
	48	34; 38; 56; 58; 62; 64	36; 38; 39; 40; 44; 57; 59
	60	50; 52; 68; 70; 74	48; 49; 51; 56; 64; 69; 71
	72	62; 64; 80; 82; 86	61; 63; 68; 76; 81; 83

Tableau. 10 Le nombre d'encoche préférable des moteurs asynchrone en cage

$k_{ar}$	h
0.19	50-63
0.23	71-250
0.22	280-355 2p=2
0.23	280-355 2p=4
0.23	400-500

Tableau. 11 Rapport  $k_{ar}$  entre  $D_{ar}$  et  $D_a$

B, T	H, A/m									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	543	554	564	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2880	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5130	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14700	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Tableau. 12 Toles d'acier magnétique 2013 ( Courbe d'aimantation des dents d'un moteur asynchrone

B, T	H, A/m									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3860	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Tableau. 13 Toles d'acier magnétique 2013 (Courbe d'aimantation de la culasse d'un moteur asynchrone)

a, mm	b, mm	S, mm <sup>2</sup>	a, mm	b, mm	S, mm <sup>2</sup>
4	30	120	5	50	250
4	40	160	5	60	300
4	50	200	6	30	180
4	60	240	6	40	240
5	30	150	6	50	300
6	40	200	6	60	360

Tableau. 14 Barres en aluminium à section rectangulaire

La dimen- sion b, mm	La dimension, mm																		
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,10	1,12	1,15	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	
Section théorique du fil, mm <sup>2</sup>																			
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,265	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,565	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—	—
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315	—
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163	—
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—	—
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	—
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	—
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,395	—	8,188	—	9,137	—	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	—
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—	—
5,60	4,343	4,605	4,868	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	—
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,560	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,95	—
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,510	—	11,70	—	13,04	—	—
7,10	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	—
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	—
8,50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,61	—	—

Tableau. 15 Fils à section rectangulaire

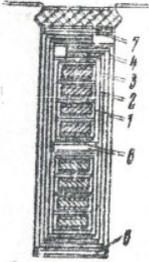
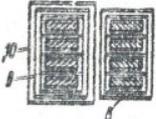
Position	Matériau Type	Nombre de couches		Épaisseur bilatérale, mm		
		Épais-suivant la larg	Épais-suivant la haut	suivant la larg	suivant la haut	
 Partie d'encoche	Deformation de l'iso- lation à cause d'imp- regnation			0,1	0,1	
	1 bande en verre	0,1	1 couche à l'état	0,2	0,2	
	Épaisseur total			0,3	0,3	
	2 tissu de verre verni	0,2	2	3	0,4	0,6
	3 micaïte souple	0,2	2	3	0,4	0,6
	4 tissu de verre verni	0,2	2	3	0,4	0,6
	5 strati- fiant à fibres de verre	0,5		1		0,5
	6 micaïte souple	0,5		1		0,5
7 Tolérance de montage	0,5		1		0,5	
Épaisseur total sans câble				2,0	4,7	
 Partie frontale	8 bande en verre	0,2	1 couche en demi- recouvrement	0,8	0,8	
	9 tissu de verre verni	0,2		0,8	0,8	
	10 bande en verre	0,2		0,8	0,8	
	Épaisseur total			1,6	1,6	

Tableau. 16 Isolation des enroulements rotatifs des machines

asynchrones à rotor bobiné,  $P \leq 100$  KW